



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
GEODÉSICA, CARTOGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΑ

ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Έλλη Σταθοπούλου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2011

Η Διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε ως συνεργασία του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου με το Universidad Politécnica de Valencia στο πλαίσιο του προγράμματος LLP- Erasmus.

Την συνεπίβλεψη είχαν ο Καθηγητής ΕΜΠ κ. Ανδρέας Γεωργόπουλος και ο Καθηγητής UPV José Luis Lerma García

Ευχαριστίες

Πρώτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο, ο οποίος, πάντα με καλή διάθεση και όρεξη για δουλειά στήριξε την ιδέα να πραγματοποιήσω τη μισή μου διπλωματική εργασία στο εξωτερικό στο πλαίσιο του προγράμματος Erasmus, επιχειρώντας κάτι τέτοιο πρώτη φορά και δείχνοντάς μου εμπιστοσύνη. Επίσης, τον ευχαριστώ πολύ για βοήθεια που μου παρείχε σε θεμελιώδη και πιο εξειδικευμένα προβλήματα που προέκυπταν καθώς και για την άμεση ανταπόκρισή του σε αυτά. Ακόμη, οφείλω να τον ευχαριστήσω για την κατανόηση, τις συμβουλές και τον χρόνο που μου δίθετε, όχι μόνο κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας, αλλά συνολικά στα τελευταία ακαδημαϊκά έτη.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κα. Άρτεμη Βαλάνη, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό και Υπ. Διδάκτορα της ΣΑΤΜ, για όλη την βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφερε σε καίρια επιστημονικά θέματα, όσο βρισκόμουν στην Βαλένθια, αλλά και κυρίως κατά την επεξεργασία των δεδομένων στην Αθήνα. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι πολλές από τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική έχουν εφαρμοστεί πρώτα από την ίδια.

Ευχαριστώ τον Καθηγητή του Universidad Politécnica de Valencia, José Luis Lerma García, για την προθυμία του να συνεπιβλέψει αυτή την διπλωματική εργασία, αλλά και για την βοήθεια που μου παρείχε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Ευχαριστώ ιδιαίτερος τον Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Χαράλαμπο Ιωαννίδη για τις συμβουλές, την υπομονή και την προθυμία του να βοηθήσει και να λύσει τις απορίες μου ακόμη και αν ο χρόνος του ήταν ιδιαίτερα περιορισμένος.

Θέλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της ΣΑΤΜ και ιδιαίτερος την κυρία Σέβη Ταπεινάκη, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό και Υπ. Διδάκτορα της ΣΑΤΜ για την βοήθεια που μου παρείχε από την αρχή αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να πω ένα ευχαριστώ στο προσωπικό του Εργαστηρίου Αναλυτικής Φωτογραμμετρίας (Laboratório de Fotogrametría Analítica) του UPV και πιο συγκεκριμένα στις κυρίες:

-Miriam Cabréles López, Υπ. Διδάκτορα του UPV για την βοήθειά της σε θέματα που αφορούν τα λογισμικά κατά τη διάρκεια παραμονής μου στην Ισπανία

-Francesca Duka, παλαιοντολόγο, για την προθυμία της να βοηθήσει, την συμβολή της κατά τη διάρκεια λήψης των φωτογραφιών και την παραχώρηση της μηχανής της.

Ακόμη, ευχαριστώ όλους τους καλούς μου φίλους που με βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο τον τελευταίο αυτό χρόνο. Ιδιαίτερα την κα. Ιουλία Λέβεντη, Αγρονόμο Τοπογράφο Μηχανικό για την συμβολή της κατά την διάρκεια των μετρήσεων και για το ενδιαφέρον της.

Τέλος, μα πάνω απ' όλα, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς και όλη την οικογένειά μου, που με στήριζαν, ηθικά και υλικά και που μου έδωσαν τις βάσεις ώστε να επιτύχω όλα όσα ήθελα μέχρι τώρα.

Περίληψη

Η φωτογραμμετρία, από πολύ παλιά ήταν το πιο κατάλληλο εργαλείο για την τεκμηρίωση σύνθετων αντικειμένων, είτε αυτά είναι αρχιτεκτονικές κατασκευές, αγάλματα, ή γενικά Μνημεία Πολιτιστικής Κληρονομιάς. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, η εξέλιξη της τεχνολογίας, η χρήση των επίγειων σαρωτών *laser* και της ψηφιακής φωτογραμμετρίας έχει επιφέρει πολλές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο δουλεύουν οι ερευνητές σε αυτόν τον τομέα. Ο συνδυασμός των μεθόδων σάρωσης με την ψηφιακή φωτογραμμετρία περιέχει ακόμα πολλά άλυτα προβλήματα και βρίσκεται υπό έρευνα. Κύριος στόχος είναι η μετατροπή του νέφους σημείων που συλλέγεται από τον σαρωτή σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο που θα αναπαριστά πλήρως το αντικείμενο. Το τρισδιάστατο αυτό μοντέλο πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις ακριβείας και ταυτόχρονα είναι εύκολο διαχειρίσιμο ώστε να είναι κατάλληλο και για διάδοση μέσω διαδικτύου (*web GIS, Digital Libraries* κτλ.). Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιούνται κλασσικές τοπογραφικές μέθοδοι, μέθοδοι *laser scanning* και φωτογραμμετρίας, όπως και τεχνικές *computer graphics*.

Η Διπλωματική αυτή εργασία περιγράφει τα διάφορα στάδια της διαδικασίας παραγωγής τρισδιάστατων μοντέλων αντικειμένων με πολύπλοκο ανάγλυφο, με χρήση δεδομένων από επίγειο σαρωτή *laser*. Ακόμη, αναλύεται και η διαδικασία παραγωγής ορθοφωτογραφιών χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα. Η μελέτη αυτή έγινε με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από την Γεωμετρική Τεκμηρίωση ενός πολύπλοκου αρχιτεκτονικά αντικειμένου, της Ρωμανικής Πύλης του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια στην Ισπανία.

Abstract

Traditionally, photogrammetry has been the most appropriate tool for the documentation of a variety of complex objects, whether they are architectural constructions, sculptures or monuments in general. During the recent years, due to the spectacular technological advances and the use of terrestrial laser scanners and digital photogrammetry, the workflow in this field is continuously being revisited and updated. In this respect, the combination of 3D acquisition systems with photogrammetric processes still remains a very challenging task which includes some unsolved problems. The main aim of such procedures is to convert an acquired point cloud into a realistic 3D polygonal model. It is desired that the 3D model should not only be detailed, but also suitable and easy to handle. For that purpose, a combination of classical surveying methods, laser scanning, photogrammetric and computer graphics processes should be used. Through such a workflow satisfactory accuracies may be achieved, but also the display of the resulting 3D model is useful for dissemination and interaction purposes as well (web GIS, Digital Libraries etc.).

This Diploma Thesis describes the various steps carried out to produce 3D models of complex objects by the use of data acquired from terrestrial laser scanners. Moreover, it includes the procedure of producing orthophotos from such models. The experience was gained by the geometric documentation of a highly detailed object, the Romanesque Door of the Cathedral of Valencia in Spain, by a terrestrial laser scanner.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	IV
Abstract	V
Εισαγωγή.....	- 1 -
1 Τρισδιάστατη Τεχνολογία	- 4 -
1.1 Εισαγωγή	- 4 -
1.2 Επίγειοι Σαρωτές Laser (Terrestrial Laser Scanners)	- 5 -
1.3 Τρισδιάστατη Όραση Υπολογιστών (Computer Vision)	- 8 -
1.4 Ψηφιακές Βιβλιοθήκες	- 9 -
2 Η Περίπτωση της Puerta Almoína	- 11 -
2.1 Εισαγωγή	- 11 -
2.2 Η πόλη της Βαλένθια και ο Καθεδρικός Ναός.....	- 11 -
2.3 Puerta Almoína	- 14 -
3 Συλλογή των Δεδομένων	- 19 -
3.1 Εισαγωγή	- 19 -
3.2 Διαθέσιμος Εξοπλισμός	- 19 -
3.2.1 Τοπογραφικός εξοπλισμός	- 19 -
3.2.2 Σαρωτής.....	- 20 -
3.2.3 Φωτογραφικές μηχανές	- 21 -
3.3 Εργασίες Πεδίου	- 23 -
3.3.1 Αναγνώριση της περιοχής μελέτης	- 23 -
3.3.2 Προγραμματισμός εργασιών.....	- 23 -
3.3.3 Τοποθέτηση στόχων	- 24 -
3.3.4 Λήψεις	- 25 -
3.3.5 Τοπογραφικές μετρήσεις	- 25 -
3.3.6 Σαρώσεις	- 26 -
3.3.7 Διάρκεια Μετρήσεων	- 29 -
3.3.8 Όγκος δεδομένων.....	- 29 -
4 Δημιουργία Τρισδιάστατου μοντέλου	- 30 -
4.1 Εισαγωγή	- 30 -
4.2 Συνένωση Νεφών	- 30 -
4.3 Καθάρισμα – Οργάνωση-κατάτμηση - Φιλτράρισμα των νεφών	- 34 -

4.4 Από το νέφος σημείων στην επιφάνεια – μοντελοποίηση	40 -
4.5 Εξομάλυνση της επιφανείας.....	45 -
4.6 Διόρθωση της επιφανείας	47 -
4.7 Μείωση του όγκου των δεδομένων	52 -
4.8 Έλεγχος της επιφανείας.....	54 -
4.8.1 Σύγκριση στο Geomagic Studio	55 -
4.8.2 Σύγκριση στο 3DReshaper	57 -
4.9 Συμπεράσματα	59 -
5 Επένδυση του μοντέλου	60 -
5.1 Εισαγωγή	60 -
5.2 Επένδυση μοντέλου υψηλής ανάλυσης.....	63 -
5.2.1 Επένδυση στο 3DReshaper.....	64 -
5.2.2 Επένδυση στο Image Master	66 -
5.3 Επένδυση μοντέλου χαμηλής ανάλυσης.....	68 -
5.3.1 Δημιουργία προσεγγιστικής επιφανείας (c-mesh).....	68 -
5.3.2 Δημιουργία UV Texture Map.....	70 -
5.3.3 Προσανατολισμός των φωτογραφιών	71 -
5.3.4 Δημιουργία textured .obj μέσω αλγορίθμου	71 -
5.3.5 Rendering (απόδοση)	72 -
5.4 Εικονική περιήγηση στο μοντέλο (Animation)	73 -
5.5 Συμπεράσματα	74 -
6 Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας	75 -
6.1 Εισαγωγή	75 -
6.2 Προαπαιτούμενα - Προεπεξεργασία.....	75 -
6.3 Φωτογραμμετρική επεξεργασία	77 -
6.3.1 Εσωτερικός προσανατολισμός.....	77 -
6.3.2 Εξωτερικός προσανατολισμός.....	78 -
6.4 Σύνταξη φωτομωσαϊκών	79 -
7 Συμπεράσματα	80 -
7.1 Χρήση τρισδιάστατων μοντέλων για αποτυπώση αντικειμένων.....	80 -
7.1.1 Προτάσεις.....	82 -
7.2 Παραγωγή ορθοφωτογραφίας από τρισδιάστατα μοντέλα	82 -
Βιβλιογραφία	87 -

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, η εξέλιξη της τεχνολογίας, η χρήση των επίγειων σαρωτών *laser* και της ψηφιακής φωτογραμμετρίας έχει επιφέρει πολλές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο δουλεύουν οι ερευνητές και οι μηχανικοί που ασχολούνται με την αποτύπωση αντικειμένων. Σε συνδυασμό με τις μεθόδους συλλογής μετρητικών δεδομένων, η ανάπτυξη των κλάδων της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, της όρασης υπολογιστών (*computer vision*) και των μεθόδων *computer graphics* μπορεί να δώσει εξαιρετικά αποτελέσματα. Τα παράγωγα μιας τέτοιας επεξεργασίας είναι αναπαραστάσεις του αντικειμένου, δηλαδή τρισδιάστατα μοντέλα (*3D models*). Τα τρισδιάστατα αυτά μοντέλα μπορεί να φέρουν πληροφορία όχι μόνο για την γεωμετρία αλλά και για την υφή του αντικειμένου (φωτορεαλισμός) και μπορούν να οπτικοποιηθούν σε βίντεο.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, συλλέχθηκαν και υπέστησαν επεξεργασία γεωδαιτικά και φωτογραμμετρικά δεδομένα, καθώς και δεδομένα από επίγειο σαρωτή *laser* για ένα συγκεκριμένο πολύπλοκο αρχιτεκτονικά αντικείμενο, τη Ρωμανική Πύλη του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια στην Ισπανία. Σκοπός ήταν να αξιοποιηθούν με τον καλύτερο τρόπο τα δεδομένα και να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα του αντικειμένου, έτσι ώστε σε συνδυασμό με τις ορθοφωτογραφίες να το τεκμηριώνουν πλήρως. Ιδιαίτερο βάρος όμως δόθηκε στην επεξεργασία των δεδομένων του σαρωτή, καθώς είναι ένα κομμάτι της φωτογραμμετρίας που σήμερα προσφέρεται για έρευνα. Έγινε μια προσπάθεια να εντοπιστούν και να ομαδοποιηθούν όλα τα προβλήματα τα οποία προέκυψαν κατά τη διαχείριση των δεδομένων, έτσι ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος τρόπος αντιμετώπισής τους από τους χρήστες στο κοντινό μέλλον. Έτσι, παρουσιάζονται όλα τα τυχόν προβλήματα που μπορεί να χρειαστεί να αντιμετωπίσει κάποιος καθώς και τρόποι αντιμετώπισής τους, με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα λογισμικά πακέτα, ελεύθερα και μη, για εκτέλεση της ίδιας ή παρόμοιας εργασίας, με σκοπό να βρεθεί ο καλύτερος συνδυασμός των διαθέσιμων έως τώρα εργαλείων για να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα.

Ως παράγωγα, σε αυτή την περίπτωση προέκυψαν:

- Το υψηλής ανάλυσης ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου σε μορφή ακανόνιστων τριγώνων (*Triangulated Irregular Network - TIN*)
- Το φωτορεαλιστικό μοντέλο όλου του αντικειμένου (χαμηλής ανάλυσης)
- Το φωτορεαλιστικό μοντέλο του αντικειμένου τμηματικά (υψηλής ανάλυσης)
- Το βίντεο με σκηνές από το επενδεδυμένο μοντέλο χαμηλής ανάλυσης, κατάλληλο για διαδραστικές εφαρμογές
- Οι ορθοφωτογραφίες (μετά από φωτογραμμετρική επεξεργασία με συμβατικές μεθόδους ψηφιακής φωτογραμμετρίας)

Επειδή η παραγωγή σχεδίων και τρισδιάστατων μοντέλων δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να είναι αυτοσκοπός, αλλά αυτά τα δεδομένα να είναι αξιοποιήσιμα με κάποιον τρόπο, τα παράγωγα αυτής της μελέτης πρέπει να παρέχουν την καλύτερη δυνατή ακρίβεια, ώστε να προσφέρουν σωστή μετρητική πληροφορία. Η μετρητική πληροφορία φαίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη σε συντηρητές, αρχιτέκτονες και αρχαιολόγους σε περιπτώσεις που είναι αναγκαίες επεμβάσεις πάνω στο μνημείο. Ακόμα όμως και στην περίπτωση που το προς μελέτη αντικείμενο δεν είναι ένα μνημείο αλλά κάποιο αντικείμενο (π.χ. βιομηχανικό ή αρχιτεκτονικό) είναι και πάλι πολύ σημαντικό τα παράγωγα να παρέχουν αυτή τη μετρητική ακρίβεια. Ταυτόχρονα όμως τα δεδομένα που προκύπτουν θα πρέπει να είναι εύκολα διαχειρίσιμα, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για περαιτέρω μελέτες ή εφαρμογές όπως π.χ η δημιουργία μιας διαδικτυακής βάσης δεδομένων (*web GIS*). Σε περιπτώσεις μνημείων τα παράγωγα αρχεία είναι θεμιτό να είναι και συμβατά με τις προδιαγραφές που ορίζουν οι Ψηφιακές Βιβλιοθήκες.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν αναφέρονται παλαιότερες και πιο σύγχρονες μέθοδοι αποτύπωσης μνημείων και γενικότερα σύνθετων αντικειμένων (αρχιτεκτονικών, βιομηχανικών κτλ.) δίνοντας έμφαση στην τεκμηρίωσή τους με ψηφιακές μεθόδους. Αναλύεται διεξοδικά η σειρά εργασιών που συνιστάται να ακολουθηθεί, τόσο στο πεδίο όσο και στη μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων, με αφορμή την εμπειρία που αποκτήθηκε από την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Αναλυτικά, στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται οι συνήθεις μέθοδοι αποτύπωσης αντικειμένων και αναλύεται η συμβολή των ψηφιακών μεθόδων σε αυτόν τον τομέα. Περιγράφεται συνοπτικά η τεχνολογία των επίγειων σαρωτών *laser* και αναφέρονται λίγα λόγια για την τρισδιάστατη όραση υπολογιστών και τις Ψηφιακές Βιβλιοθήκες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται ορισμένες πληροφορίες για το περιβάλλον του αντικειμένου που μελετάται στην συγκεκριμένη περίπτωση και περιγράφονται τα αρχιτεκτονικά του στοιχεία.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται ο διαθέσιμος εξοπλισμός της συγκεκριμένης εφαρμογής όπως και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά την συλλογή των δεδομένων.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσεται η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων, έτσι ώστε από το νέφος σημείων που συλλέχθηκε να προκύψει ένα ολοκληρωμένο τρισδιάστατο μοντέλο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η ροή εργασιών επένδυσης του μοντέλου, τόσο με έναν αυτόματο τρόπο που παρέχουν τα εμπορικά λογισμικά όσο και με μια διαφορετική μεθοδολογία που εφαρμόστηκε πρώτη φορά στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ. Ακολούθως αναφέρεται και η διαδικασία παραγωγής βίντεο εικονικής περιήγησης στο μοντέλο.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την φωτογραμμετρική επεξεργασία που ακολουθήθηκε ώστε να προκύψουν τα τελικά ορθοφωτομωσαϊκά, με χρήση του τρισδιάστατου μοντέλου.

Στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν μετά από αυτή τη μελέτη.

1 Τρισδιάστατη Τεχνολογία

1.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών έχει δώσει πολλές δυνατότητες σε ερευνητές και μηχανικούς που απασχολούνται και πειραματίζονται στο πεδίο της αποτύπωσης μνημείων και άλλων τεχνητών ή φυσικών αντικειμένων.

Παλαιότερα, η αποτύπωση των μνημείων αλλά και γενικότερα όλων των αντικειμένων γινόταν με μη αυτοματοποιημένες διαδικασίες χρησιμοποιώντας απλές μετρητικές διατάξεις όπως μετροταινίες, γεωδαιτικούς σταθμούς κτλ. Τα μοναδικά παράγωγα που μπορούσε ένας μηχανικός να παρουσιάσει στους ενδιαφερόμενους (αρχιτέκτονες, συντηρητές, αρχαιολόγους κτλ.) ήταν τυπωμένα υπό κλίμακα γραμμικά σχέδια κατόψεων, όψεων και τομών του αντικειμένου (συνήθως 1:20 έως 1:100). Με τις εφαρμογές της Ψηφιακής Φωτογραμμετρίας, αργότερα, οι ορθοφωτογραφίες, τα ορθοφωτομωσαϊκά και τα αναπτύγματα έδιναν ακόμη περισσότερη πληροφορία για το αντικείμενο, καθώς πρόκειται για εικονιστικό προϊόν με μετρητική αξία.

Πλέον, η πληθώρα μεθόδων συλλογής μετρητικών δεδομένων χρησιμοποιώντας εξελιγμένες και αυτοματοποιημένες μετρητικές διατάξεις σε συνδυασμό με μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, όρασης υπολογιστών (*computer vision*) και μεθόδους *computer graphics* μπορεί να δώσει εξαιρετικά αποτελέσματα. Το αξιοσημείωτο σε αυτή την περίπτωση είναι ότι τα αποτελέσματα δεν περιορίζονται σε απλά γραμμικά σχέδια συνδυασμένα με ορθοφωτογραφίες, αλλά πρόκειται για τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένου, καθώς συλλέγεται ένας μεγάλος αριθμός χαρακτηριστικών σημείων (νέφος σημείων ή *point cloud*) από τα οποία δημιουργείται η επιφάνεια του αντικειμένου. Τα τρισδιάστατα αυτά μοντέλα μπορεί να φέρουν πληροφορία όχι μόνο για την γεωμετρία αλλά και για την υφή του αντικειμένου (φωτορεαλισμός) και μπορούν να οπτικοποιηθούν σε βίντεο. Ακόμη, από τα τρισδιάστατα μοντέλα μπορεί να προκύψουν και ορθοφωτογραφίες, αρκετά υψηλής ακρίβειας.

Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση αποτελεί αντικείμενο έρευνας πολλών πεδίων της επιστήμης όπως τα μαθηματικά, η οπτική, η όραση υπολογιστών και φυσικά, της φωτογραμμετρίας.

Συνοπτικά αναφέρεται η εξέλιξη των μεθόδων γεωμετρικής τεκμηρίωσης – αποτύπωσης ενός αντικειμένου στο χώρο των τριών διαστάσεων:

- **Τοπομετρική μέθοδος**, με εφαρμογές κυρίως σε απλά αντικείμενα μικρών διαστάσεων και χωρίς μεγάλες απαιτήσεις ακριβείας. Πραγματοποιείται με μετρήσεις μηκών με τη βοήθεια ακοντίων ή μετροταινιών. Το κόστος της είναι ιδιαίτερα χαμηλό. Εξακολουθεί μέχρι και σήμερα να εφαρμόζεται για έλεγχο των τελικών προϊόντων.
- **Τοπογραφική μέθοδος**, που χρησιμοποιεί όργανα υψηλής ακριβείας (ολοκληρωμένους γεωδαιτικούς σταθμούς) μετρίου γενικά κόστους. Ιδιαίτερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας έως σήμερα, η μέθοδος αυτή μπορεί να δώσει εξαιρετικά ακριβή αποτελέσματα ακόμη και για αποτυπώσεις μεγάλων κλιμάκων αντικειμένων με μεγάλες διαστάσεις. Ωστόσο, δεν πληρεί τις απαιτήσεις ακριβείας για πολύπλοκα και λεπτομερή αντικείμενα.
- **Φωτογραμμετρική μέθοδος**, η οποία χρησιμοποιεί όλες σχεδόν τις μεθόδους της τοπογραφικής, αλλά ταυτόχρονα εξάγεται μετρητική πληροφορία και μέσα από φωτογραφίες (που έχουν ληφθεί με μετρητικές ή μη αναλογικές ή ψηφιακές μηχανές), αποτυπώνοντας με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια και καλή ακρίβεια ιδιαίτερα πολύπλοκα αντικείμενα. Ανάλογα με την φύση του προς αποτύπωση αντικειμένου επιλέγεται η κατάλληλη φωτογραμμετρική μέθοδος επεξεργασίας. Παλαιότερα, η επεξεργασία των φωτογραφιών γινόταν με αναλογικές ή αναλυτικές μεθόδους (αναλογικά – αναλυτικά όργανα), ενώ σήμερα οι διαδικασίες αυτές πραγματοποιούνται σε περιβάλλον ηλεκτρονικού υπολογιστή (Ψηφιακή Φωτογραμμετρία). Αρκετά ακριβή μέθοδος, ακόμα και για σύνθετα αντικείμενα, με μέτριο γενικά κόστος.
- **Τεχνικές σάρωσης**, με χρήση επίγειων σαρωτών (*laser*, δομημένου φωτός κτλ.), δηλαδή εξελιγμένων οργάνων που έχουν την δυνατότητα να συλλέγουν μεγάλο αριθμό τυχαίων σημείων σε μικρό χρονικό διάστημα και έτσι να περιγράφουν πλήρως το προς αποτύπωση αντικείμενο. Συνήθως, και για πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα συνδυάζεται με φωτογραμμετρικές και τοπογραφικές μεθόδους. Ιδιαίτερα λεπτομερής μέθοδος, αλλά αρκετά χρονοβόρα και με μεγάλο κόστος.

Ωστόσο, η επιλογή της μεθόδου τεκμηρίωσης που θα ακολουθηθεί είναι συνάρτηση της μορφής του ίδιου του αντικειμένου, του επιπέδου λεπτομέρειας και ακρίβειας που τελικώς απαιτείται, όπως και του χρόνου και του κόστους.

1.2 Επίγειοι Σαρωτές Laser (*Terrestrial Laser Scanners*)

Η φωτογραμμετρία ήταν από πολύ παλιά αξιόπιστος τρόπος να παράγονται γραμμικά σχέδια ή ανηγμένες εικόνες και αναπτύγματα των αντικειμένων, είτε αυτά ήταν μνημεία είτε άλλες κατασκευές. Η καταγραφή τους όμως, έγινε πολύ πιο λεπτομερής και ίσως ταχύτερη με την χρήση της τεχνολογίας των επίγειων σαρωτών *laser*.

Ωστόσο, όπως κάθε είδους μέτρηση, έτσι και η μέτρηση των συντεταγμένων των σημείων μέσω ενός τέτοιου σαρωτή εμπεριέχει διάφορα σφάλματα τα οποία μπορεί να οφείλονται τόσο στον ίδιο το σαρωτή, όσο και στο προς σάρωση αντικείμενο (υλικό, γεωμετρία κτλ.). Βασικό όμως πλεονέκτημα των σαρωτών *laser* ως ενεργητικά όργανα απεικόνισης είναι το γεγονός ότι έχουν την δυνατότητα να συλλέξουν τρισδιάστατες συντεταγμένες πολύ μεγάλου αριθμού σημείων, που είναι το άμεσο αποτέλεσμα της σάρωσής τους, εμφανιζόμενο ως πυκνά νέφη σημείων (*point cloud* ή *DDSM – Dense Digital Surface Model*). Για κάθε σημείο του νέφους μετρώνται οι συντεταγμένες X , Y , Z και η τιμή της ανακλαστικότητάς του i . Η λειτουργία αυτή είναι αντίστοιχη με την πιο διαδεδομένη μέθοδο σάρωσης ψηφιακών μοντέλων εδάφους με χρήση *LiDAR*, που ονομάζονται και *Aerial Laser Scanners (ALS)*.

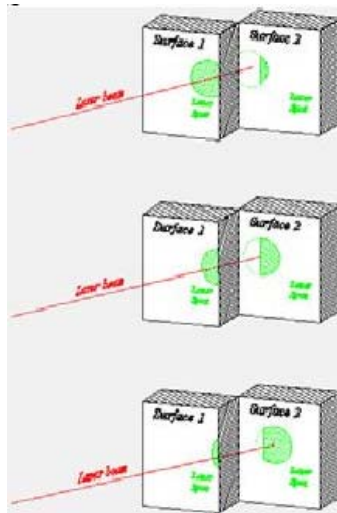
Είναι δύσκολο να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των επίγειων σαρωτών *laser* που υπάρχουν στην αγορά αυτή τη στιγμή. Υπάρχουν διάφορα είδη, καθένα από τα οποία θεωρείται καταλληλότερο για άλλου είδους εφαρμογές. Μερικοί σαρωτές είναι καταλληλότεροι για μετρήσεις σε εσωτερικούς χώρους και μεσαίες αποστάσεις (μέχρι 100 μέτρα), άλλοι για εφαρμογές σε εξωτερικούς χώρους με μεγάλο βεληνεκές (πάνω από 100 μέτρα) και υπάρχουν επίσης σαρωτές για εγγύς εφαρμογές (*close range applications*) που φτάνουν τα μερικά μέτρα όμως δίνουν πολύ ακριβή αποτελέσματα.

Οι σαρωτές αυτοί μπορεί να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο μετρούν την απόσταση σε:

- **Σαρωτές παλμού ή μέτρησης χρόνου πτήσης της ακτίνας *laser* (*time of flight – pulse principle*)**. Είναι η πιο διαδεδομένη ίσως μέθοδος έως σήμερα, καθώς εξασφαλίζει καλή ακρίβεια (μερικά χιλιοστά) και μάλιστα για εφαρμογές μεγάλων αποστάσεων, της τάξεως των μερικών εκατοντάδων μέτρων.
- **Σαρωτές διαφοράς φάσης (*phase comparison – amplitude modulation*)**. Μια επίσης αρκετά διαδεδομένη τεχνική, κατάλληλη για μετρήσεις έως και εκατό μέτρα, με ακρίβεια που μπορεί να φτάσει τα μερικά χιλιοστά.
- **Σαρωτές τριγωνισμού (*optical triangulation*)**. Αυτή η κατηγορία σαρωτών είναι καταλληλότερη για σύνθετα αντικείμενα τα οποία απαιτούν πολύ καλή ακρίβεια (της τάξεως των μερικών μικρόμετρων) και μεγάλη πυκνότητα σάρωσης. Βέβαια, υπάρχει ο περιορισμός στο βεληνεκές τους, το οποίο μπορεί να είναι έως μερικά μέτρα μόνο. Αυτή η τεχνική μέτρησης χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές και εφαρμογές *reverse engineering*.

Περισσότερες πληροφορίες για την τεχνολογία των σαρωτών *laser* υπάρχουν στην εγχώρια και διεθνή βιβλιογραφία. Ενδεικτικά αναφέρονται τα [Ιωαννίδης, 2008], [Froehlich et al., 2004], [Remondino, 2010] και [Lerma et al., 2008].

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, οι μετρήσεις με τον επίγειο σαρωτή περιέχουν σφάλματα, όπως κάθε μέτρηση με οποιοδήποτε κλασικό τοπογραφικό όργανο. Εξάλλου, στην ουσία οι σαρωτές αποτελούν φυσική μετεξέλιξη των ολοκληρωμένων γεωδαιτικών σταθμών χωρίς χρήση ανακλαστήρα. Ωστόσο, με την χρήση αυτής της μεθόδου, υπεισέρχονται και άλλα σφάλματα. Ιδιαίτερα σε περίπλοκες επιφάνειες, με έντονες ασυνέχειες και ακμές και εάν το μέγεθος της κουκίδας του *laser* είναι αρκετά μεγάλο, είναι πολύ εύκολο να διαχωριστεί και να μετρηθούν λάθος σημεία, τα οποία δεν ανήκουν στο αντικείμενο (εικόνα 1.1). Οι ανιχνευτές *laser* ανακτούν τυχαία ένα πυκνό σύνολο μετρημένων σημείων. Ο χειριστής επιλέγει μόνο το τμήμα του αντικειμένου που επιθυμεί να σαρωθεί και την πυκνότητα των σημείων που επιθυμεί στην σάρωση αυτή. Σφάλματα επίσης προσθέτονται και σε περιπτώσεις που το προς σάρωση αντικείμενο είναι πολύ υψηλής ή χαμηλής ανακλαστικότητας, καθώς είναι πολύ πιθανό η ένταση του σήματος που ανακλάται από το αντικείμενο να ξεφεύγει από το εύρος ευαισθησίας του αισθητήρα του σαρωτή, με αποτέλεσμα και πάλι να εμφανίζονται πολλά λάθος σημεία (θόρυβος) [Remondino, 2010]. Πηγή σφαλμάτων μπορεί να αποτελέσουν επίσης οι ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως αναφέρεται και στο [Lerma et al., 2008].



Εικόνα 1.1 :Ο διαχωρισμός της ακτίνας *laser*

Η συλλογή της απαραίτητης πληροφορίας μέσω ενός επίγειου σαρωτή είναι απλή και σχετικά γρήγορη συγκριτικά με την ποιότητα και τον όγκο της πληροφορίας που προσφέρει. Παρ'όλα αυτά, η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων (δηλαδή των *point clouds*) είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτεί πολύ προσεκτική οργάνωση, ώστε να αξιοποιηθούν τα δεδομένα με στόχο το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα (γεωμετρικά και οπτικά) στον μικρότερο δυνατό χρόνο και με σχετικά μικρό κόστος. Σκοπός βέβαια της επεξεργασίας της πληροφορίας που συλλέχθηκε κατά την διάρκεια των σαρώσεων είναι η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου του αντικειμένου που οπτικοποιεί και περιγράφει με τον πιο πιστό τρόπο την πραγματικότητα μέσα σε υπολογιστικό περιβάλλον. Αυτό αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές, καθώς όπως εύστοχα αναφέρει ο Remondino: ενώ η δημιουργία ψηφιακού μοντέλου επιφανείας

έχει μια μεγάλη παράδοση και έχει επιτύχει αποτελεσματικές λύσεις, η σωστή μοντελοποίηση κοντινών επιφανειών ή αντικειμένων απροσδιόριστου σχήματος είναι κάτι πολύ πρόσφατο, ένα όχι πλήρως λυμένο πρόβλημα και ακόμη ένα σημαντικό θέμα προς διερεύνηση σε πολλές ερευνητικές δραστηριότητες [Remondino, 2003].

Υπάρχουν διάφορα δυσεπίλυτα προβλήματα σε όλα τα στάδια δημιουργίας του ψηφιακού μοντέλου, που σχετίζονται κυρίως με τον τρόπο διαχείρισης του τεράστιου όγκου των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη διάρκεια μιας πλήρους καταγραφής ενός αντικειμένου με σύγχρονες φωτογραμμετρικές μεθόδους που επικεντρώνονται κυρίως στη χρήση σαρωτή *laser*. Επιπλέον, τα συνήθη φωτογραμμετρικά προβλήματα κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας με συμβατικές μεθόδους με σκοπό την παραγωγή ψηφιακής ορθοφωτογραφίας εξακολουθούν να υπάρχουν. Επειδή όμως αυτά θεωρείται ότι έχουν μελετηθεί διεξοδικά σε αντίστοιχες διπλωματικές εργασίες και γενικότερα έρευνες, σε αυτό το τεύχος θα αναλυθούν κυρίως οι διαδικασίες και τα προβλήματα που αφορούν στην επεξεργασία δεδομένων σαρωτή *laser*.

Γενικότερα, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι είναι ιδιαίτερα δύσκολο να μετατραπεί ένα «ακανόνιστο» νέφος σημείων που συλλέγει ο σαρωτής, σε ένα φωτορεαλιστικό τρισδιάστατο μοντέλο που να αναπαριστά πιστά την πραγματικότητα, αλλά ταυτόχρονα να είναι εύκολα διαχειρίσιμο και προσβάσιμο στο μέσο χρήστη. Η δυσκολία αυτή αναφέρεται σε όλα τα στάδια της διαχείρισης των δεδομένων. Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί συνοπτικά η πορεία εργασίας σε περιπτώσεις αξιοποίησης τρισδιάστατου νέφους σημείων ώστε να παραχθεί το μοντέλο του αντικειμένου:

- Συνένωση των νεφών σε ενιαίο σύστημα αναφοράς (*point cloud registration* ή *aligning*)
- Φιλτράρισμα των νεφών (*point cloud filtering*) και κατάτμησή τους (*segmentation*)
- Δημιουργία επιφανείας (*meshing*) και επεξεργασία του τρισδιάστατου μοντέλου (*3D model*)
- Επίθεση εικόνας πάνω στο μοντέλο (*texturing*)

Προαιρετικά, για λόγους διάδοσης και διαδραστικότητας του αντικειμένου μπορεί να ζητηθεί και η εικονική περιήγηση στο μοντέλο, η παραγωγή δηλαδή ενός βίντεο μικρής διάρκειας το οποίο θα αποτελείται από σκηνές όπου θα παρουσιάζεται το τρισδιάστατο μοντέλο υπό διάφορες οπτικές γωνίες με την υφή του.

1.3 Τρισδιάστατη Όραση Υπολογιστών (*Computer Vision*)

Η τρισδιάστατη όραση υπολογιστών προσπαθεί να ερμηνεύσει ένα τρισδιάστατο περιβάλλον χρησιμοποιώντας προβολές που δημιουργούνται από τα οπτικά αισθητήρια στις κάμερες. Αντίθετα, η τρισδιάστατη όραση υπολογιστών ασχολείται

πρωτίστως με την κατανόηση της οπτικής πληροφορίας, όπως αυτή συλλέγεται από εξειδικευμένα ηλεκτρονικά οπτικά αισθητήρια. Συνεπώς, ασχολείται με την εξαγωγή, πρόσκτηση και κατανόηση δεδομένων από την γεωμετρία και την υφή των επιφανειών των αντικειμένων. Ο όγκος της πληροφορίας αυτής είναι τεράστιος καθώς ο πραγματικός κόσμος περιέχει τεράστια γεωμετρική πληροφορία. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη όραση παρέχουν άμεσα γεωμετρική πληροφορία ενός αντικειμένου ή ολόκληρου του χώρου εντός του οπτικού πεδίου τους. Η πληροφορία που προσφέρουν οι τρισδιάστατοι αισθητήρες έχουν να κάνουν με τον προσδιορισμό θέσης στον τρισδιάστατο χώρο. Η πληροφορία αυτή έρχεται να εξαλείψει όλες τις ασάφειες που παρουσιάζουν τα δισδιάστατα συστήματα απεικόνισης [Digitech III, 2005].

1.4 Ψηφιακές Βιβλιοθήκες

Ειδικά για τα μνημεία Πολιτισμικής Κληρονομιάς, έχουν δημιουργηθεί Ψηφιακές Βιβλιοθήκες (*Digital Libraries*), οι οποίες είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει μια πλήρης εικόνα για αυτά, προστατεύοντας τα ταυτόχρονα από οποιαδήποτε καταστροφή (*digital preservation*) ώστε να είναι διαθέσιμα στις επόμενες γενεές. Την ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για καταγραφή και τεκμηρίωση των μνημείων πολιτισμικής κληρονομιάς, σε μια προσπάθεια να σωθούν μέσα στο χρόνο από φυσικές ή ανθρωπογενείς φθορές, φανερώνει τα τελευταία χρόνια και η πληθώρα σχετικών δημοσιεύσεων σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια ανά τον κόσμο. Είναι ένας τρόπος «αποθήκευσης της ιστορίας» και «αφορά στην διάσωση της συλλογικής μνήμης» [National Geographic, 2010].

Έτσι, γίνεται λόγος για την Ψηφιακή Κληρονομιά (*Digital Heritage*), καθώς κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών στον τομέα της Πολιτισμικής Κληρονομιάς, η διαθεσιμότητα ψηφιακά συλλεχθέντων τρισδιάστατων (3D) δεδομένων μετρημένων και κατασκευασμένων σε 3D λογισμικά, παρουσίασε μια ριζοσπαστική αλλαγή στον τρόπο προσέγγισης των ερευνητών [Manferdini et al., 2010].

Οι Ψηφιακές Βιβλιοθήκες είναι μια προσπάθεια της διεθνούς κοινότητας να καταγραφούν όλα τα μνημεία της Πολιτισμικής Κληρονομιάς της ανθρωπότητας σε μια ενιαία βάση δεδομένων η οποία θα είναι διαθέσιμη μέσω διαδικτύου και προσβάσιμη από τον καθένα. Για να μπορεί κάτι τέτοιο να επιτευχθεί, έχουν οριστεί συγκεκριμένες προδιαγραφές των δεδομένων και μεταδεδομένων (*metadata*) που πρέπει να πληρούν τα αρχεία. Το πιο πρόσφατο παράδειγμα προσπάθειας δημιουργίας μιας τέτοιου είδους Ψηφιακής Βιβλιοθήκης στην Ευρώπη είναι η *Europeana*. Η προσπάθεια αυτή ξεκίνησε ουσιαστικά το 2008 και χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Ο οργανισμός εδρεύει στην Εθνική Βιβλιοθήκη της Ολλανδίας. Αποτελεί ίσως την πιο άρτια μορφή Ψηφιακής Βιβλιοθήκης στον ευρωπαϊκό χώρο καθώς καταφέρνει να συγκεντρώνει πληροφορίες που πριν την δημιουργία της ήταν διασκορπισμένες. Καταγράφει τόσο την Πολιτισμική

Κληρονομιά (αρχιτεκτονικά μνημεία, γλυπτά, πίνακες, λαογραφικά στοιχεία, κείμενα...) όσο και ορισμένες επιστημονικές πληροφορίες. Περισσότερες πληροφορίες για την εξέλιξη, το περιεχόμενο και του στόχους της *Europeana* υπάρχουν στον ιστότοπο του οργανισμού¹. Παρόμοιες ψηφιακές βιβλιοθήκες υπάρχουν σε τόσο στην Ευρώπη όσο και στον υπόλοιπο κόσμο (*Athena, Hispana, Hellenic Aggregator* κτλ.)

¹ <http://www.europeana.eu/portal/index.html>

2 Η Περίπτωση της *Puerta Almoína*

2.1 Εισαγωγή

Είναι σημαντικό, πριν την αποτύπωση του αντικειμένου να έχει προηγηθεί μελέτη τόσο για το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, όσο και για την ίδια τη φύση του αντικειμένου (υλικά κατασκευής, αρχιτεκτονική, μορφή κτλ).

Όταν το αντικείμενο της τεκμηρίωσης είναι κάποιο μνημείο, είναι απαραίτητο να υπάρχει γνωστικό υπόβαθρο της ιστορίας, αλλά κυρίως της αρχιτεκτονικής του, ώστε να εκτιμηθούν καλύτερα οι όποιες ιδιαιτερότητες του αντικειμένου και να επιλεγθούν αναλόγως οι καταλληλότερες για αυτό μέθοδοι αποτύπωσης-τεκμηρίωσης. Εξάλλου, η Ολοκληρωμένη Τεκμηρίωση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς είναι μια έννοια που περιλαμβάνει την συλλογή και παρουσίαση όλων εκείνων των στοιχείων –ιστορικών, αρχιτεκτονικών, βιβλιογραφικών, γεωμετρικών- που περιγράφουν ένα μνημείο.

Ακολούθως αναλύονται τα γεωγραφικά, ιστορικά και αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά του υπό μελέτη αντικειμένου, της *Puerta Almoína* (ή Ρωμανική Πύλη) του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια.

2.2 Η πόλη της Βαλένθια και ο Καθεδρικός Ναός

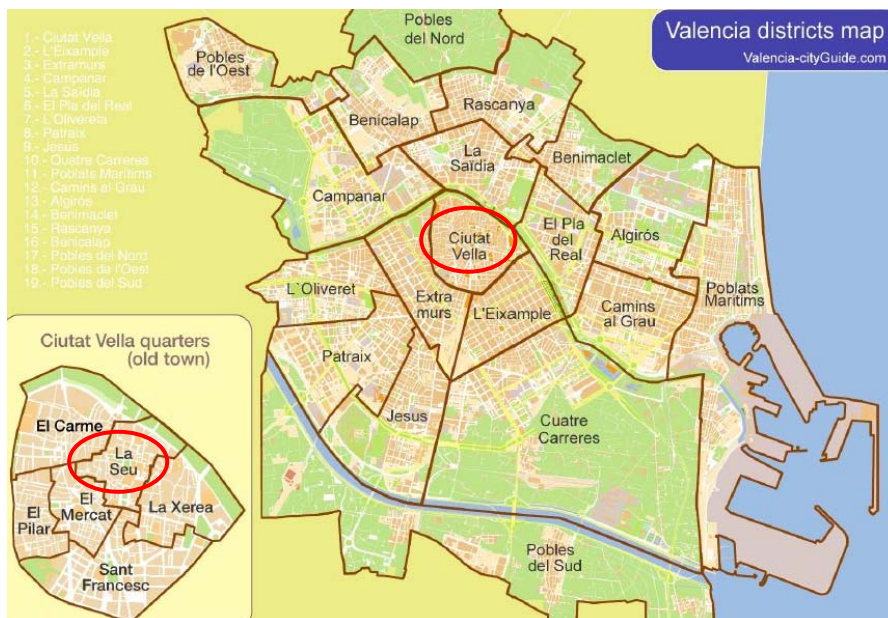
Η πόλη της Βαλένθια (*Valencia*) είναι μια μεσογειακή πόλη, στην κεντρικό-ανατολική περιοχή της Ιβηρικής χερσονήσου (εικόνα 2.1), πρωτεύουσα της ομώνυμης επαρχίας (*Comunidad Valenciana*).

Μετρά σχεδόν δύο χιλιάδες χρόνια ιστορίας, καθώς ιδρύθηκε από τους Ρωμαίους το 138 π.Χ. Στην έκτασή της υπάρχουν διάφορα αρχαιολογικά ευρήματα, ιστορικά κτήρια και ναοί ιδιαίτερης αξίας.



Εικόνα 2.1: Χάρτης της Ιβηρικής Χερσονήσου

Στην καρδιά του ιστορικού κέντρου της Βαλένθια (εικόνα 2.2), βρίσκεται ο περίφημος Καθεδρικός Ναός της πόλης (*Catedral de Valencia* στα καστεγιάνικα ή *La Seu* στα καταλανικά), αφιερωμένος στην Παρθένο Μαρία (*Santa Maria Metropolitan Basilica Cathedral*). Ξεκίνησε να κατασκευάζεται το 1262, στην κορυφή του λόφου όπου οι Ρωμαίοι θεμελίωσαν την πόλη. Κατά τη διάρκεια της αραβοκρατίας στην Ιβηρική στη θέση του υπήρχε μουσουλμανικό τέμενος και ακόμα πιο νωρίς Βισηγοθικός ναός που με τη σειρά του είχε χτιστεί -κατά πολλούς- πάνω στον ρωμαϊκό ναό της Αρτέμιδος. Στο ναό φυλάσσεται ένα δισκοπότηρο, που εικάζεται ότι ίσως πρόκειται για το Άγιο Δισκοπότηρο.



Εικόνα 2.2: Χάρτης της πόλης της Βαλένθια

Είναι μοναδικό μνημείο της τοπικής αρχιτεκτονικής όλων των εποχών (εικόνα 2.3), καθώς συνδυάζει καλλιτεχνικούς θησαυρούς από διαφορετικά αρχιτεκτονικά στυλ:

Ρωμανικό, Γοτθικό, γαλλικό Γοτθικό, Αναγεννησιακό Μπαρόκ και Νεοκλασικό. Εάν αναλογιστεί κανείς ότι ο κατασκευαζόταν μέχρι το 1482 και δέχτηκε παρεμβάσεις και αργότερα, κάτι τέτοιο φαντάζει λογικό. Παρόλα αυτά, επικρατεί έντονα το Γοτθικό στοιχείο και ακολουθούν το Ρωμανικό και το Μπαρόκ. Αυτή η μίξη όπως και οι συνεχόμενες αρχιτεκτονικές και καλλιτεχνικές επεμβάσεις πάνω στην αρχική του μορφή, είναι τα πιο σημαντικά στοιχεία στο ναό της Βαλένθια και αυτά που τον κάνουν ιδιαίτερο στην παγκόσμια κληρονομιά (εικόνα 2.4). Στο ναό υπάρχουν τρεις διαφορετικές είσοδοι, που αντιπροσωπεύουν τα κύρια αρχιτεκτονικά του στιλ.



Εικόνα 2.3 : Άποψη του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια- Η πόρτα των Αποστόλων



(α)



(β)

Εικόνα 2.4: (α) Εσωτερική άποψη των εικόνων και σκαλισμάτων του Ναού
(β) Το εσωτερικό ενός θόλου

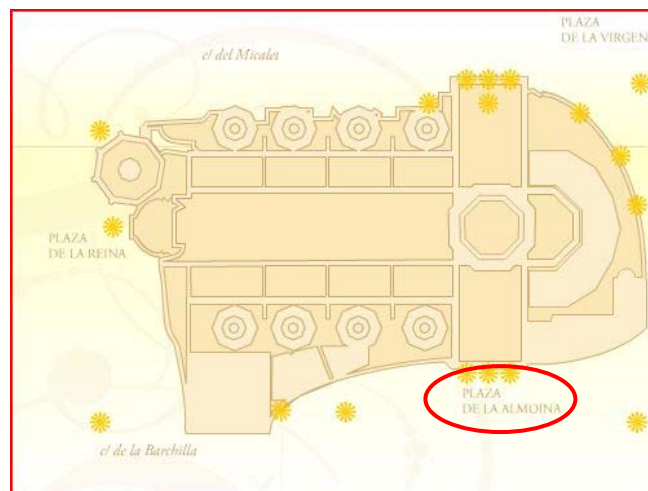
2.3 Puerta Almoina

Η Ρωμανική Πύλη (*Puerta Romanica* ή *Puerta Almoina* ή *Portada del Palau*), είναι η πρώτη χρονολογικά πύλη (ύστερο-ρωμαϊκή περίοδος) του ναού και συνεπώς, είναι εμφανώς επηρεασμένη από την ρωμανική αρχιτεκτονική.



Εικόνα 2.5 : Αεροφωτογραφία του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια

Είναι τοποθετημένη στην νοτιοανατολική πλευρά του ναού (εικόνες 2.5, 2.6) και αποτελεί την έξοδο προς την Πλατεία *Almoina* (*Plaza Almoina*). Η λέξη *Almoina* στην βαλενθιανική διάλεκτο των καταλανικών σημαίνει «ελεημοσύνη» και οφείλεται στο ότι στην πλατεία υπάρχει ένα κτήριο από όπου όπου συνηθιζόταν να δίνονται ελεημοσύνες προς του φτωχούς της περιοχής.



Εικόνα 2.6 : Κάτοψη του Ναού

Πρόκειται για μια επιβλητική πύλη, ύψους 8 και πλάτους 10 μέτρων περίπου. Πάνω από την πύλη, υψώνεται ένα ογκώδες παράθυρο (*Ventana Ojival*) και έτσι, μαζί με τους εξέχοντες τοίχους, η συνολική αρχιτεκτονική κατασκευή ανέρχεται σε 19 μέτρα ύψος και 17 μέτρα σε πλάτος. Αν αναλογιστεί κανείς ότι μόνο το ύψος της ξύλινης εισόδου (εικόνα 2.7) είναι 4,5 μέτρα, αντιλαμβάνεται το μέγεθος της κατασκευής.



Εικόνα 2.7: Η Puerta Almoína

Το κυρίως σώμα της πόρτας εξέχει από τον υπόλοιπο τοίχο, αυξάνοντας έτσι το πάχος του. Αποτελείται από ένα συνδυασμό τόξων και κιονίσκων γεμάτων λεπτομέρειες. Από το πρώτο κιόλας τόξο οι λεπτομέρειες που συναντά το ανθρώπινο μάτι είναι περίτεχνες. Ακολουθούν ακόμα 6 τόξα, καθένα από τα οποία βασίζεται σε έναν κιονίσκο, 6 στην κάθε πλευρά της εισόδου. Στα τόξα τα οποία είναι τοποθετημένα πιο κοντά στην είσοδο απεικονίζονται μορφές αγγέλων και αγίων, ενώ στο εξωτερικό κομμάτι, αντιφατικά, είναι σκαλισμένες μορφές τεράτων (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Λεπτομέρεια στα τόξα επάνω από την είσοδο

Τα κιονόκρανα απεικονίζουν 24 σκηνές από την Βίβλο, τη Γένεση και την Έξοδο, με 2 παραστάσεις σε κάθε ένα από αυτά (εικόνα 2.9).



(α)



(β)

Εικόνα 2.9: Λεπτομέρεια στα δεξιά (α) και αριστερά (β) κιονόκρανα

Λίγο πιο πάνω από τα τόξα που στολίζουν την είσοδο, είναι τοποθετημένα φορούσια, τα λεγόμενα στην ισπανική *Modilliones* (αγγλικά *cantilevers*), με 14 γυναικείες και ανδρικές κεφαλές των πρώτων κατοίκων της περιοχής (ή κατ' άλλους των δωρητών του ναού), με χαραγμένα στην πέτρα τα ονόματα του καθενός από αυτούς (εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.10: Λεπτομέρεια από τα *Modilliones* επάνω από τα τόξα

Γύρω από το παράθυρο (εικόνα 2.11), στο ίδιο μοτίβο με την πύλη, υπάρχουν τρεις κίονες (των οποίων ο ρυθμός προσομοιάζει τον κορινθιακό) στους οποίους στηρίζονται ισάριθμα τόξα. Στο τζάμι του παραθύρου απεικονίζονται τα πρόσωπα που απεικονίζονται και πάνω από την πύλη. Στο υψηλότερο σημείο του τοίχου, επάνω από το παράθυρο υπάρχουν δεκαεπτά σκαλιστά φορούσια, τοποθετημένα κατά τον ίδιο τρόπο με τις κεφαλές επάνω από την είσοδο (εικόνα 2.12). Αριστερά και δεξιά του παραθύρου σχηματίζονται δύο σκαλιστά, που χρησίμευαν ως υδρορροές. Επιπλέον, λίγο χαμηλότερα από την δεξιά υδρορροή υπάρχει μια ακόμα, πιο περίτεχνη που απεικονίζει μια γυναικεία μορφή (εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.11: Το παράθυρο Οjίναλ στο επάνω μέρος της πύλης



Εικόνα 2.12: Τα φουρούσια επάνω από το παράθυρο



Εικόνα 2.13: Οι υδρορροές

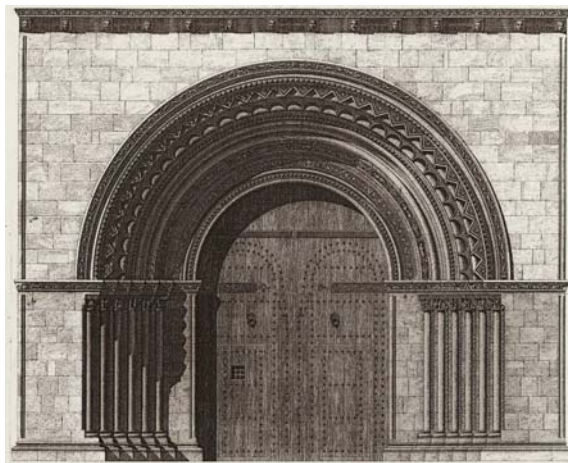
Στο τέλος του 18^{ου} αιώνα, έγινε μια προσπάθεια ανακατασκευής του ναού, με στόχο να δοθεί σε όλο το κτίσμα μια ενιαία νεοκλασική εμφάνιση. Έτσι όμως, καλύφθηκαν πολλά μέρη της γοθικής κατασκευής, αλλοιώνοντας τον αυθεντικό του χαρακτήρα.

Όπως πολλά άλλα μνημεία στον κόσμο, έτσι και καθεδρικός ναός της Βαλένθια, δεν απέφυγε την μανία του πολέμου και κατά την διάρκεια του αποτρόπαιου Ισπανικού Εμφυλίου Πολέμου (1936-1939) κήκε, χάνοντας πολλά από τα διακοσμητικά του

στοιχεία, παρόλο που είχε ανακηρυχθεί ιστορικό και καλλιτεχνικό ορόσημο από την ισπανική κυβέρνηση.

Την δεκαετία του 1970 έγινε μια προσπάθεια να απομακρυνθούν τα νεοκλασσικά στοιχεία, ώστε να αποκαλυφθούν τα αυθεντικά μέρη του κτίσματος. Μετά από πολλές επεμβάσεις, ο ναός βρίσκεται τώρα σε καλή κατάσταση. Ανακηρύχθηκε δε για ακόμη μια φορά πολιτισμικό ορόσημο, αυτή τη φορά από την Περιφέρεια της Βαλένθια (*Consell de la Generalitat Valenciana*).

Περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν στην επίσημη ιστοσελίδα του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια².



Εικόνα 2.14: Χαλκογραφία της Πύλης

² <http://www.catedraldevalencia.es>

3 Συλλογή των Δεδομένων

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται όλες οι διαδικασίες συλλογής των απαραίτητων δεδομένων για την πλήρη αποτύπωση ενός σύνθετου αρχιτεκτονικά αντικειμένου με μεθόδους σάρωσης με χρήση επίγειων σαρωτών *laser* συνδυαστικά με κλασικές φωτογραμμετρικές μεθόδους.

Αντικείμενο μελέτης στη συγκεκριμένη περίπτωση απετέλεσε η Ρωμανική Πύλη του Καθεδρικού Ναού της Βαλένθια, που όπως ειπώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί ένα ιδιαίτερα περίπλοκο και ογκώδες αντικείμενο. Πραγματοποιήθηκαν τόσο τοπογραφικές μετρήσεις, όσο και μετρήσεις με επίγειο σαρωτή *laser* αλλά και λήψεις των απαραίτητων για τη φωτογραμμετρική επεξεργασία φωτογραφιών. Ο κύριος σκοπός ήταν να συλλεχθούν πυκνά νέφη σημείων, ώστε να καταγραφούν όλες οι λεπτομέρειες του πολύπλοκου αυτού αντικειμένου.

3.2 Διαθέσιμος Εξοπλισμός

3.2.1 Τοπογραφικός εξοπλισμός

Οι μετρήσεις έγιναν με τον ολοκληρωμένο γεωδαιτικό σταθμό (*total station*) *Topcon GPT-7003i* (εικόνα 3.1), με δυνατότητα μέτρησης απόστασης χωρίς ανακλαστήρα, αλλά και καταγραφής μέσω ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής των σκοπευόμενων σημείων.



Εικόνα 3.1: *Topcon GPT-7003i*

Τα λοιπά τεχνικά χαρακτηριστικά του σταθμού φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ακρίβεια μέτρησης γωνιών	10 cc
Ελάχιστη ανάγνωση	2 cc
Ακρίβεια μέτρησης απόστασης	$\pm 3\text{mm} \pm 2\text{ppm}$

Εμβέλεια μέτρησης	3000m με πρίσμα 250m χωρίς πρίσμα
Χρόνος μέτρησης	<2 sec

Πίνακας 3.1 : Χαρακτηριστικά Γεωδαιτικού Σταθμού

Ο ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στη *Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ*.

3.2.2 Σαρωτής

Χρησιμοποιήθηκε ο επίγειος σαρωτής *laser ScanStation2* (εικόνα 3.2) της εταιρείας *Leica*, ο οποίος ανήκει στην *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica* του *Universidad Politécnica de Valencia*.



Εικόνα 3.2: Leica ScanStation2

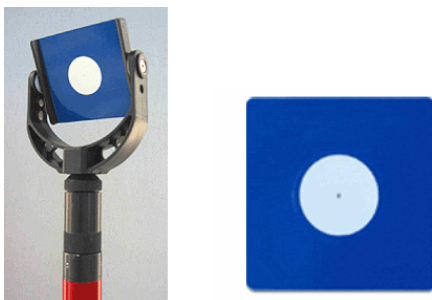
Πρόκειται για ένα σαρωτή παλμού (*time of flight*) με μεγάλο βεληνεκές που μπορεί να φτάσει και τα 300 m από το αντικείμενο αλλά περιορισμένης ακρίβειας της τάξης των μερικών χιλιοστών. Ενδεικτικά, δίνεται το μέγεθος της ακτίνας *laser* μπορεί να φτάσει τα 6 mm σε απόσταση 50 m από το αντικείμενο. Το πεδίο όρασης του σαρωτή είναι 360° x 270°.

System Performance	
Accuracy of single measurement	
Position*	6 mm
Distance*	4 mm
Angle (horizontal/vertical)	60 μrad/60 μrad, one sigma
Modeled surface	
precision**/noise	2 mm, one sigma
Target	
acquisition***	2 mm std. deviation
Dual-axis	
compensator	Selectable on/off Resolution 1", dynamic range +/- 5'
Data integrity	
monitoring	Periodic self-check during operation and startup

Εικόνα 3.3: Χαρακτηριστικά Σαρωτή

Οι προδιαγραφές του αναφέρουν ότι μπορεί να καταγράψει μέχρι και 50.000 σημεία το δευτερόλεπτο, ωστόσο αυτό εξαρτάται από την πυκνότητα σάρωσης και το πεδίο όρασης. Επίσης, διαθέτει ψηφιακή φωτογραφική μηχανή (*video camera*) *CCD* σχετικά χαμηλής ανάλυσης. Όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή όπως καθορίζονται από τις προδιαγραφές του υπάρχουν στην ιστοσελίδα της κατασκευάστριας εταιρείας³.

Κατά την διάρκεια των σαρώσεων χρησιμοποιήθηκαν 5 στόχοι από ειδικό υλικό υψηλής ανακλαστικότητας *HDS Leica*, 2 εκ των οποίων ήταν τοποθετημένοι σε βαθράκια με δυνατότητα περιστροφής.



Εικόνα 3.4: Στόχοι HDS

3.2.3 Φωτογραφικές μηχανές

- Η λήψη των απαιτούμενων φωτογραφιών για την φωτογραμμετρική επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με την *DSLR CANON 1Ds Mark III*. Πρόκειται για ψηφιακή μηχανή υψηλής ανάλυσης με αισθητήρα τεχνολογίας *CCD* 21 MPixel (*full frame* 36 * 24 mm) και *pixel size* 6.41 μm. Τα στοιχεία της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής ήταν γνωστά.



Εικόνα 3.5: CANON 1Ds Mark III

Αναλυτικά, τα χαρακτηριστικά της μηχανής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

³ http://www.leica-geosystems.com/downloads123/hds/hds/ScanStation/brochures/LeicaScanStation%20brochure_en.pdf

Sensor	<ul style="list-style-type: none">• 21.1 million effective pixels• 6.4 μm pixel pitch
Image processor	Dual DIGIC III
A/D converter	14-bit
Image sizes	<ul style="list-style-type: none">• 5616 x 3744• 4992 x 3328• 4080 x 2720• 2784 x 1856
RAW files	<ul style="list-style-type: none">• CR2 format, 14-bit• RAW full resolution• sRAW (5.2 MP)
Dust reduction	High speed vibration of filter
Auto focus	<ul style="list-style-type: none">• 45-point TTL CMOS sensor• 19 cross-type for F2.8 or faster lens
AF adjustment	Yes
Metering	63-zone linked to AF points
Shutter	300,000 exposure durability
Noise reduction	Optional High ISO
White balance	Up to five personal WB presets

Εικόνα 3.6: Οι τεχνικές προδιαγραφές της Canon 1Ds Mark III

Πηγή: www.dpreview.com

Ο φακός που προσαρτήθηκε στη μηχανή είχε εστιακή απόσταση 50 mm (της εταιρείας *Sigma*).

Ως φωτοσταθερά χρησιμοποιήθηκαν οι ήδη τοποθετημένοι στόχοι του σαρωτή.

- Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η μηχανή *Canon PowerShot G11* 10 MPixel (*pixel size* περίπου 0.002 m) για την λήψη φωτογραφιών που θα χρησιμοποιηθούν στη φωτορεαλιστική επένδυση του τρισδιάστατου μοντέλου.



Εικόνα 3.7: Canon PowerShot G11

Ο πίνακας που ακολουθεί περιγράφει τα τεχνικά χαρακτηριστικά και αυτής της μηχανής.

Sensor*	<ul style="list-style-type: none"> • 1/1.7" Type CCD • 10 million effective pixels*
Image sizes*	<ul style="list-style-type: none"> • 3648 x 2736 • 3648 x 2048 • 2816 x 2112 • 2272 x 1704 • 1600 x 1200 • 640 x 480 • 320 x 240
Movie clips	<ul style="list-style-type: none"> • 640 x 480 @ 30fps • 320 x 240 @ 30fps
Maximum clip length	Up to 4GB or 1 hour
File formats	<ul style="list-style-type: none"> • Still: JPEG (Exif v2.2) • RAW • Movie: MOV [H.264 + Linear PCM (monaural)]
Lens	<ul style="list-style-type: none"> • 28-140mm (35mm equiv) • f = 6.1 - 30.5 mm • 5x optical zoom • F2.8-4.5 • Construction: 11 elements in 9 groups (1 double-sided aspherical element)
Image stabilization	Yes (Lens-Shift)
Conversion lenses	Yes
Digital zoom	up to 4x
Focus	<ul style="list-style-type: none"> • Auto focus :TTL - Face Detection / 9-point AiAF - 1-point AF (center or Face Select and Track) - Fixed centre or Face Select and Track • Manual focus

Εικόνα 3.8: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της Canon PowerShot G11

Πηγή: www.dpreview.com

3.3 Εργασίες Πεδίου

3.3.1 Αναγνώριση της περιοχής μελέτης

Η αναγνώριση του προς αποτύπωση αντικειμένου και του περιβάλλοντα χώρου είναι μια διαδικασία που δεν πρέπει να παραλείπεται και να γίνεται όσο το δυνατόν νωρίτερα από τις μετρήσεις, καθώς έτσι δίνεται η δυνατότητα στο συνεργείο να τις προγραμματίσει με τον καλύτερο και οικονομικότερο δυνατό τρόπο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ιδιαιτερότητες κάθε αντικειμένου.

Η πρώτη αναγνώριση της περιοχής έγινε εβδομάδες πριν την έναρξη των εργασιών και περιελάμβανε την πρώτη επαφή με το αντικείμενο και την γύρω περιοχή. Λήφθηκαν τεκμηριωτικές φωτογραφίες γενικά για όλο το αντικείμενο αλλά και ειδικότερα για τις λεπτομέρειές του.

Ακολούθησε ο προγραμματισμός των λήψεων, των μετρήσεων και των σαρώσεων.

3.3.2 Προγραμματισμός εργασιών

- Λήψεων: Αρχικά επιλέχθηκε ο φακός που θα χρησιμοποιηθεί (50 mm). Κατόπιν, έγινε ο ακόλουθος προγραμματισμός λήψεων:

Canon 1Ds Mark III

f (m)	0,05			
format (m)	0,036		0,024	
επικάλυψη	80%			

τιμήμα του αντικειμένου που καλύπτει η				
απόσταση λήψης	κλίμακα	φωτογραφία (από format)		βάση λήψης
H (m)	k	m1 (m)	m2 (m)	B (m)
5	100	3,6	2,4	0,72
6,25	125	4,5	3	0,9
7,5	150	5,4	3,6	1,08
8,75	175	6,3	4,2	1,26
10	200	7,2	4,8	1,44
11,25	225	8,1	5,4	1,62
12,5	250	9	6	1,8

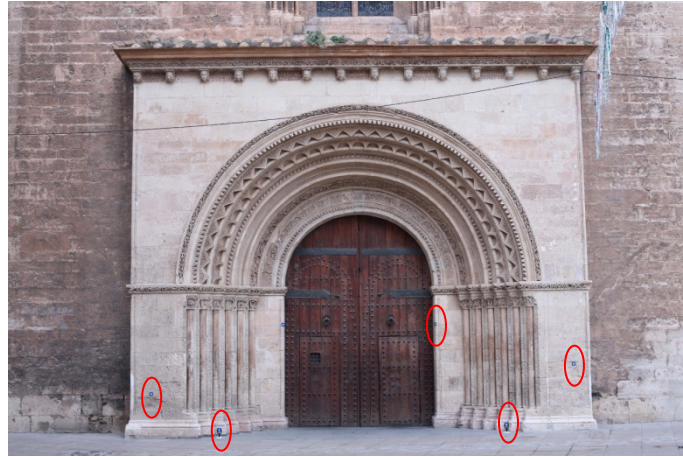
Πίνακας 3.2: Ο προγραμματισμός των λήψεων

- Τοπογραφικών μετρήσεων: Το προς αποτύπωση αντικείμενο και το ανάγλυφο της περιοχής δεν απαιτούσε την ίδρυση πολυγωνομετρικού δικτύου. Έτσι, όλες οι απαραίτητες μετρήσεις λήφθηκαν από μια στάση οργάνου.
- Σαρώσεων: Σύμφωνα με το είδος, το μέγεθος και τα λοιπά χαρακτηριστικά του αντικειμένου, η πυκνότητα σάρωσης ορίστηκε 5 mm. Επειδή πρόκειται για μια όψη (αν και περίπλοκη) και όχι για κάποιο αντικείμενο που έπρεπε να σαρωθεί περιμετρικά (όπως π.χ ένα άγαλμα) θεωρήθηκε ότι 5 στάσεις του σαρωτή καλύπτουν πλήρως το προς σάρωση αντικείμενο.

3.3.3 Τοποθέτηση στόχων

Για να είναι δυνατή η συνένωση των νεφών μέσω των στόχων (*indirect target-to-target registration*) [Lerma et al, 2008] τοποθετήθηκαν 5 *Leica HDS* στόχοι (εικόνα 3.9). Οι στόχοι τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να έχουν την καλύτερη δυνατή κατανομή πάνω στο αντικείμενο, αλλά και σε βαθράκια κοντά σε αυτό. Παρόλα αυτά, λόγω του μεγάλου ύψους του μνημείου ήταν αδύνατο να τοποθετηθούν στόχοι στα ψηλότερα σημεία.

Οι στόχοι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν και ως φωτοσταθερά.



Εικόνα 3.9: Οι θέσεις των στόχων

3.3.4 Λήψεις

Με την *CANON IDS Mark III* λήφθηκαν πολλές φωτογραφίες από ποικίλλες αποστάσεις και υπό διάφορες γωνίες λήψεις, χωρίς να ακολουθείται απαραίτητα ο προγραμματισμός. Αρχικά, λήφθηκε μια σειρά από μακρινές φωτογραφίες (απόσταση λήψης περίπου 18 m και βάση λήψης περίπου 4 m) και στη συνέχεια πιο κοντινές (απόσταση λήψης περίπου 3 μέτρα).

Οι φωτογραφίες που λήφθηκαν για το κατώτερο τμήμα της Πύλης είχαν ικανοποιητική επικάλυψη και μικρές στροφές. Αντίθετα, για το άνω τμήμα (παράθυρο) οι φωτογραφίες είχαν μεγάλες στροφές και όχι αρκετή επικάλυψη. Αυτό συνέβη επειδή λήφθηκαν φωτογραφίες μόνο από το επίπεδο του εδάφους αφού ήταν πρακτικά αδύνατο με τις δεδομένες συνθήκες να χρησιμοποιηθεί ανυψωτικός μηχανισμός και δεν υπήρχε πρόσβαση σε κάποιο από τα γειτονικά κτήρια. Επίσης, λόγω των δύσκολων συνθηκών υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες υπαίθρου, δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν φωτογραφίες σε ομοιόμορφες συνθήκες φωτισμού.

Οι φωτογραφίες με την *Canon PowerShot G11*, λήφθηκαν με κύριο σκοπό να επενδύσουν το τρισδιάστατο μοντέλο που θα δημιουργηθεί, και όχι τόσο τον φωτογραμμετρικό προσανατολισμό τους. Έτσι δεν δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις γωνίες λήψης, ούτε υπάρχει συγκεκριμένη επικάλυψη μεταξύ τους. Πρόκειται κυρίως για κοντινές λήψεις. Η ραδιομετρία τους, ωστόσο, είναι παρόμοια, καθώς λήφθηκαν σε σχετικά ομοιόμορφες συνθήκες φωτισμού, εβδομάδες μετά τις υπόλοιπες μετρήσεις.

3.3.5 Τοπογραφικές μετρήσεις

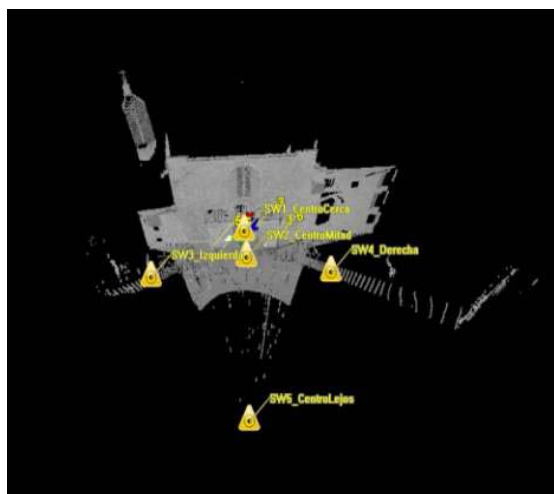
Όπως είχε καθοριστεί από τον προγραμματισμό, ο σταθμός στήθηκε σε μια στάση σε απόσταση περίπου 18 μέτρα από το αντικείμενο και από αυτήν μετρήθηκαν περίπου 60 σημεία λεπτομερειών (χαρακτηριστικά) όπως εσοχές πετρών κτλ. Κατά τη

διάρκεια των μετρήσεων σχεδιάστηκε και το αυτοσχέδιο υπαίθρου. Δεν κατέστη δυνατόν να ληφθούν από τον γεωδαιτικό σταθμό και εικόνες των σκοπευόμενων σημείων λεπτομερειών, γεγονός που θα βοηθούσε πολύ στην μετέπειτα επεξεργασία.

Ταυτόχρονα μετρήθηκαν και οι 5 στόχοι *HDS*. Στον στόχο T5 έγινε και ο μηδενισμός του οργάνου.

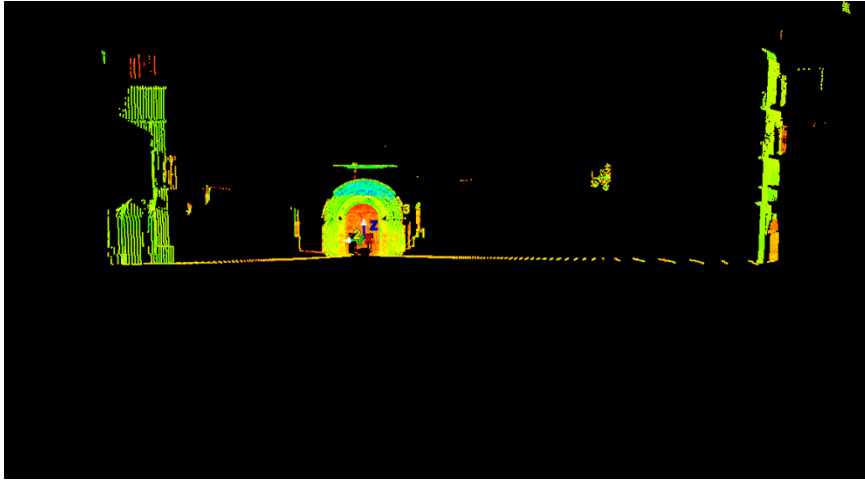
3.3.6 Σαρώσεις

Όπως είχε προσχεδιαστεί στον προγραμματισμό των σαρώσεων, η σάρωση του αντικειμένου έγινε από 5 διαφορετικές θέσεις του σαρωτή. Η κάθε σάρωση με την προηγούμενη και την επόμενη της είχε 3 με 5 κοινούς στόχους, για να είναι δυνατή η συνένωση των νεφών [Kraus, 2004]. Η επικάλυψη των τεσσάρων σαρώσεων θεωρείται ότι ήταν περίπου 60% ή και περισσότερο (εικόνα 3.10), ενώ μια σάρωση (*centrocerca*) πραγματοποιήθηκε από πολύ κοντινή στο αντικείμενο θέση σαρωτή με αποτέλεσμα να έχει πολύ μικρότερη επικάλυψη με τις άλλες.

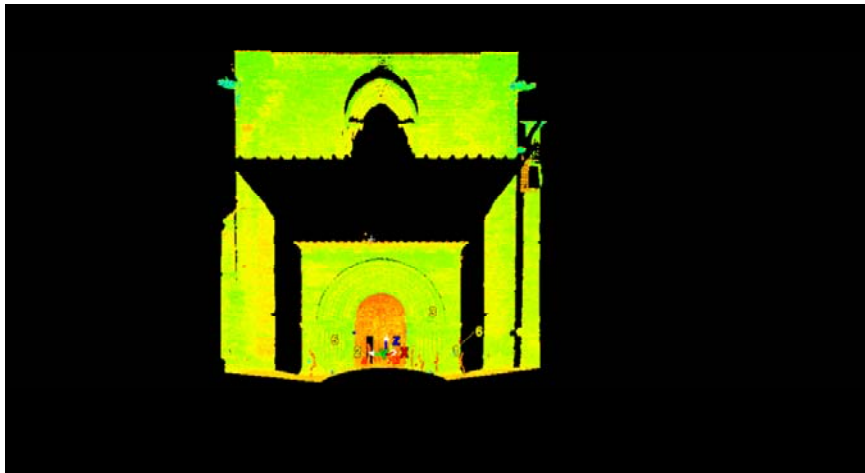


Εικόνα 3.10: Οι 5 θέσεις σαρωτή (Cyclone Truespace)

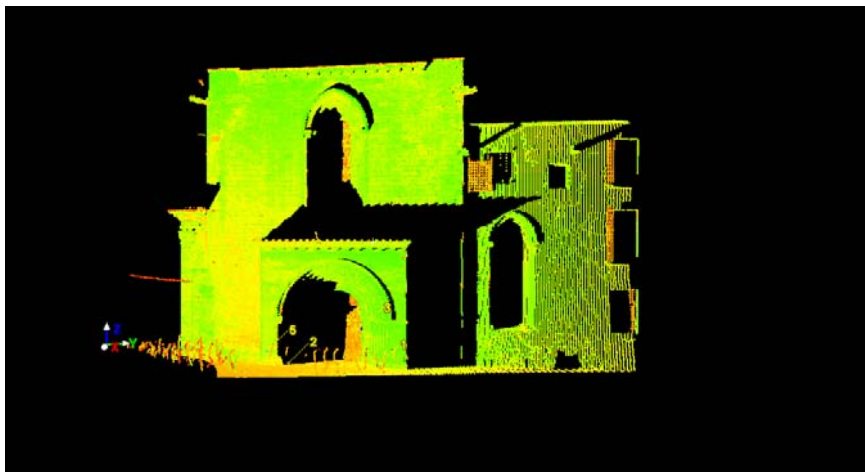
Πριν την έναρξη των μετρήσεων, είναι απαραίτητη η εισαγωγή κάποιων παραμέτρων που καθορίζουν κάθε φορά την σάρωση, όπως η απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο ή η ανάλυση (βήμα) σάρωσης. Η εισαγωγή των παραμέτρων αυτών γίνεται μέσω του φορητού υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο σαρωτής και στον οποίο είναι εγκατεστημένο το συμβατό λογισμικό *Cyclone* της εταιρείας *Leica*. Η απόσταση του αντικειμένου από τον σαρωτή διαφέρει κάθε φορά. Συνεπώς, για κάθε σάρωση, δόθηκε διαφορετική τιμή στη συγκεκριμένη παράμετρο. Ωστόσο, η ανάλυση σάρωσης (*scanning resolution*) για όλες τις σαρώσεις ήταν κοινή στα 5 mm, όπως αναφέρθηκε και στον προγραμματισμό [Stathoroulou et al, 2010]. Στις παρακάτω εικόνες τα νέφη σημείων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των 5 σαρώσεων.



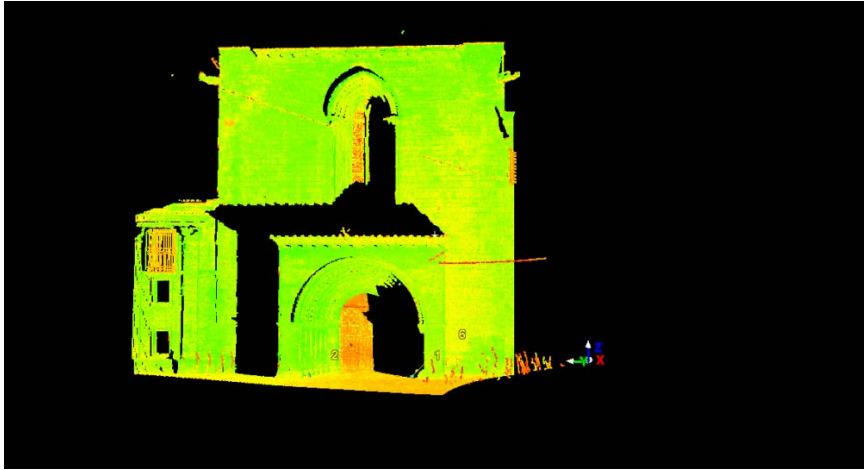
Εικόνα 3.11: Η πρώτη σάρωση (centrocerca)



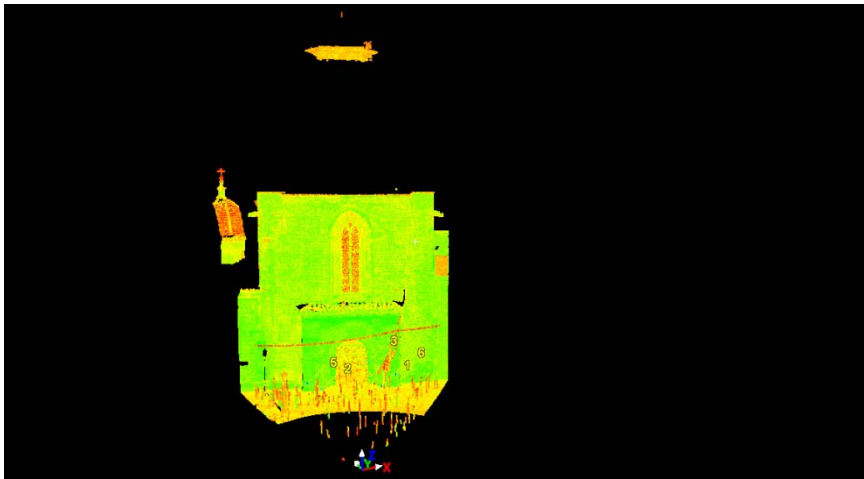
Εικόνα 3.12: Η δεύτερη σάρωση (centromitad)



Εικόνα 3.13: Η τρίτη σάρωση (izquierda)

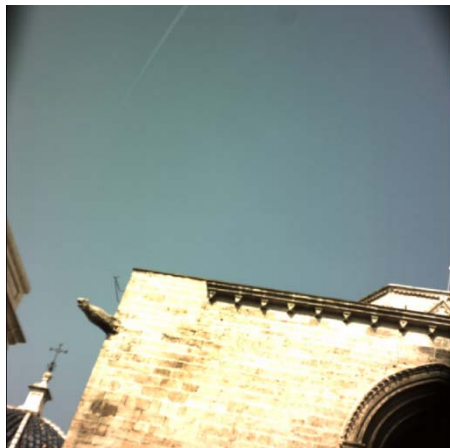


Εικόνα 3.14: Η τέταρτη σάρωση (derecha)



Εικόνα 3.15: Η πέμπτη σάρωση (centrolejos)

Πριν τις σαρώσεις, λαμβάνονται αυτομάτως ορισμένες φωτογραφίες χαμηλής ανάλυσης με την κάμερα CCD του σαρωτή (εικόνα 3.16).



Εικόνα 3.16: Φωτογραφία με την κάμερα του σαρωτή

3.3.7 Διάρκεια Μετρήσεων

Οι εργασίες πεδίου διήρκησαν συνολικά περίπου 10 ώρες και πραγματοποιήθηκαν όλες την ίδια μέρα, εκτός από τις λήψεις με την *Canon PowerShot G11*, που έγιναν μερικές εβδομάδες αργότερα.

- Οι μετρήσεις με τον γεωδαιτικό σταθμό δεν ήταν καθόλου χρονοβόρες, καθώς αυτά τα σημεία μετρήθηκαν από μια και μόνο στάση οργάνου.

- Οι λήψεις των φωτογραφιών χρειάστηκαν αρκετό χρόνο, καθώς λήφθηκαν αρκετές φωτογραφίες με διαφορες επικαλύψεις και γωνίες και με διαφορετικές συνθήκες φωτισμού ώστε να υπάρξει πλεόνασμα.

- Οι σαρώσεις απαιτούν γενικά πολύ μεγάλο χρόνο εργασιών, ειδικότερα όταν η πυκνότητα σάρωσης είναι μεγάλη. Κατά μέσο όρο κάθε σάρωση διήρκησε περίπου μία ώρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, εκτός από την μεγάλη πυκνότητα σάρωσης, υπήρχε και μεγάλη επικάλυψη μεταξύ των σαρώσεων.

3.3.8 Όγκος δεδομένων

Με την μέθοδο της σάρωσης, επιτυγχάνεται η πολύ αναλυτική περιγραφή της προς σάρωση επιφανείας. Αυτή η πληροφορία καταλαμβάνει έναν καθόλου ευκαταφρόνητο όγκο στα συλλεχθέντα δεδομένα. Επίσης, οι φωτογραφίες που λαμβάνονται αποτελούν μεγάλα σε όγκο αρχεία, ιδιαίτερα εάν η φωτογραφική μηχανή είναι υψηλής ανάλυσης.

- Σε αυτή την περίπτωση μετρήθηκαν περίπου 6.500.000 σημεία, καταλαμβάνοντας όγκο περίπου 500 MB σε μορφή αρχείου *.imp* (η μορφή αρχείου που προκύπτει *default* από την σάρωση με αυτόν τον σαρωτή).

- Οι φωτογραφίες που λήφθηκαν αποτελούν και αυτές μεγάλα σε όγκο αρχεία, λόγω της μεγάλης ανάλυσής τους. Λήφθηκαν περίπου 170 φωτογραφίες με την *Canon Mark III* και 75 με την *Canon PowerShot G11*. Συνολικά όλες οι λήψεις και με τις δύο μηχανές ξεπερνούν τα 7 GB.

- Τα δεδομένα από τον γεωδαιτικό σταθμό ήταν πολύ μικρά σε όγκο.

4 Δημιουργία Τρισδιάστατου μοντέλου

4.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με επίγειο σαρωτή *laser*, συλλέγεται τεράστιος όγκος δεδομένων (σημείων), τα οποία όμως για να είναι αξιοποιήσιμα θα πρέπει να υποστούν ειδική επεξεργασία. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου, το οποίο θα περιγράφει με σαφή και ορθό τρόπο την επιφάνεια και θα μπορεί κατόπιν να χρησιμοποιηθεί σε περαιτέρω εφαρμογές. Η επεξεργασία τέτοιου είδους δεδομένων είναι αρκετά χρονοβόρα και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή σε όλα της τα στάδια, ώστε το αποτέλεσμα να είναι το καλύτερο δυνατό σε συγκεκριμένο χρόνο και με τα διατιθέμενα λογισμικά.

Τα στάδια επεξεργασίας συνοψίζονται στα παρακάτω:

	ΣΤΑΔΙΟ
1	Συνένωση Νεφών
2	Καθάρισμα – Οργάνωση-κατάτμηση - Φιλτράρισμα των νεφών
3	Από το νέφος σημείων στην επιφάνεια – μοντελοποίηση
4	Εξομάλυνση της επιφανείας
5	Διόρθωση της επιφανείας
6	Μείωση του όγκου των δεδομένων
7	Έλεγχος της επιφανείας

Πίνακας 4.1: Τα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέχθηκαν με τον σαρωτή

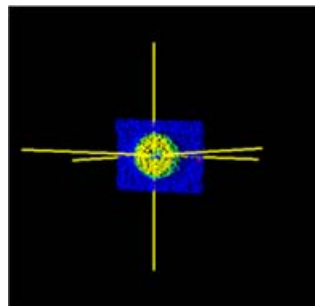
4.2 Συνένωση Νεφών

Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, ο σαρωτής υπολογίζει τις συντεταγμένες των σημείων στο χώρο με βάση την απόστασή τους από αυτόν. Οι συντεταγμένες αυτές υπολογίζονται στο τρισσορθογώνιο σύστημα του σαρωτή σε εκείνη τη θέση. Για να σαρωθεί πλήρως ένα αντικείμενο, συνήθως χρειάζονται περισσότερες από μια σαρώσεις από διαφορετικές, περιμετρικές θέσεις. Οπότε, τα πρωτογενή δεδομένα που

συλλέγει ο σαρωτής (νέφη σημείων σε μορφή αρχείων *.imp*) βρίσκονται σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς. Για να είναι αξιοποιήσιμα τα δεδομένα, θα πρέπει να συνενωθούν σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς.

Η συνένωση (*alignment* ή *cloud registration*) είναι ουσιαστικά μια συνόρθωση μεταξύ των ανεξάρτητων νεφών σημείων η οποία πραγματοποιείται με τουλάχιστον 3 ομόλογα σημεία μεταξύ των νεφών. Ο αριθμός των τριών απαραίτητων σημείων προκύπτει από το γεγονός ότι άγνωστοι σε κάθε συνένωση είναι 3 στροφές και 3 μεταθέσεις στο χώρο (δεδομένου ότι οι σαρωτές *time of flight* υπολογίζουν την απόσταση με βάση το χρόνο μετάδοσης και επιστροφής της ακτίνας, οπότε η κλίμακα είναι γνωστή και ίση με τη μονάδα). Συνεπώς, είναι απαραίτητα ένα πλήρες σημείο (X, Y, Z) για τον προσδιορισμό των μεταθέσεων και 3 υψομετρικά σημεία για τον προσδιορισμό των στροφών στο χώρο. Επειδή όμως στις εφαρμογές των σαρωτών *laser* δεν έχει νόημα να γίνεται λόγος για υψομετρικά και μόνο σημεία (αφού όλα τα σημεία σαρώνονται τρισδιάστατα), τελικώς είναι αναγκαία για τη συνένωση 3 σημεία.

Η διαδικασία αυτή γίνεται σε ειδικά λογισμικά πακέτα, συμβατά με τον σαρωτή που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Συνήθως, και για καλύτερα αποτελέσματα, ως ομόλογα σημεία χρησιμοποιούνται οι στόχοι υψηλής ανακλαστικότητας που συνοδεύουν τον σαρωτή. Η επίλυση με χρήση των στόχων δίνει καλύτερα αποτελέσματα διότι αυτοί ανιχνεύονται με πολύ καλύτερη ακρίβεια απ' ό,τι τα υπόλοιπα σημεία. Ως ομόλογο σημείο λαμβάνεται το κέντρο του στόχου (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Σαρωμένος HDS στόχος

Παρ'όλα αυτά, είναι δυνατόν να υπάρξουν περιπτώσεις που δεν μπορεί να τοποθετηθεί στόχος επάνω στο αντικείμενο (απροσπέλαστο, κίνδυνος φθοράς κτλ). Ακόμα όμως και τότε, η συνένωση μπορεί να γίνει, χρησιμοποιώντας χαρακτηριστικά σημεία ως ομόλογα. Πειραματικά, έχει αποδειχθεί ότι η συνένωση με αυτήν την μέθοδο δεν δίνει τόσο μεγάλη ακρίβεια, λόγω του ότι είναι δύσκολο να εντοπιστεί με αξιοπιστία το ίδιο σημείο σε διαφορετικές σαρώσεις και αυτό να επιφέρει χονδροειδές σφάλμα στη συνόρθωση. Επίσης, όπως ειπώθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο (§ 1.2), επειδή η συλλογή των σημείων από τον σαρωτή είναι τυχαία, είναι πιθανό ένα σημείο μιας σάρωσης να μην υπάρχει σε κάποια άλλη.

Η συνένωση μπορεί να είναι σχετική, δηλαδή τα νέφη να συνενωθούν μεταξύ τους στο σύστημα αναφοράς που είχε ο σαρωτής σε μια θέση ή και απόλυτη, δηλαδή σε κάποιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (συνήθως τοπικό), σε περίπτωση που 3 τουλάχιστον σημεία είναι μετρημένα γεωδαιτικά.

Τα λογισμικά δίνουν την δυνατότητα, ύστερα από την πρώτη συνένωση με τα ομόλογα σημεία που επιλέγονται από τον χρήστη, μιας περαιτέρω συνένωσης, όλων των σημείων με τα ομόλογά τους, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο *ICP* [Ιωαννίδης, 2008].

Μια νέα γενιά σαρωτών, δίνει την δυνατότητα άμεσης συνένωσης των νεφών κατά την διάρκεια των εργασιών στο πεδίο (*auto-registration*) που -ίσως- διευκολύνει και αυτοματοποιήσει περισσότερο αυτή την διαδικασία, μειώνοντας το χρόνο επεξεργασίας. Παράδειγμα τέτοιου σαρωτή είναι ο *Focus^{3D}* της εταιρείας *FARO⁴*.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο *Cyclone* της εταιρείας *Leica*. Το λογισμικό αυτό είναι συμβατό με τον σαρωτή *ScanStation2* που χρησιμοποιήθηκε και στο περιβάλλον του γίνονται και οι ρυθμίσεις κατά τη διάρκεια της σάρωσης. Από τις 5 θέσεις του σαρωτή προέκυψαν 5 ανεξάρτητα νέφη σημείων (όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο), τα οποία ενώθηκαν αρχικά σχετικά μεταξύ τους σε ενιαίο σχετικό σύστημα αναφοράς. Το σχετικό αυτό σύστημα αναφοράς μπορεί να είναι το σύστημα του σαρωτή σε οποιαδήποτε από τις 5 θέσεις σαρώσεων (εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Το συνενωμένο νέφος και οι 5 θέσεις του σαρωτή (*Cyclone Truespace*)

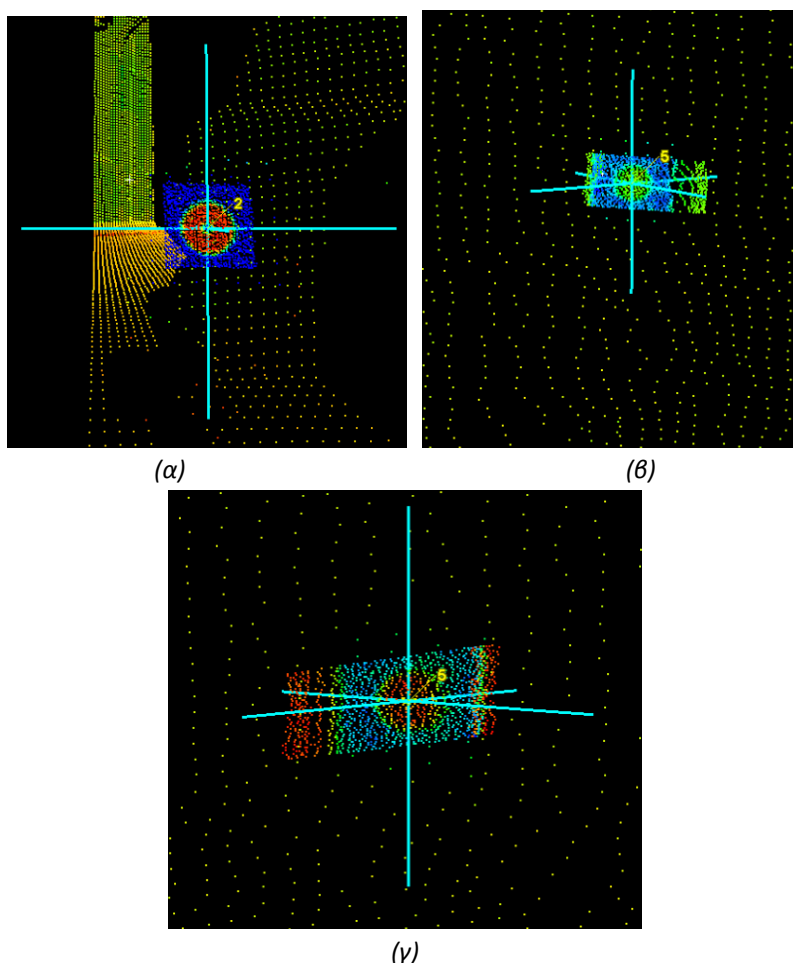
Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMS*) αυτής της σχετικής συνόρθωσης ήταν 0.001m.

Ένας από τους στόχους (T5) αποκλείστηκε της διαδικασίας της συνόρθωσης, καθώς επηρέαζε αρνητικά την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Ο στόχος είχε σαρωθεί από 3 θέσεις σαρωτή, στις δυο εκ των οποίων δεν είχε σαρωθεί σωστά (λόγω γωνίας

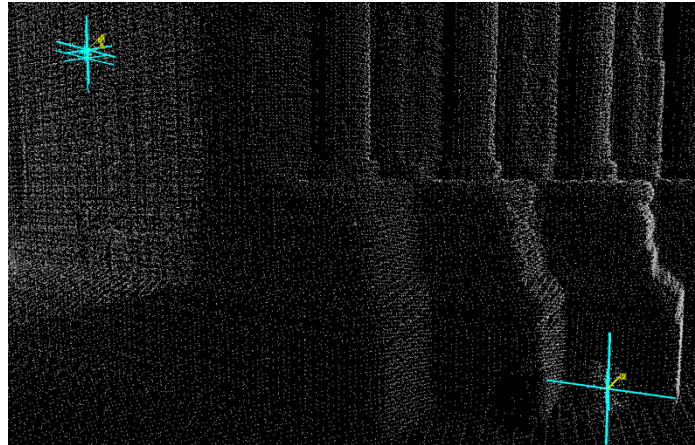
http://www.faro.com/focus/uk?int_cid=but_uk_f3d⁴

σάρωσης) (εικόνα 4.3). Το σφάλμα υπολογισμού του ήταν περίπου 2 cm και η επίλυση στην οποία συμπεριλαμβανόταν είχε RMS 0.004 m. Ο αποκλεισμός αυτός δε δημιούργησε προβλήματα στην επίλυση, καθώς μεταξύ των σαρώσεων υπήρχαν περισσότεροι από τρεις κοινοί στόχοι. Στην εικόνα 4.4 φαίνονται οι στόχοι T2 (σωστά σαρωμένος) και T5. Η μικρή τιμή του σφάλματος στην συνόρθωση (0.001 m) δικαιολογείται από το γεγονός ότι οι πλεονάζουσες παρατηρήσεις ήταν οι ελάχιστες δυνατές (4 σημεία).

Προτιμήθηκε να μην γίνει επιπλέον συνόρθωση με χρήση του *ICP*, καθώς με αυτόν τον τρόπο αυξανόταν το RMS στα 0.002 m.



Εικόνα 4.3: (α) Σωστά σαρωμένος στόχος
(β), (γ) Η σάρωση του στόχου 5 από 2 θέσεις σαρωτή



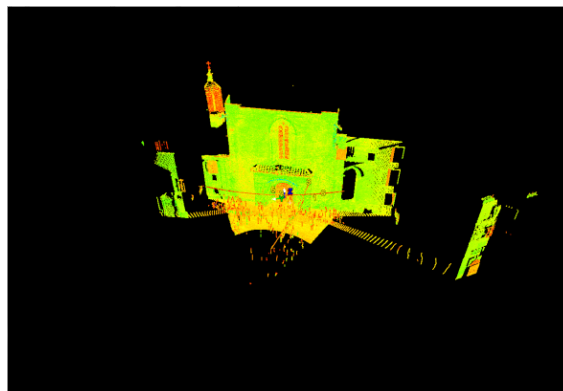
Εικόνα 4.4: Οι στόχοι T2 και T5 μετά την σχετική συνόρθωση

Κατόπιν, το συνολικό νέφος σημείων αναφέρθηκε στο τοπικό σύστημα αναφοράς που είχε ιδρυθεί. Το *RMS* της συνόρθωσης ήταν 0.005 m, αλλά αποκλείστηκε και πάλι ο στόχος T5 με συνεπεία το τελικό *RMS* να ισούται με 0,003 m.

Στο παράρτημα φαίνονται τα αποτελέσματα της συνόρθωσης, της σχετικής και της απόλυτης, όπως προέκυψαν από το λογισμικό.

4.3 Καθάρισμα – Οργάνωση-κατάτμηση - Φιλτράρισμα των νεφών

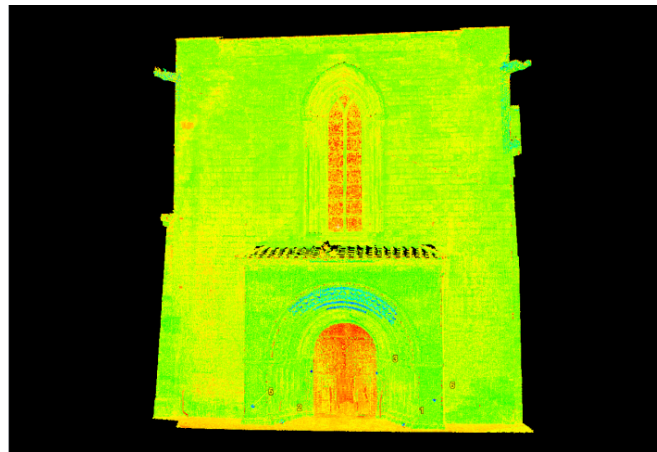
Κατά τη διάρκεια της σάρωσης συλλέγονται πολύ περισσότερα σημεία απ' όσα στην πραγματικότητα χρειάζονται (εικόνα 4.5), δημιουργώντας θόρυβο. Αυτά τα σημεία πρέπει να απομακρυνθούν, απλοποιώντας την επιφάνεια και απαλλάσσοντάς την από «άχρηστα» σημεία. Αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο, επίσης, για την μείωση του όγκου των αρχείων, κάτι πολύ σημαντικό κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.



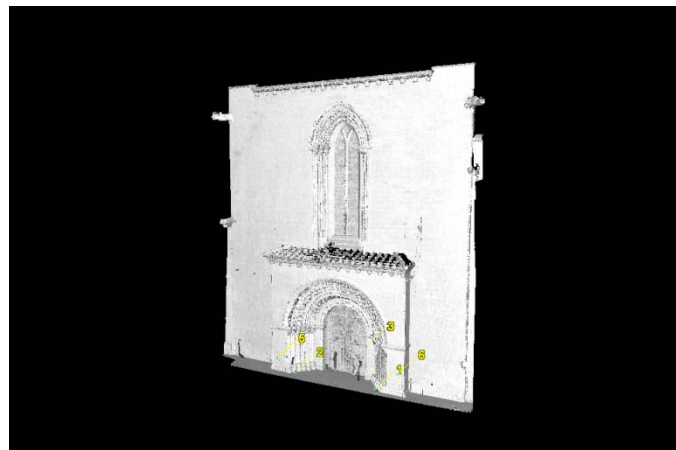
Εικόνα 4.5: Τα συνενωμένα νέφη με όλο το θόρυβο που περικλείουν

Το καθάρισμα των νεφών σημείων, αναφέρεται στον «χονδροειδή» θόρυβο, δηλαδή σε σημεία που βρίσκονται καθαρά έξω από το αντικείμενο ενδιαφέροντος και σαρώνονται καθώς περιστρέφεται ο σαρωτής (εμπόδια, διερχόμενοι άνθρωποι κτλ.).

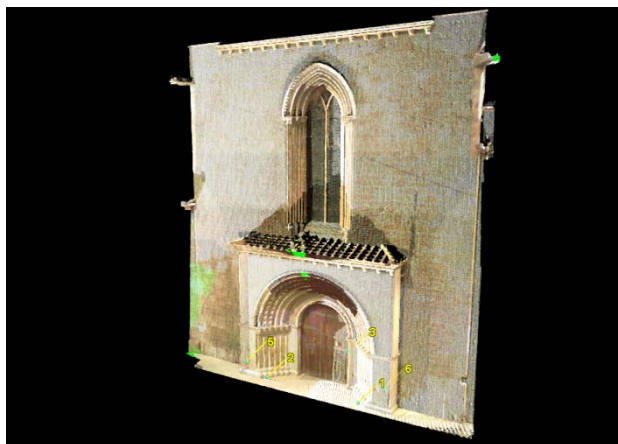
Στην περίπτωση της *Puerta Almoína*, ο σαρωτής είχε συλλέξει πολλά σημεία εκτός του αντικειμένου. Το καθάρισμα αυτών των σημείων έγινε στο λογισμικό περιβάλλον του *Cyclone*, επιλέγοντας τα περιττά σημεία και σβήνοντάς τα. Πρόκειται για μια αρκετά απλή μη αυτοματοποιημένη διαδικασία. Ο χρήστης οπτικά ελέγχει ποια σημεία βρίσκονται εκτός του αντικειμένου και τα διαγράφει. Μετά από αυτή τη διαδικασία έμειναν περίπου 5.544.000 σημεία στο συνολικό νέφος σημείων (εικόνες 4.6, 4.7, 4.8, 4.9). Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αρχικά είχαν συλλεχθεί περίπου 6.500.000 σημεία.



Εικόνα 4.6: Τα νέφη (intensity point clouds) απαλλαγμένα από τον χονδροειδή θόρυβο



Εικόνα 4.7: Τα σκιασμένα νέφη (shaded point clouds)



Εικόνα 4.8: Τα νέφη με πληροφορία χρώματος, όπως αυτή λήφθηκε με την CCD κάμερα του σαρωτή



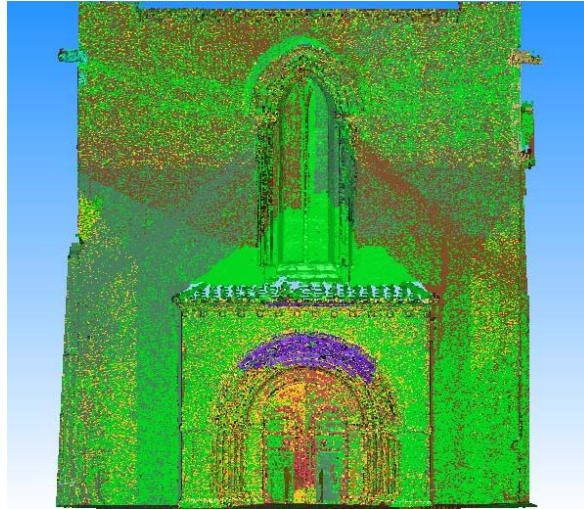
Εικόνα 4.9: Λεπτομέρεια των φωτορεαλιστικών νεφών

Η οργάνωση των νεφών, σε θεματικά επίπεδα των οποίων τα σημεία έχουν γενικά κάποιες κοινές ιδιότητες είναι ιδιαίτερα σημαντική για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Τα λογισμικά πακέτα που κυκλοφορούν στην αγορά αυτή τη στιγμή (*open source* ή μη) έχουν αρκετούς περιορισμούς στον όγκο των δεδομένων που μπορούν να διαχειριστούν. Είναι πολύ σημαντικό, τα δεδομένα από την αρχή να οργανώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πιο εύκολα διαχειρίσιμα και επεξεργάσιμα με την δεδομένη υπολογιστική ισχύ.

Εδώ, τα 5 συνενωμένα νέφη σημείων εξήχθησαν από το *Cyclone* σε μορφή αρχείου *.pts*. Κατόπιν, τα αρχεία εισήχθησαν στο λογισμικό *3DReshaper* της εταιρείας *Technodigit*, ώστε να οργανωθούν και να συνεχιστεί η επεξεργασία τους.

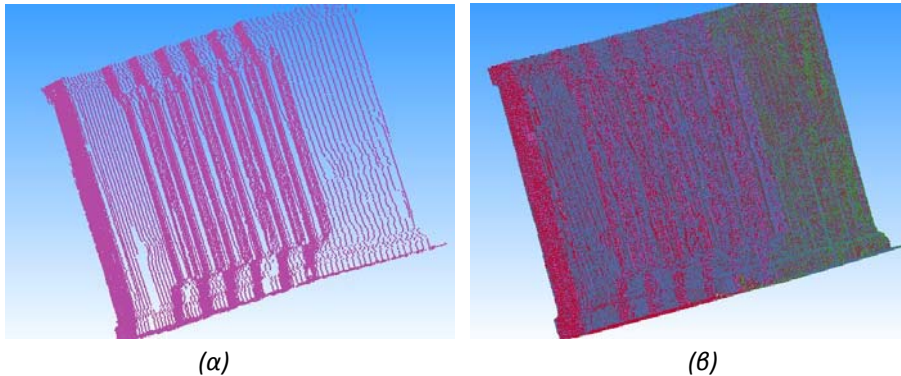
Προέκυψαν 8 διαφορετικά θεματικά επίπεδα (εικόνα 4.10). Το κάθε θεματικό επίπεδο περιείχε σημεία που προήλθαν από μια και μόνο θέση σαρωτή. Επειδή από μερικές θέσεις σάρωσης είχαν γίνει περισσότερες από μια σαρώσεις σε σημεία λεπτομερειών (π.χ υδρορροές), τα θεματικά επίπεδα που προέκυψαν με το συγκεκριμένο *format* αρχείων (*.pts*) είναι περισσότερα από τις θέσεις σάρωσης. Μερικά από αυτά τα θεματικά επίπεδα περιείχαν σχετικά μικρό αριθμό σημείων (μερικές χιλιάδες σημεία), ενώ αντίθετα, άλλα, πολύ μεγάλο (εκατομμύρια σημεία). Σημαντικό είναι να

σημειωθεί ότι σε αυτό το *format* αρχείων περιέχεται πληροφορία τόσο για τις συντεταγμένες των σημείων, όσο και για το χρώμα και την ανακλαστικότητα τους.

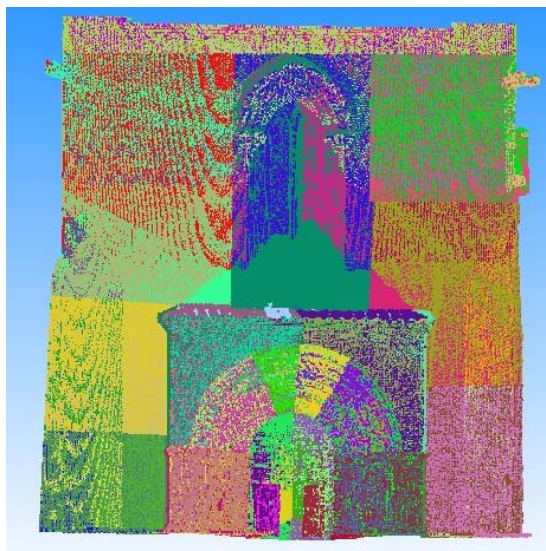


Εικόνα 4.10: Τα οκτώ θεματικά επίπεδα εμφανιζόμενα ταυτόχρονα

Με βάση την τοπολογία των σημείων, χωρίζοντας τα 8 αυτά θεματικά επίπεδα, δημιουργήθηκαν 84 νέα. Η οργάνωση αυτή, ήταν αποτέλεσμα προσπάθειας καθένα από αυτά να περιέχει όλα τα σημεία που περιγράφουν συγκεκριμένο κομμάτι επιφανείας ανεξάρτητα από την σάρωση από την οποία έχουν προέλθει (εικόνες 4.11, 4.12).



Εικόνα 4.11: (α) Οι δεξιοί κιονίσκοι από μια και μόνο σάρωση (ένα θεματικό επίπεδο)
(β) Όλα τα θεματικά επίπεδα που περιγράφουν τους δεξιούς κιονίσκους



Εικόνα 4.12: Τα νέφη σημείων κατατμημένα. Κάθε θεματικό επίπεδο αντιπροσωπεύεται από ένα χρώμα

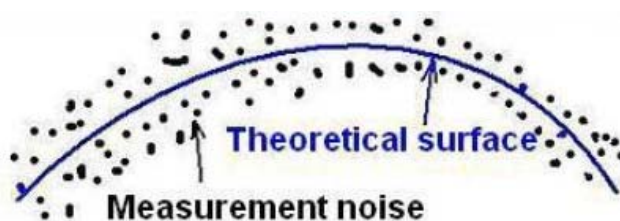
Παρακάτω φαίνεται η λίστα με όλα τα θεματικά επίπεδα των νεφών που προέκυψαν:

ΟΝΟΜΑ ΘΕΜΑΤΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙ	ΦΟΡΕΣ ΠΟΥ ΕΜΦΑΝΙΖΕΤΑΙ
<i>Upper heads</i>	Φουρούσια επάνω από το παράθυρο	4
<i>Window</i>	Παράθυρο	4
<i>Above arches left</i>	Περιοχή επάνω από τα τόξα και κεφαλές (αριστερά)	5
<i>Above arches right</i>	Περιοχή επάνω από τα τόξα και κεφαλές (δεξιά)	5
<i>Left wall up</i>	Επάνω τμήμα αριστερού τοίχου και υδρορορή	5
<i>Left wall middle</i>	Μεσαίο τμήμα αριστερού τοίχου	4
<i>Left wall down</i>	Κατώτερο τμήμα αριστερού τοίχου	4
<i>Right wall up</i>	Επάνω τμήμα δεξιού τοίχου και υδρορορή	5
<i>Right wall middle</i>	Μεσαίο τμήμα δεξιού τοίχου	4
<i>Right wall down</i>	Κατώτερο τμήμα δεξιού τοίχου	4
<i>Columns right</i>	Δεξιοί κιονίσκοι	5
<i>Columns left</i>	Αριστεροί κιονίσκοι	5
<i>Door right</i>	Δεξιό τμήμα ξύλινης εισόδου	5
<i>Door left</i>	Αριστερό τμήμα ξύλινης εισόδου	5
<i>Arches left</i>	Αριστερό τμήμα τόξων	5
<i>Arches right</i>	Δεξιό τμήμα τόξων	5
<i>Arches center</i>	Κεντρικό-αριστερό τμήμα τόξων	5
<i>Arches center 1</i>	Κεντρικό-δεξιό τμήμα τόξων	5

Πίνακας 4.2: Η λίστα των θεματικών επιπέδων που δημιουργήθηκαν μετά την κατάτμηση

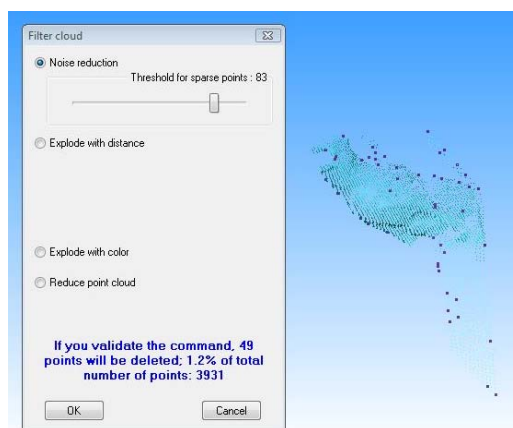
Το φιλτράρισμα (*filtering*) των νεφών, αποσκοπεί στην αφαίρεση των επιπλέον σημείων που σαρώθηκαν και είναι πολύ κοντινά στην επιφάνεια. Όπως αναλύεται και στο πρώτο κεφάλαιο του τεύχους αυτού, σε αρκετά περίπλοκες επιφάνειες οι οποίες σαρώνονται με μεγάλη πυκνότητα σάρωσης, είναι πολύ εύκολο να σαρωθούν «λάθος» σημεία λόγω εκτροπής της ακτίνας *laser* (σε εξωτερικές γωνίες κτλ). Το φαινόμενο αυτό είναι ακόμη πιο έντονο σε περιπτώσεις σάρωσης επιφάνειας από ιδιαίτερα ανακλαστικό υλικό όπως το μάρμαρο ή το ξύλο.

Το φιλτράρισμα είναι γενικά μια αυτοματοποιημένη διαδικασία, καθώς σε όλα τα λογισμικά πακέτα υπάρχουν αλγόριθμοι οι οποίοι εντοπίζουν αυτόματα τα σημεία που αποτελούν «θόρυβο» και τα απομακρύνουν. Βεβαίως, οι παράμετροι του μπορούν να ρυθμιστούν από τον χρήστη. Όταν οι επιφάνειες είναι αρκετά πολύπλοκες είναι δύσκολο να καθοριστούν οι τιμές αυτών των παραμέτρων, καθώς πρέπει να επιτευχθεί μείωση του θορύβου χωρίς όμως να απαλειφθούν πολύτιμες λεπτομέρειες. Συνήθως χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι απομακρύνουν σημεία τα οποία θεωρούν θόρυβο με κριτήριο την απόχσή τους από το υπόλοιπο νέφος (εικόνα 4.13).



Εικόνα 4.13: Σημεία που θεωρούνται «θόρυβος»

Στην περίπτωση που μελετάται εδώ χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *3DReshaper* και γενικά ελαστικές παράμετροι ώστε να μην απομακρυνθούν πολλά σημεία (εικόνα 4.14). Ο αλγόριθμος βασίζεται στην πυκνότητα του νέφους [3DReshaper Tutorials, 2010].



Εικόνα 4.14: Παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου φιλτραρίσματος

Μετά από αυτή τη διαδικασία αφαιρέθηκε περίπου το 2% των σημείων, και πλέον η επιφάνεια σχηματιζόταν από περίπου 5.440.000 σημεία. Το ανθρώπινο μάτι δεν αντιλαμβάνεται εύκολα τις διαφορές μεταξύ φιλτραρισμένων και μη φιλτραρισμένων νεφών, παρά μόνο σε περιοχές έντονων ακμών.

4.4 Από το νέφος σημείων στην επιφάνεια – μοντελοποίηση

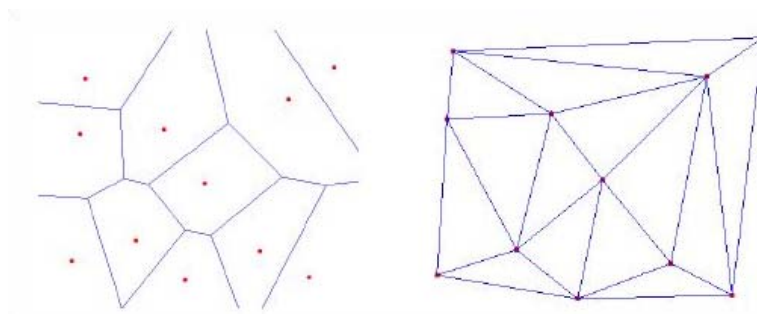
Ένα πυκνό νέφος σημείων μπορεί να αναπαραστήσει ικανοποιητικά μια επιφάνεια, όμως σε περιπτώσεις σύνθετων επιφανειών είναι αρκετά δύσκολο να αποδοθούν περιοχές λεπτομερειών και ακμές με τρόπο ώστε να είναι άμεσα αντιληπτές από τον μέσο χρήστη. Γι' αυτό, το στάδιο του φιλτραρίσματος των νεφών σημείων ακολουθείται από την μοντελοποίησή τους.

Ως μοντελοποίηση εννοείται η κατασκευή και αναπαράσταση στον ηλεκτρονικό υπολογιστή ενός αντικειμένου, ορίζοντας σημεία σε έναν πίνακα τριών διαστάσεων. Αυτός ο πίνακας βασίζεται στους άξονες X, Y και Z του γεωμετρικού χώρου. Ύστερα, διαφορετικά «σετ» αυτών των σημείων ενώνονται μαθηματικά με π.χ. γραμμές για να δημιουργήσουν πολύγωνα και τα πολύγωνα ενώνονται για να δημιουργήσουν αντικείμενα [Remondino, 2003]. Δηλαδή, πρόκειται για μια διαδικασία η οποία μετατρέπει τα «ακανόνιστα» (*unorganized*) νέφη σημείων, σε εύκολα διαχειρίσιμα πολύγωνα (συνήθως τρίγωνα).

Το πολυγωνικό αυτό μοντέλο επιφανείας μη επικαλυπτόμενων πολυγώνων (*faces*) διεθνώς ονομάζεται *mesh* ή *TIN* (Δίκτυο Ακανόνιστων Τριγώνων – *Triangulated Irregular Network*). Μπορεί να περιλαμβάνει κόμβους, ακμές και πολύγωνα (*faces*).

Ο τριγωνισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί στο δισδιάστατο ή τον τρισδιάστατο χώρο (*2D, 2.5D, 3D triangulation*), ανάλογα με την γεωμετρία του αντικειμένου. Συνήθως, για αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιείται ο τριγωνισμός *Delaunay* (εικόνα 4.15). Ωστόσο, ενδεικτικά αναφέρονται και άλλες μέθοδοι δημιουργίας επιφανείας από νέφος σημείων:

- *Marching cubes*
- *Marching triangles*
- *Ball – Pivoting algorithm*
- *Robust algorithm*
- *Poisson surface*
- *Moving Least Squares*



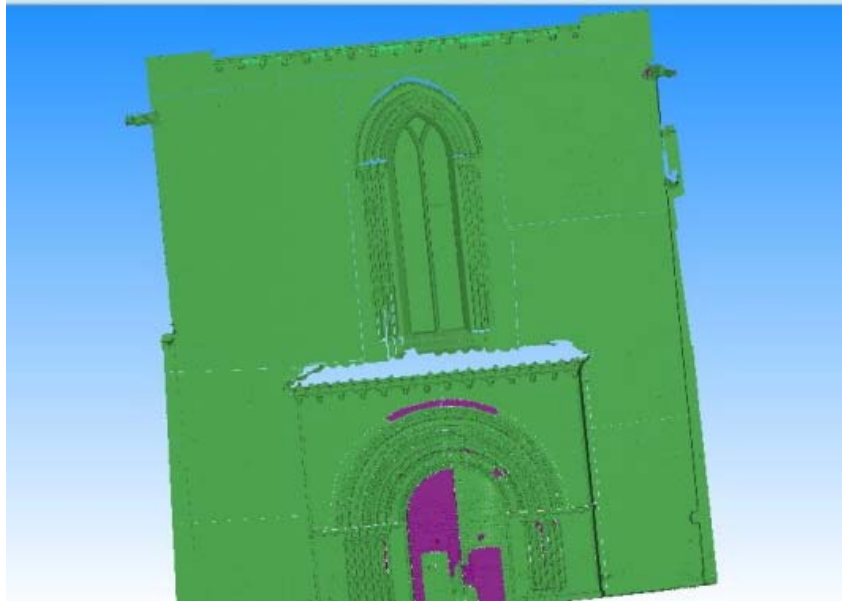
Εικόνα 4.15: Ο τριγωνισμός Delaunay

Τα δεδομένα εισόδου σε έναν 3D τριγωνισμό είναι σημεία στον χώρο των τριών διαστάσεων, κάτι που σημαίνει ότι η συνάρτηση των υψών δεν είναι πλέον “1-1”. Σε αυτή την περίπτωση, ο τριγωνισμός καλείται τετραεδρισμός. Τα αποτελέσματα του τετραεδρισμού είναι πολύ πιο περίπλοκα από αυτά του τριγωνισμού [Remondino, 2003].

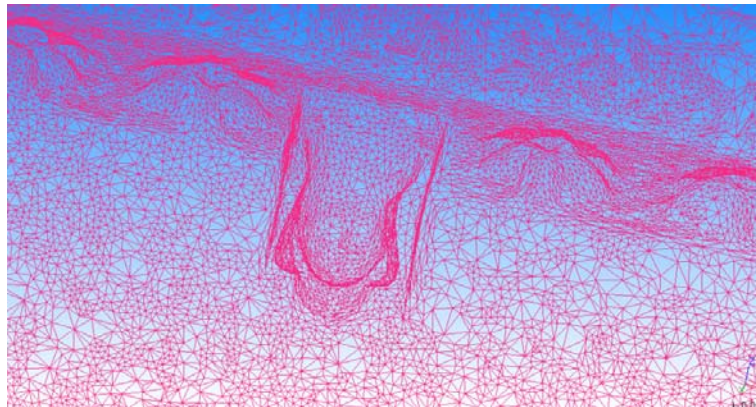
Τα λογισμικά πακέτα που κυκλοφορούν στην αγορά αυτή τη στιγμή παρέχουν πολλές δυνατότητες δημιουργίας επιφανείας, επιτρέποντας πολλές φορές στον χρήστη να ρυθμίζει τις παραμέτρους του τριγωνισμού (πυκνότητα σημείων που θα χρησιμοποιηθούν, μήκος πλευράς τριγώνων κτλ). Παρόλα αυτά, είναι ακόμη αρκετά δύσκολο για την δεδομένη υπολογιστική ισχύ να δημιουργήσει επιφάνεια από πολύ μεγάλα σε όγκο νέφη σημείων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει χρονοβόρα και τα αποτελέσματά να μην είναι ικανοποιητικά. Όταν όμως τα δεδομένα είναι οργανωμένα σε διαφορετικά θεματικά επίπεδα, τότε είναι πολύ πιο εύκολο και γρήγορο να γίνει η διαδικασία του τριγωνισμού.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, για την δημιουργία επιφανείας χρησιμοποιήθηκε και πάλι το λογισμικό *3DReshaper*. Δίνεται η δυνατότητα να δημιουργηθεί η επιφάνεια και ταυτόχρονα να μειωθεί και άλλο ο θόρυβος, αναλύοντας την γεωμετρία του αντικειμένου και κρατώντας μόνο τα σημεία που αυστηρά ακολουθούν την επιφάνεια (που βρίσκονται δηλαδή κάτω από ένα κατώφλι). Ταυτόχρονα όμως, δίνεται η επιλογή να χρησιμοποιηθούν όλα τα σημεία και να μην αποκλειστεί κανένα από τη διαδικασία του τριγωνισμού, αλλά αυτό εμπειρικά βρέθηκε ότι είναι δυνατό μόνο όταν το θεματικό επίπεδο αποτελείται από 500.000 σημεία ή λιγότερα.

Επειδή η επιφάνεια της *Puerta Almoína* θεωρείται ιδιαίτερα πολύπλοκη στην μεγαλύτερη έκτασή της και επειδή είχε προηγηθεί ήδη το φιλτράρισμα των νεφών, κρίθηκε προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν όλα τα σημεία από κάθε θεματικό επίπεδο, ώστε να μην απαλειφθούν σημαντικές λεπτομέρειες. Κατά την διάρκεια της οργάνωσης των θεματικών επιπέδων των νεφών είχε δοθεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε, αθροιστικά, όλα όσα περιγράφουν το ίδιο κομμάτι του αντικειμένου να περιέχουν λιγότερα από 500.000 σημεία και να είναι δυνατή η διαδικασία αυτή (εικόνες 3.16, 3.17).

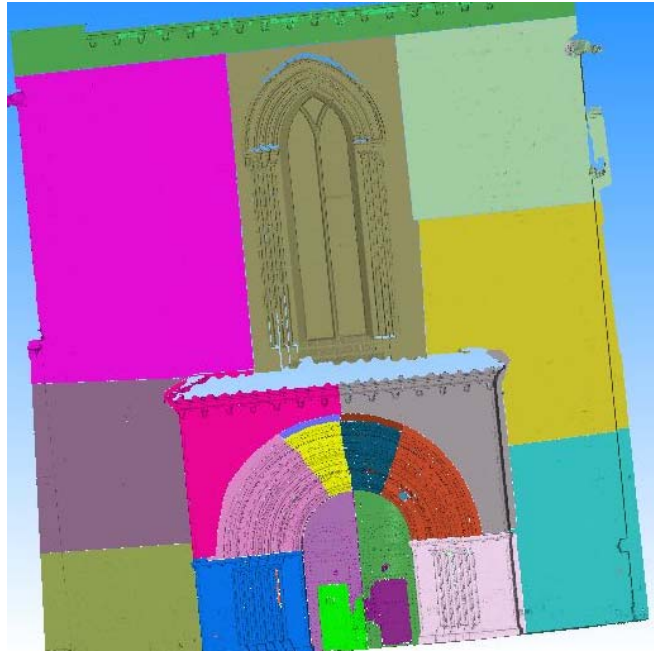


Εικόνα 3.16: Η επιφάνεια που προέκυψε μετά τον τριγωνισμό σε μορφή σκιασμένου μοντέλου (shaded model)



Εικόνα 4.17: Λεπτομέρεια από την επιφάνεια με μορφή πλέγματος τριγώνων (wireframe model)

Οι επιφάνειες δημιουργήθηκαν συνδυάζοντας όλα τα θεματικά επίπεδα που περιείχαν τα σημεία που αφορούσαν στο ίδιο κομμάτι του αντικειμένου. Από αυτή τη διαδικασία προέκυψαν 18 επιφάνειες (εικόνα 4.18), η κάθε μια εκ των οποίων απεικόνιζε μικρό σχετικά τμήμα του όλου μνημείου. Κάποιες επιφάνειες περιείχαν μεγάλο αριθμό τριγώνων (μερικά εκατομμύρια) και άλλες μικρότερο (της τάξεως των μερικων εκατοντάδων χιλιάδων). Συνολικά δημιουργήθηκαν περί τα 10.500.000 τρίγωνα.



Εικόνα 4.18: Οι 18 μικρότερες επιφάνειες (sub-meshes) που προέκυψαν. Κάθε μια αντιπροσωπεύεται από διαφορετικό χρώμα

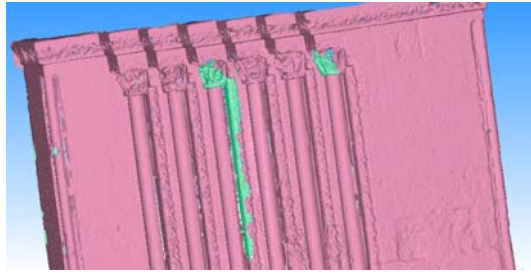
Αξιολόγηση των μέχρι στιγμής αποτελεσμάτων

Στις πιο ομαλές περιοχές του αντικειμένου, όπως στους τοίχους, το αποτέλεσμα είναι, όπως φαίνεται και παρακάτω (εικόνα 4.19), αρκετά ικανοποιητικό. Το μοντέλο περιγράφει με ικανοποιητική λεπτομέρεια την πραγματική επιφάνεια και η υφή του είναι γενικά ομαλή, χωρίς πολλά κενά ή λάθη.



Εικόνα 4.19: Επιφάνεια χωρίς πολλά κενά ή λάθη

Αντίθετα, στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως στα τόξα και στους κιονίσκους η επιφάνεια είναι αρκετά τραχεία και δημιουργήθηκε με πολλά κενά και λάθη (εικόνες 4.20, 4.21). Οι λεπτομέρειες, ωστόσο, περιγράφονται πολύ ικανοποιητικά για τα δεδομένα ακριβείας που είχαν τεθεί.

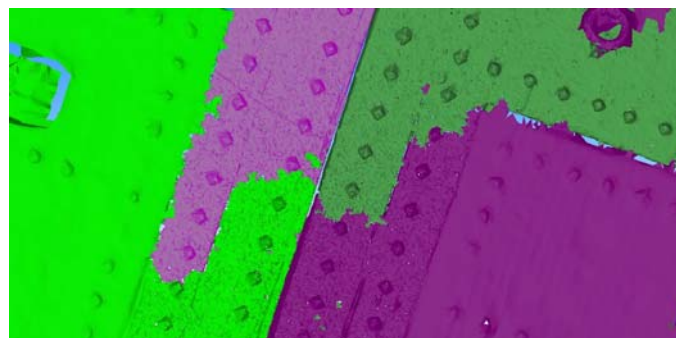


Εικόνα 4.20: Πολύπλοκη επιφάνεια (κιονίσκοι) που περιέχει πολλά λάθη



Εικόνα 4.21: Πολύπλοκη επιφάνεια (τόξα) με πολλά λάθη και κενά

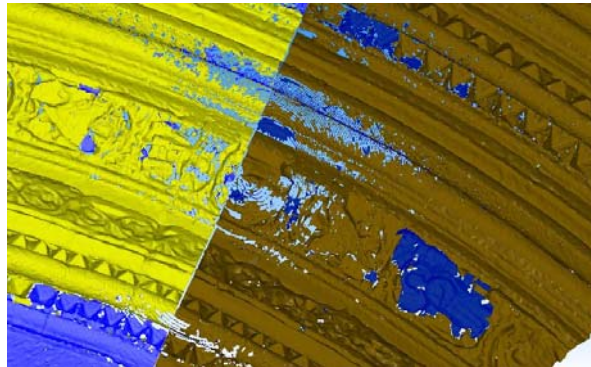
Κατά τη διάρκεια σάρωσης της ξύλινης εισόδου του ναού, η ακτίνα *laser* υπέστη αρκετές εκτροπές μέσα στο όχι και τόσο συμπαγές ξύλο. Αποτέλεσμα αυτών των εκτροπών ήταν η δημιουργία μιας πολύ πεπλεγμένης επιφανείας, με αρκετά επικαλυπτόμενα και αναδιπλωμένα τρίγωνα και ακανόνιστο σχήμα (εικόνα 4.22). Τέτοιες συμπεριφορές της ακτίνας είναι συχνό φαινόμενο σε υλικά τέτοιου είδους με μεγάλη απορροφητικότητα ή ανακλαστικότητα και έχουν μελετηθεί σε διάφορες δημοσιεύσεις, όπως στο [Tsakiri et al, 2003].



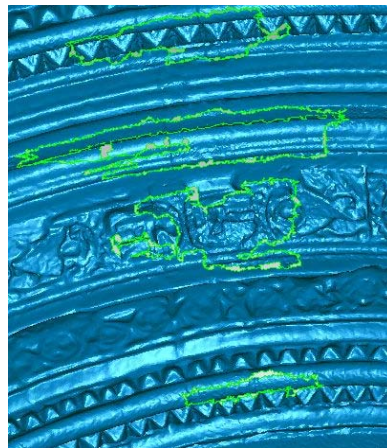
Εικόνα 4.22: Η επιφάνεια που δημιουργήθηκε στην περιοχή της ξύλινης εισόδου

Άξια αναφοράς θεωρείται η περίπτωση της περιοχής των τόξων που βρισκόταν ακριβώς επάνω από μια θέση του σαρωτή, σε σχετικά χαμηλό ύψος. Σε αυτή την περιοχή, δημιουργήθηκε επιφάνεια με αρκετά κενά, τα οποία σχημάτιζαν ομόκεντρους κύκλους (εικόνα 4.23α). Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι τα σημεία συλλέχθηκαν με τέτοιον τρόπο από το σαρωτή, λόγω της περιστροφής της ακτίνας *laser* γύρω από τον άξονα Z. Ο αλγόριθμος του λογισμικού, δεν μπόρεσε να

σχηματίζει σωστά τρίγωνα σε αυτή την περιοχή. Δοκιμαστικά, για την συγκεκριμένη περιοχή, δημιουργήθηκε πολυγωνικό πλέγμα και στο λογισμικό περιβάλλον του *Geomagic Studio 10* και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά καλύτερα. Γι' αυτό, προτιμήθηκε να γίνει σε αυτό το λογισμικό ο τριγωνισμός του τμήματος αυτού, να εξαχθεί σε μορφή *obj*. και κατόπιν να ενωθεί με το υπόλοιπο θεματικό επίπεδο (εικόνα 4.23β).



(α)



(β)

Εικόνα 4.23: Η περιοχή των τόξων ακριβώς επάνω από μια θέση σαρωτή όπως σχηματίστηκε (α) στο λογισμικό *3DReshaper* (β) στο λογισμικό *Geomagic Studio*

4.5 Εξομάλυνση της επιφανείας

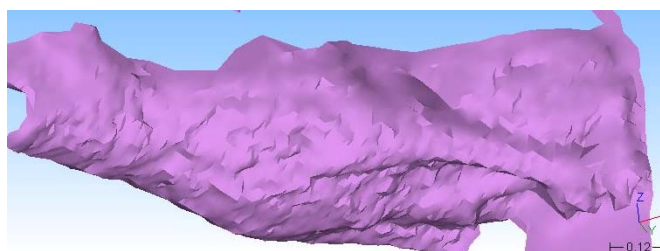
Όπως φαίνεται παραπάνω, η επιφάνεια που δημιουργείται μετά τον τριγωνισμό, συνήθως έχει αρκετές έντονες ακμές και δεν προσομοιάζει πλήρως την καμπυλότητα της επιφανείας που περιγράφει. Μια συνηθισμένη τακτική των λογισμικών είναι να εξομαλύνουν κατά κάποιο τρόπο την επιφάνεια, χωρίς όμως να απαλείφονται σημαντικές λεπτομέρειές της. Η εξομάλυνση (*smoothing*), ως διαδικασία, είναι ακριβώς αντίθετη της ενίσχυσης (*enhancing*). Οι τακτικές που ακολουθούνται όταν

επεξεργάζονται *3D models* είναι σχεδόν παρόμοιες με αυτές της ενίσχυσης ή εξομάλυνσης εικόνων.

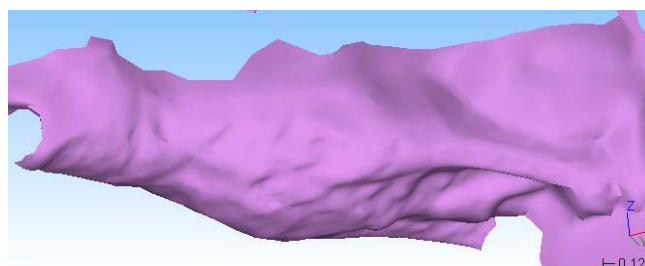
Η διαδικασία της εξομάλυνσης της επιφανείας ακολουθείται αμέσως μετά τον τριγωνισμό, καθώς λίγες φορές το αποτέλεσμα του ικανοποιεί οπτικά. Η εξομάλυνση απομακρύνει όποιον θόρυβο έχει απομείνει και βελτιώνει οπτικά το μοντέλο.

Για την εξομάλυνση υπάρχει πληθώρα εναλλακτικών αλγορίθμων που μπορούν να εφαρμοστούν, σύμφωνα με τα εκάστοτε δεδομένα και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι πιο συνήθεις αλγόριθμοι είναι οι προσεγγίσεις *Laplace*, οι οποίες έχει αποδειχθεί ότι εξισορροπούν το υπολογιστικό κόστος με την ποιότητα. Ενδεικτικά αναφέρονται και άλλες προσεγγίσεις του θέματος, όπως η εξομάλυνση *Taubic*, η εξομάλυνση διατήρησης όγκου, η ανισοτροπική εξομάλυνση κτλ. [Bray, 2004].

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν το *3DReshaper*, το οποίο δίνει την δυνατότητα να εξομαλυνθεί η επιφάνεια είτε προσθέτοντας νέους κόμβους είτε μετακινώντας τους ήδη υπάρχοντες είτε οργανώνοντας ξανά τα τρίγωνα λαμβάνοντας υπ' όψιν την καμπυλότητα της επιφάνειας είτε με όλες τις παραπάνω τεχνικές συνδυασμένα. Η εξομάλυνση της επιφανείας έγινε με ιδιαίτερη προσοχή και αρκετές δοκιμές, ώστε να αποφευχθεί απώλεια σημαντικών λεπτομερειών. Γενικά, το επιθυμητό είναι να επιτευχθεί μέγιστη εξομάλυνση-απομάκρυνση θορύβου, διατηρώντας ταυτόχρονα το μέγιστο των λεπτομερειών. Τελικά χρησιμοποιήθηκε πολύ χαμηλή τιμή έντασης εφαρμογής του - αρκετά αποτελεσματικού- αλγορίθμου που μετακινεί και ξαναυπολογίζει τις συντεταγμένες των κόμβων (εικόνες 4.24, 4.25).

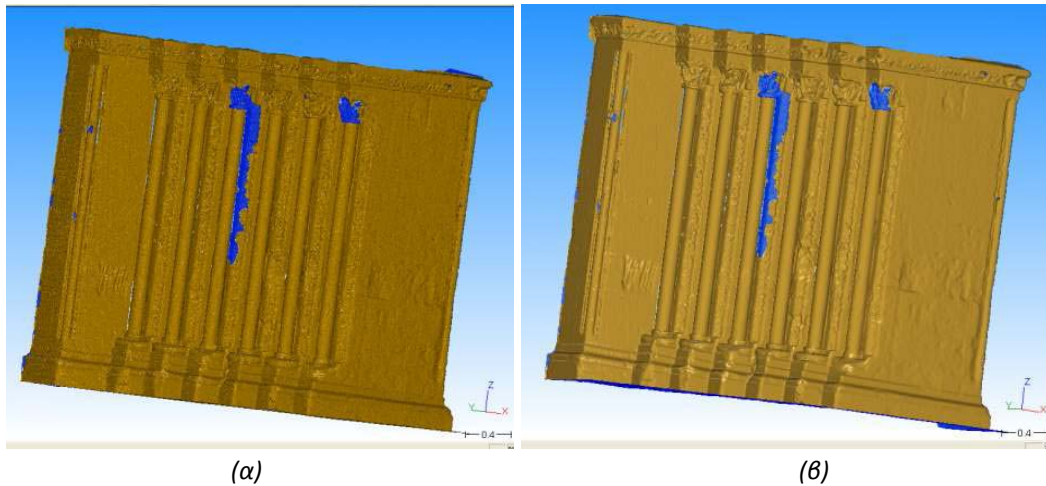


(α)



(β)

Εικόνα 4.24 : Τμήμα της επιφάνειας (α) πριν και (β) μετά την εξομάλυνση



Εικόνα 4.25: Η ίδια επιφάνεια (α) μη εξομαλυμένη και (β) εξομαλυμένη

Το λογισμικό έδινε επίσης την δυνατότητα τοπικής εξομάλυνσης σε περιοχές που επιλέγει ο χρήστης, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο. Χρησιμοποιήθηκε και αυτό το εργαλείο για να βελτιωθεί η υφή σε περιορισμένες περιοχές έντονου αναγλύφου με αρκετό θόρυβο.

4.6 Διόρθωση της επιφανείας

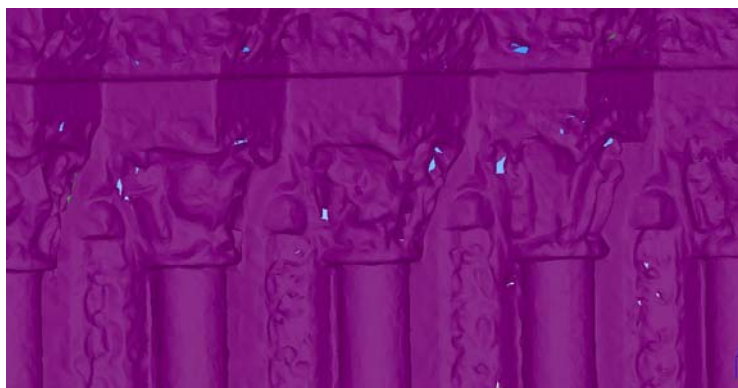
Ακόμα και αν τα αποτελέσματα μετά την εξομάλυνση είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά, σε μερικά σημεία το τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να χρειάζεται κάποια επιπλέον επεξεργασία ώστε να έχει ομοιόμορφη και λεία υφή και να βελτιωθεί οπτικά. Κατά την διάρκεια του τριγωνισμού, σε ιδιαίτερα «δύσκολα» σημεία όπως λεπτομέρειες και ακμές, αλλά ακόμη και σε πιο απλές επιφάνειες εμφανίζονται συχνά κενά και λάθος ή αναδιπλωμένα τρίγωνα.

Τα κενά συνήθως οφείλονται σε αδυναμία εφαρμογής του αλγορίθμου του τριγωνισμού λόγω έλλειψης πληροφορίας. Αυτό συμβαίνει σε περιοχές που δεν βρίσκονται στο οπτικό πεδίο του σαρωτή, όπως σε πολύ έντονες εσοχές, σημεία στα οποία δεν φτάνει η ακτίνα λόγω ύψους κτλ. Σε αυτά τα σημεία, είναι αδύνατο να συλλέξει πληροφορία ο σαρωτής και συνεπώς δεν υπάρχει ικανός αριθμός σημείων ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία ο τριγωνισμός. Τις περισσότερες φορές αυτό διορθώνεται εύκολα, ιδιαίτερα όταν τα κενά είναι σχετικά μικρά. Τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά, σχεδόν δεν γίνεται αντιληπτό ότι δεν είχαν μετρηθεί σημεία σε αυτές τις περιοχές. Αντίθετα, όταν υπάρχουν μεγάλα τμήματα της επιφανείας του μοντέλου για τα οποία δεν υπάρχει ικανή πληροφορία από τον σαρωτή, είναι αρκετά δύσκολο να καλυφθεί αυτό το κενό και απαιτεί πολύ προσεκτικούς χειρισμούς ώστε αυτή η επέμβαση να μην έχει επιπτώσεις στην οπτική. Τα λογισμικά που κυκλοφορούν στο εμπόριο, έχουν αναπτύξει διάφορους αλγορίθμους για αυτή τη διαδικασία, επιτρέποντας στον χρήστη να την ελέγξει ως ένα βαθμό. Οι διαδικασίες αυτές μπορεί να γίνουν αυτόματα ή χειροκίνητα, ανάλογα

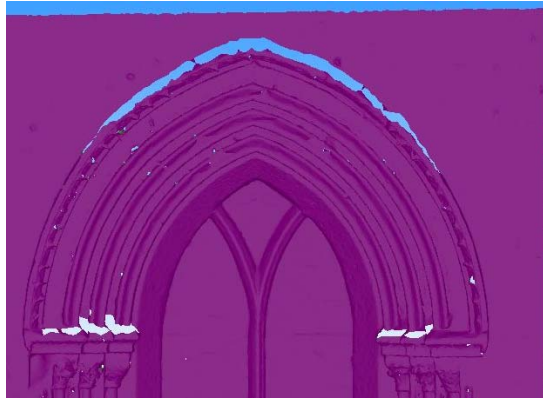
με την μορφή και το μέγεθος του κενού, αφού πρώτα εντοπιστούν αυτόματα όλα τα κενά του μοντέλου από το λογισμικό. Οι διαδικασίες προσέγγισης των κενών σε επίπεδες επιφάνειες είναι πιο απλές από αυτές σε σύνθετες, καμπυλωτές επιφάνειες. Βιβλιογραφικά, αναφέρεται ότι το πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί είτε γεωμετρικά είτε ογκομετρικά [Χiao et al., 2008]. Διεθνώς οι επιστήμονες αναπτύσσουν διαρκώς νέους, όλο και πιο εξελιγμένους αλγορίθμους τριγωνισμού για αυτές τις περιπτώσεις [Wei et al., 2007], [Tekumalla et al., 2004].

Στην περίπτωση που μελετάται εδώ, μετά από τον τριγωνισμό και την εξομάλυνση παρατηρήθηκαν αρκετά κενά στο μοντέλο, ιδιαίτερα όπου το ανάγλυφο γινόταν περίπλοκο και υπήρχαν πολλές «κρυφές» περιοχές (εικόνα 4.26). Χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά *3DReshaper* και το *Geomagic Studio 10* και έτσι καλύφθηκαν αυτόματα αρκετές «τρύπες» με εξαιρετικά αποτελέσματα. Ακόμη και στα κενά σε έντονα καμπύλες περιοχές, υπήρχε η δυνατότητα να γεμίσουν με ειδικό αλγόριθμο. Ειδικά στο *3DReshaper* υπήρχε η δυνατότητα να προστεθούν κόμβοι στο εσωτερικό της τρύπας και έτσι φάνηκε ιδιαίτερα χρήσιμο για την κάλυψη μεγάλων κενών (εικόνα 4.27). Σε ορισμένες, πιο δύσκολες περιπτώσεις, χρειάστηκε να δημιουργηθούν τα τρίγωνα χειροκίνητα, γιατί τα αυτόματα εργαλεία δεν έδιναν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Πολλές φορές δημιουργήθηκαν «γέφυρες» (*bridges*) ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μέγεθος του κενού και να είναι πιο εύκολη η κάλυψή του.

Η όλη διαδικασία αποδείχθηκε χρονοβόρα, καθώς τα κενά απαιτούσαν διαφορετικούς τρόπους αντιμετώπισης και δεν μπορούσαν να ομαδοποιηθούν εύκολα. Πολλές φορές, η προσπάθεια γινόταν περισσότερες από μία φορές με διαφορετικούς αλγορίθμους μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Την διαδικασία καθυστερούσε ακόμη η μεταφορά των δεδομένων μεταξύ των λογισμικών με όλα τα προβλήματα ασυμβατότητας που επιφέρει.

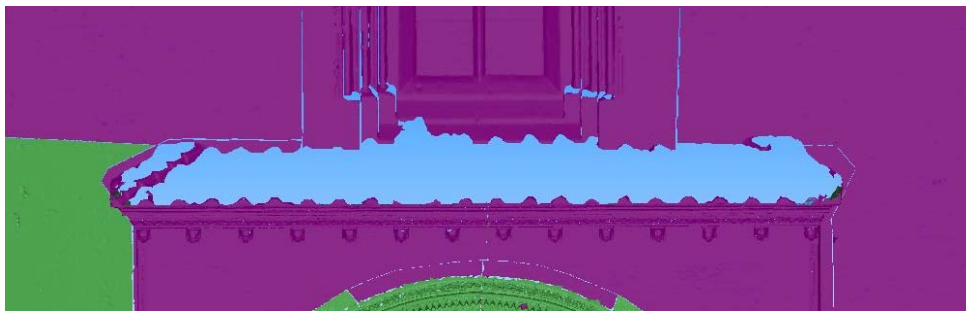


Εικόνα 4.26: Μικρά κενά από λάθη στον τριγωνισμό

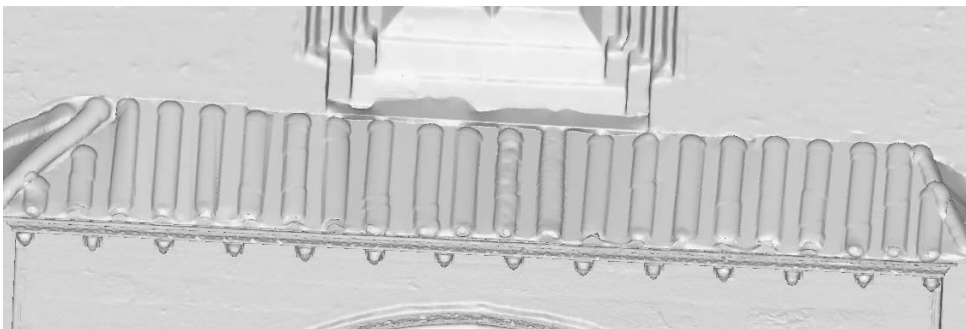


Εικόνα 4.27 : Χαρακτηριστικά κενά σε σημεία που δεν έχουν σαρωθεί σωστά λόγω μεγάλου ύψους

Το μεγαλύτερο κενό που υπήρχε στην επιφάνεια ήταν στην περιοχή επάνω από τα τόξα (εικόνα 4.28), στα κεραμιδιά. Η περιοχή αυτή, σε πολύ μεγάλο ύψος, ήταν αδύνατο να σαρωθεί από κάποια θέση του σαρωτή και δεν υπήρχε η δυνατότητα τοποθέτησής του σε κάποια θέση που να είναι ορατή. Το κενό αυτό καλύφθηκε, αλλά ήταν αδύνατο να πάρει την μορφή που θα είχε εάν είχε σαρωθεί κανονικά, δηλαδή να ακολουθεί το ανάγλυφο των κεραμιδιών. Ο μόνος τρόπος να προσομοιάζει κατά κάποιο τρόπο την επιφάνεια ήταν να δημιουργηθεί («σκαλιστεί») χειροκίνητα (εικόνα 4.29). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό *GSI Studio*.



Εικόνα 4.28: Το μεγαλύτερο κενό που δημιουργήθηκε

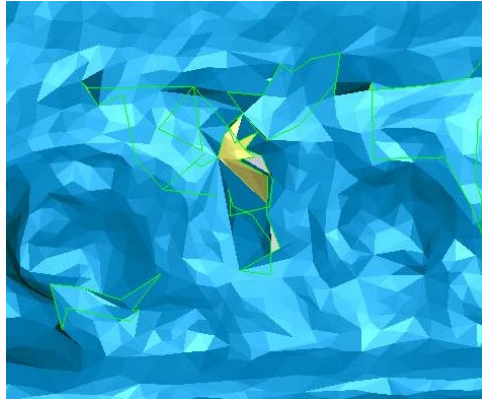


Εικόνα 4.29: Η κάλυψη αυτού του κενού χειροκίνητα στο λογισμικό *GSI Studio*

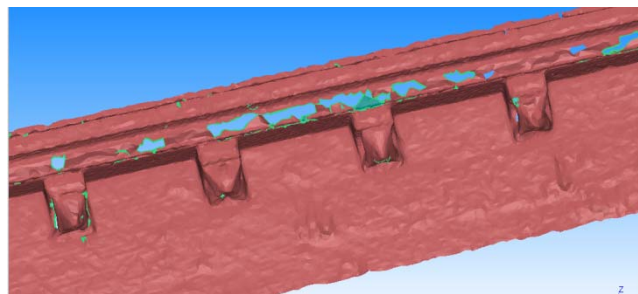
Εκτός όμως από τα κενά, σε αρκετά σημεία της επιφανείας κατά τον τριγωνισμό δημιουργήθηκαν πολλά λανθασμένα και αναδιπλωμένα τρίγωνα. Δηλαδή,

δημιουργούνται τρίγωνα σε περιοχές εκτός της επιφάνειας του αντικειμένου, αλλά αρκετά κοντά σε αυτό, πράγμα που εν μέρει σημαίνει ότι δεν έχει απαλειφθεί εντελώς ο θόρυβος. Τα αναδιπλωμένα (*backfacing*) τρίγωνα είναι τρίγωνα που έχουν λάθος προσανατολισμό, δηλαδή αντίθετο κάθετο διάνυσμα (*normal*). Τα λάθη αυτά δεν είναι σαφές σε τι μπορεί να οφείλονται, αλλά αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι διαφέρουν από λογισμικό σε λογισμικό και σε πλήθος αλλά και σε είδος. Επίσης, αρκεί ένα αναδιπλωμένο τρίγωνο για να επηρεάσει αρκετά γειτονικά του. Αποτέλεσμα αυτού είναι να υπάρχουν ομάδες αναδιπλωμένων τριγώνων σε συγκεκριμένες περιοχές των μοντέλων, ιδιαίτερα όπου το ανάγλυφο είναι ιδιαίτερα έντονο. Με τη λύση του προβλήματος αυτού ασχολούνται ερευνητές από το πεδίο των *computer graphics*, ωστόσο είναι δύσκολο να ερμηνευτεί και να αντιμετωπιστεί. Ενδεικτικά αναφέρεται μια προσπάθεια [Moller et al, 2000]. Τα λογισμικά που κυκλοφορούν στο εμπόριο, ωστόσο, δεν είναι σε θέση να επιλύσουν αυτό το πρόβλημα. Το πιο δύσκολο ίσως είναι να βρεθεί ένας τρόπος αυτόματης αναγνώρισης αυτών των τριγώνων. Έχουν αναπτυχθεί ορισμένοι αλγόριθμοι, αλλά δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν το θέμα πλήρως. Ακόμα και εάν μπορούν να αναγνωρίσουν, να εντοπίσουν και να επισημάνουν ορισμένα τέτοια τρίγωνα, σε καμία περίπτωση δεν είναι σε θέση να το εφαρμόσουν για όλα. Τις περισσότερες φορές είναι απαραίτητος ο επαναλαμβανόμενος αυτόματος έλεγχος, αλλά και αυτός ίσως δεν είναι αρκετός. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορεί να είναι σίγουρος ο χρήστης ότι το μοντέλο δε έχει πλέον κανένα τέτοιου είδους λάθος, είναι ο χειροκίνητος έλεγχος περισσότερες από μια φορές. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και επίπονη και απαιτεί μεγάλη εξοικείωση με τα λογισμικά και τον τρόπο αναπαράστασης της τρισδιάστατης επιφανείας, όπως και ισχυρή υπολογιστική ισχύ.

Στο μοντέλο που δημιουργήθηκε σε αυτή την εφαρμογή, υπήρχαν αρκετά αναδιπλωμένα τρίγωνα (εικόνα 4.30), κυρίως στις περιοχές όπου η επιφάνεια γινόταν πιο περίπλοκη. Για να διορθωθούν αυτόματα, στην αρχή έγιναν δοκιμές στο *3DReshaper* και κατόπιν στο *Rapidform* και το *Geomagic Studio*. Σε ορισμένα τμήματα της επιφανείας υπήρχαν κάποια αποτελέσματα, κυρίως με το *Geomagic Studio*. Ακόμη και σε αυτά όμως, πάντα τα περισσότερα τρίγωνα χρειάστηκαν χειροκίνητη διόρθωση. Στα περίπλοκα τμήματα όμως, ήταν ακόμη πιο δύσκολη η διαδικασία καθώς χρειάζονταν αρκετές περιστροφές του μοντέλου σε διάφορες οπτικές γωνίες για να εντοπιστούν αυτά τα τρίγωνα. Αρχικά ο καθαρισμός (χειροκίνητα) έγινε στο *3DReshaper* (εικόνες 4.31, 4.32), αλλά επειδή σε αυτό το λογισμικό ο χρόνος καθαρισμού αποδείχθηκε σχεδόν τριπλάσιος απ'ό,τι στο *Geomagic Studio* για την ίδια υπολογιστική ισχύ, τελικά προτιμήθηκε το δεύτερο.



Εικόνα 4.30: Αναδιπλωμένα τρίγωνα στην περιοχή των τόξων

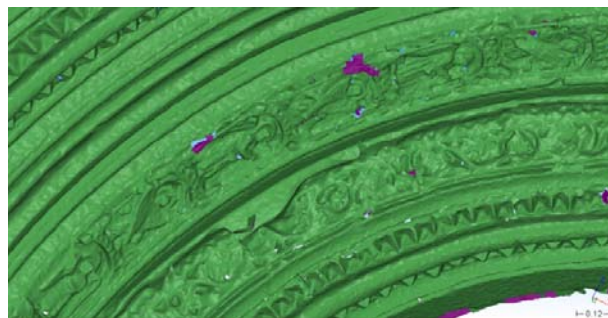


(α)



(β)

Εικόνα 4.31: Η ίδια περιοχή (φουρούσια) (α) πριν και (β) μετά την χειροκίνητη διόρθωση



(α)



(β)

Εικόνα 4.32: Τμήμα των τόξων (α) πριν και (β) μετά τη χειροκίνητη διόρθωση

Το συγκεκριμένο στάδιο αποδείχτηκε το πιο χρονοβόρο απ' όλα, καθώς χρειάζεται πολλές ημέρες συνεχούς επεξεργασίας για να επιτευχθεί ένα αποτέλεσμα αποδεκτό. Την διαδικασία επιβάρυνε και το γεγονός ότι έπρεπε να υποστεί διαχείριση μεγάλος όγκος δεδομένων σε υπολογιστές με σχετικά χαμηλή υπολογιστική ισχύ.

4.7 Μείωση του όγκου των δεδομένων

Συνήθως, οι επιφάνειες που δημιουργούνται από δεδομένα *laser scanner* καταλαμβάνουν υπερβολικά μεγάλο όγκο στον αποθηκευτικό χώρο του υπολογιστή. Για να γίνει η διαχείρισή τους απαιτείται ισχυρός επεξεργαστής και κατάλληλη κάρτα γραφικών για να μπορούν να απεικονιστούν στην οθόνη. Βέβαια, αυτό εξαρτάται και από τις δυνατότητες και τους αλγόριθμους των λογισμικών που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, καθώς υπάρχουν περιβάλλοντα τα οποία μπορούν να διαχειριστούν διπλάσιο ή και περισσότερο όγκο δεδομένων από άλλα.

Για το λόγο αυτό, συνήθως, οι χειριστές προβαίνουν σε μείωση του όγκου των δεδομένων (*mesh reduction* ή *decimation*). Αυτό μπορεί να γίνει μειώνοντας το πλήθος των σαρωμένων σημείων με έντονο φιλτράρισμα ή άλλες τεχνικές. Ακόμη, μπορεί να πραγματοποιηθεί αφού δημιουργηθεί η επιφάνεια, μειώνοντας το πλήθος των τριγώνων – πολυγώνων, μέχρι να μειωθεί ικανοποιητικά ο όγκος των αρχείων. Όμως, οποιαδήποτε μείωση έχει επιπτώσεις στην γεωμετρία του αντικειμένου. Εάν μειωθούν τα σημεία, απαλείφονται αρκετές λεπτομέρειες και γενικεύεται το σχήμα, παραλείπονται ακμές κτλ. Από την άλλη, εάν μειωθεί ο όγκος της επιφάνειας, αλλάζει το σχήμα και το πλήθος των τριγώνων που την αποτελούν με αποτέλεσμα πάλι να χαθούν λεπτομέρειες που ίσως είναι απαραίτητες.

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί μείωση του πλήθους των τριγώνων, δίνοντας προτεραιότητα στη διατήρηση του σχήματος ή του εμβαδού τους. Στην περίπτωση που μελετάται εδώ, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *3DReshaper*. Δεν εφαρμόστηκε η διαδικασία σε όλη την έκταση της επιφάνειας θεωρώντας ότι κάποιες περιοχές όπως τα τόξα και οι κιονίσκοι περιέχουν πολύ σημαντική λεπτομέρεια. Έτσι, μειώθηκε ο όγκος των υπόλοιπων θεματικών επιπέδων

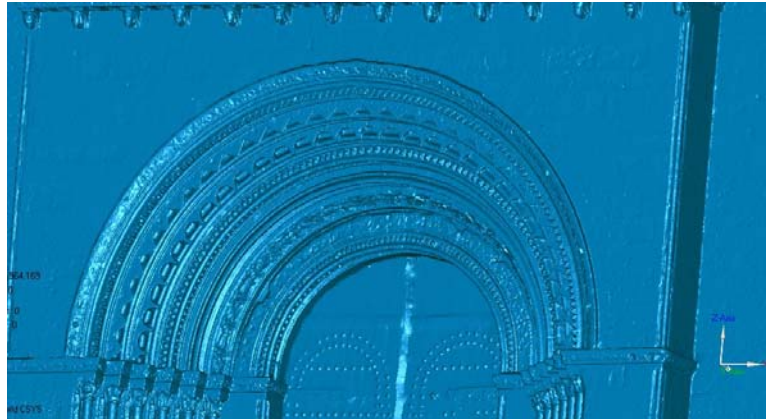
που αποτελούνται από πιο απλά στοιχεία (τοιχοί κτλ), αλλάζοντας το σχήμα των τριγώνων. Με αυτή τη διαδικασία, τα τρίγωνα απέκτησαν πιο οξείες γωνίες, αλλά το τελικό αποτέλεσμα δεν ήταν ιδιαίτερα αλλοιωμένο. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά χρονοβόρα, καθώς που απαιτούσε περίπου 10 λεπτά για μια επιφάνεια 800.000 τριγώνων. Τελικά, ο αριθμός των τριγώνων μειώθηκε από 10.500.000 σε 7.800.000, αλλά παρόλα αυτά το συνολικό αρχείο εξακολουθούσε να είναι δύσχρηστο για τις περισσότερες επεξεργασίες. Λίγα είναι τα λογισμικά που μπορούν να επεξεργαστούν το συνολικό μοντέλο, ακόμη και μετά από αυτή τη μείωση.

Στο λογισμικό *GSI Studio* και σε ισχυρό επεξεργαστή, έγινε δυνατό να ενωθεί η επιφάνεια σε ένα, ενιαίο θεματικό επίπεδο, χωρίς κενά, το οποίο μπορούσε να υποστεί διαχείριση σχετικά εύκολα (εικόνα 4.33). Αντίθετα, στα λογισμικά *Geomagic Studio*, *3DReshaper*, *Rapidform* η διαδικασία αυτή γινόταν από δύσκολη έως αδύνατη.



Εικόνα 4.33: Η επιφάνεια ενωμένη σε ένα θεματικό επίπεδο

Κατόπιν, έγιναν διάφορες δοκιμές περαιτέρω μείωσης της επιφανείας τόσο στο *Geomagic Studio* όσο και στο *GSI Studio*, ώστε να υπάρχει η επιφάνεια σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας (*levels of detail*). Κάποιες από αυτές τις δοκιμές τελικά δεν χρησιμοποιήθηκαν σε κανένα επόμενο στάδιο, καθώς δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις ακριβείας που αρχικώς είχαν τεθεί. Αντίθετα, κάποιες άλλες προσπάθειες έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα, όπως αυτή που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό *GSI Studio*, μειώνοντας τα τρίγωνα σε 2.000.000, χωρίς να χάνονται πολύτιμες λεπτομέρειες (εικόνα 4.34).



Εικόνα 4.34: Η decimated επιφάνεια απο το GSI Studio

4.8 Έλεγχος της επιφανείας

Σε όλα τα στάδια των μετρήσεων αλλά και της επεξεργασίας των δεδομένων υπεισέρχονται σφάλματα, τα οποία αθροιστικά, επηρεάζουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Συνοπτικά, αναφέρονται οι παρακάτω πηγές σφαλμάτων:

- Το τυχαίο σφάλμα του σαρωτή. Τα σφάλματα που μπορεί να οφείλονται στον σαρωτή έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 1 (§ 1.2).
- Το σφάλμα της συνένωσης των νεφών.
- Τα σφάλματα κατά την δημιουργία της επιφανείας (τριγωνισμός)
- Τα σφάλματα κατά τη διάρκεια της εξομάλυνσης, καθώς απαλείφονται λεπτομέρειες και αλλοιώνεται η θέση των κόμβων.
- Τα σφάλματα κατά την διάρκεια της μείωσης του αριθμού των τριγώνων.

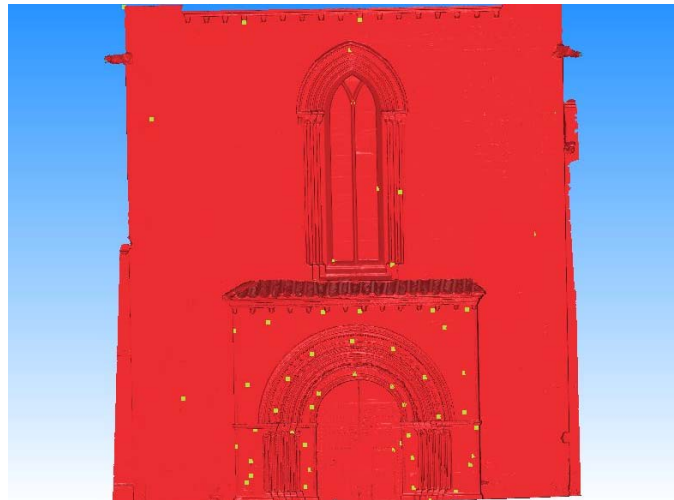
Για τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητος ο έλεγχος του τρισδιάστατου μοντέλου που δημιουργείται.

Ο έλεγχος της επιφανείας συμπεριλαμβάνει:

- τον οπτικό έλεγχο: Το μοντέλο πρέπει οπτικά να φαίνεται σωστό και να καλύπτει τις απαιτήσεις για τις λεπτομέρειες που απεικονίζει.
- τον έλεγχο της ακρίβειας: Το μοντέλο συγκρίνεται με μια άλλη επιφάνεια ή ένα νέφος σημείων και υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*RMS error*). Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται μέσω των λογισμικών πακέτων.

Στην περίπτωση του μοντέλου της *Puerta Romanica*, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ της επιφανείας και των σημείων που είχαν μετρηθεί με τον γεωδαιτικό σταθμό. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό *Geomagic Studio 10*, προσδιορίζοντας το μέτρο της απόστασης του κάθε σημείου από την επιφάνεια (προβολή). Η σύγκριση έγινε για τις επιφάνειες των 7.800.000, 2.000.000 και 760.000 τριγώνων. Πρόκειται για μια διαδικασία που απαιτεί πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ, ειδικά όταν το αρχείο που περιέχει το μοντέλο είναι αρκετά μεγάλο σε όγκο.

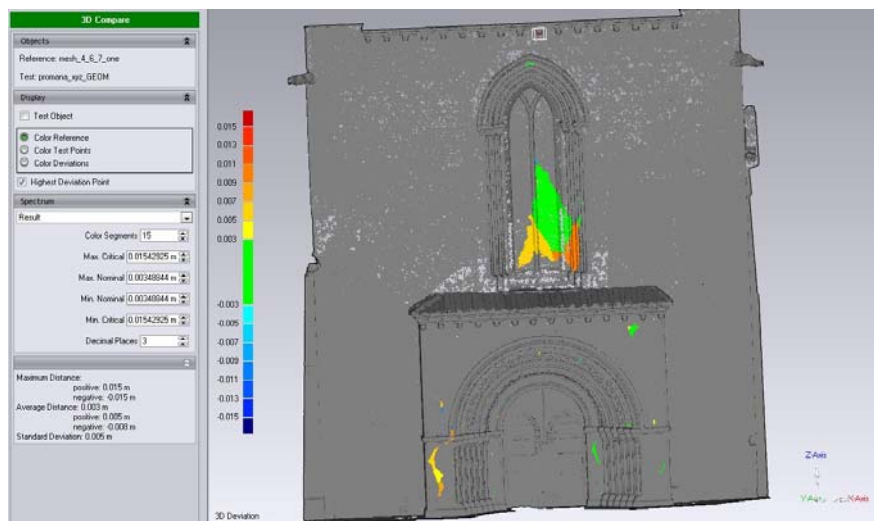
Από τα σημεία που μετρήθηκαν με το γεωδαιτικό σταθμό (66 εκ των οποίων οι 5 στόχοι) εξαιρέθηκαν σημεία με μεγάλη πιθανότητα σφάλματος κατά την μέτρησή τους (εξωτερικές γωνίες, περιοχές που είναι πιθανή η εκτροπή της ακτίνας) καθώς και οι τοποθετημένοι σε βαθράκια στόχοι (έξω από το αντικείμενο). Τελικά χρησιμοποιήθηκαν 57 σημεία για την σύγκριση με την εξής κατανομή:



Εικόνα 4.35: Η κατανομή των σημείων ελέγχου

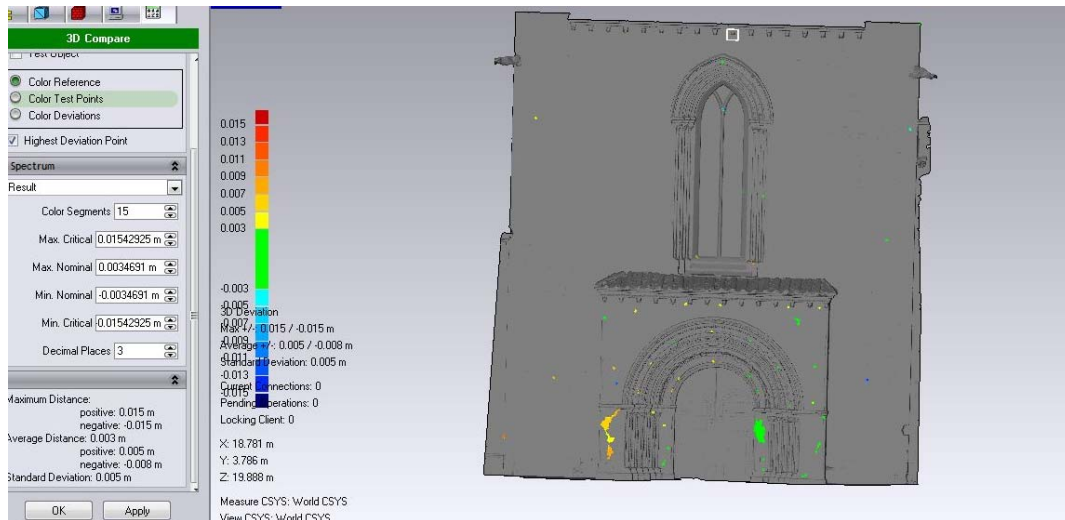
4.8.1 Σύγκριση στο Geomagic Studio

- Για την επιφάνεια των 7.800.000 τριγώνων, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν 0,005 m με μέγιστη θετική απόκλιση 0,015 m και μέγιστη αρνητική 0,015 m (εικόνα 4.36).



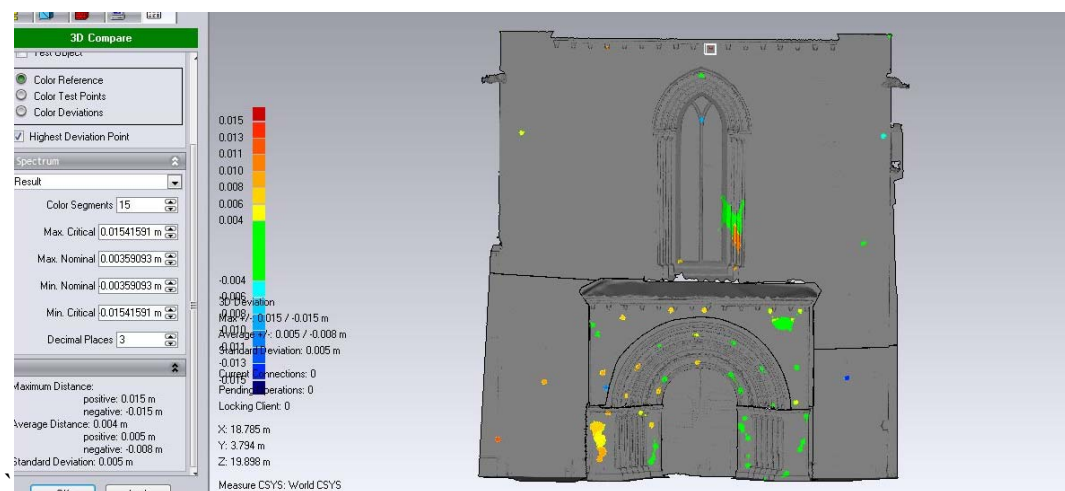
Εικόνα 4.36: Η σύγκριση της επιφάνειας υψηλής ανάλυσης στο Geomagic Studio

- Χρησιμοποιώντας ως επιφάνεια σύγκρισης την μειωμένη επιφάνεια που προέκυψε από το λογισμικό *GSI Studio*, την οποία αποτελούσαν περίπου 2.000.000 τρίγωνα, η διαδικασία ήταν ταχύτερη. Το τυπικό σφάλμα σε αυτή την περίπτωση ήταν 0,005 m και η μέγιστη απόκλιση είναι στο ίδιο με πριν σημείο και ίση με 0,015 m (εικόνα 4.37).



Εικόνα 4.37: Η σύγκριση της επιφάνειας 2.000.000 τριγώνων στο Geomagic Studio

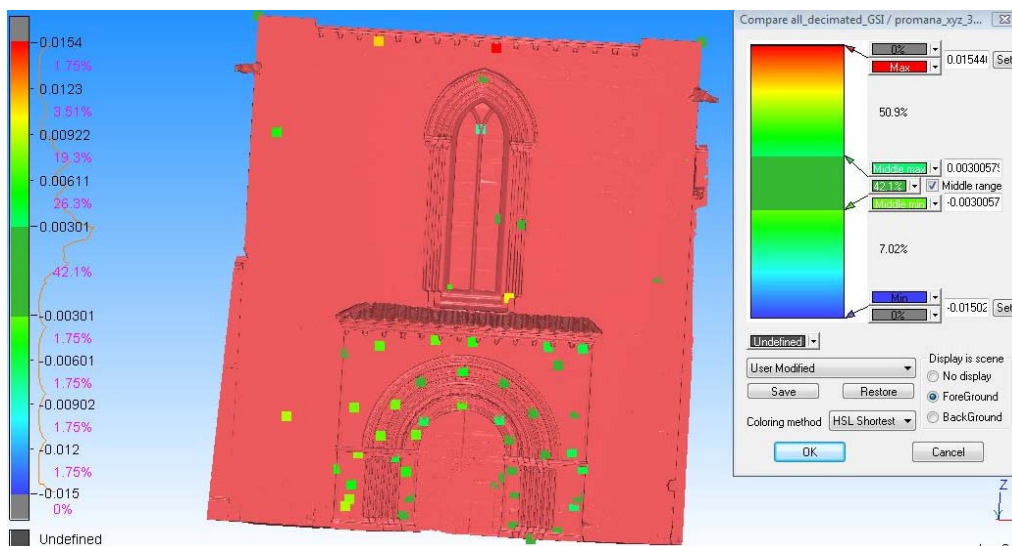
- Προσπαθώντας να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος υπολογισμού αυτής της σύγκρισης, δοκιμαστικά έγινε η ίδια διαδικασία χρησιμοποιώντας αρχεία στα οποία ο αριθμός των τριγώνων έχει μειωθεί και ο όγκος τους φτάνει το 1/10 (περίπου 760.000 τρίγωνα) του αρχικού. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το τυπικό σφάλμα είναι 0,005 m και η μέγιστη απόκλιση για το ίδιο σημείο είναι 15 mm (εικόνα 4.38).



Εικόνα 4.38: Η σύγκριση της επιφάνειας 760.000 τριγώνων στο Geomagic Studio

4.8.2 Σύγκριση στο 3DReshaper

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε στο λογισμικό 3DReshaper, όπου υπάρχει ανάλογο εργαλείο. Για την επιφάνεια των 2.000.000 τριγώνων τα αποτελέσματα ήταν ίδια με αυτά που προέκυψαν από το *Geomagic Studio* (εικόνα 4.39).



Εικόνα 4.39: Η σύγκριση της επιφάνειας υψηλής ανάλυσης με τα σημεία ελέγχου στο 3DReshaper

Το 3DReshaper, δίνει την δυνατότητα να εξαχθούν τα στατιστικά της σύγκρισης μεταξύ των σημείων και της επιφάνειας. Παρατηρώντας τα (πίνακας 4.3), φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις είναι στον άξονα των Y, ο οποίος βρίσκεται σχεδόν κάθετα στο επίπεδο της όψης.

Τα σφάλματα που προέκυψαν ήταν γενικά ικανοποιητικά λαμβάνοντας υπ όψιν όλα τα σφάλματα που υπεισέρχονται στην ροή των εργασιών.

Τρισδιάστατα Μοντέλα Αρχιτεκτονικά Σύνθετων Αντικειμένων

N-	Ref. X	Ref. Y	Ref. Z	Meas. X	Meas. Y	Meas. Z	Dev. X	Dev. Y	Dev. Z	Dev.	Comment
1	995,615	1019,682	119,599	995,615	1019,682	119,599	0	0	0	0	Projection on sur
2	1000,289	1018,866	118,897	1000,287	1018,856	118,892	-0,002	-0,01	-0,005	0,011	Projection on sur
3	996,609	1019,583	115,115	996,608	1019,578	115,115	-0,001	-0,005	0	0,005	Projection on sur
4	1008,921	1017,195	101,526	1008,921	1017,193	101,526	0	-0,002	0	0,002	Projection on sur
5	1008,211	1017,307	100,114	1008,211	1017,304	100,115	0	-0,003	0,001	0,003	Projection on sur
6	1007,256	1017,849	99,799	1007,256	1017,849	99,8	0	0	0,001	0,001	Projection on sur
7	1009,05	1017,169	102,671	1009,05	1017,165	102,67	0	-0,004	-0,001	0,004	Projection on sur
8	1008,788	1017,217	101,189	1008,788	1017,214	101,189	0	-0,003	0	0,003	Projection on sur
9	1007,605	1017,618	103,113	1007,605	1017,615	103,113	0	-0,003	0	0,003	Projection on sur
10	1008,591	1017,231	103,278	1008,591	1017,227	103,278	0	-0,004	0	0,004	Projection on sur
11	1007,08	1017,681	104,712	1007,08	1017,68	104,712	0	-0,001	0	0,001	Projection on sur
12	1005,863	1017,84	105,83	1005,863	1017,837	105,83	0	-0,003	0	0,003	Projection on sur
13	1004,244	1018,058	106,178	1004,244	1018,053	106,178	0	-0,005	0	0,005	Projection on sur
14	1004,549	1017,751	107,345	1004,548	1017,745	107,345	-0,001	-0,006	0	0,006	Projection on sur
15	1007,432	1017,355	107,336	1007,432	1017,351	107,336	0	-0,004	0	0,004	Projection on sur
16	1008,763	1017,176	107,336	1008,762	1017,172	107,336	-0,001	-0,004	0	0,004	Projection on sur
17	1007,873	1017,304	106,64	1007,873	1017,301	106,64	0	-0,003	0	0,003	Projection on sur
18	1008,625	1017,22	104,827	1008,625	1017,217	104,827	0	-0,003	0	0,003	Projection on sur
19	1010,938	1017,73	104,307	1010,941	1017,745	104,307	0,003	0,015	0	-0,015	Projection on sur
20	1012,758	1017,373	119,573	1012,758	1017,373	119,573	0	0	0	0	Projection on sur
21	1004,831	1018,276	118,899	1004,831	1018,265	118,888	0	-0,011	-0,011	0,015	Projection on sur
22	1012,467	1017,439	115,065	1012,469	1017,442	115,065	0,002	0,003	0	-0,004	Projection on sur
23	1011,612	1017,591	110,297	1011,612	1017,591	110,297	0	0	0	0	Projection on sur
24	1004,443	1018,484	117,717	1004,443	1018,484	117,717	0	0	0	0,001	Projection on sur
25	1004,601	1019,473	115,664	1004,603	1019,481	115,662	0,002	0,008	-0,002	-0,008	Projection on sur
26	1005,557	1019,324	112,202	1005,556	1019,323	112,202	-0,001	-0,001	0	0,001	Projection on sur
27	1006,324	1018,433	112,044	1006,324	1018,43	112,044	0	-0,003	0	0,003	Projection on sur
28	1004,447	1019,252	104,893	1004,449	1019,246	104,893	0,002	-0,006	0	0,006	Projection on sur
29	1005,974	1018,634	109,156	1005,969	1018,626	109,16	-0,005	-0,008	0,004	0,01	Projection on sur
30	1006,244	1019,032	102,103	1006,245	1019,032	102,103	0,001	0	0	-0,001	Projection on sur
31	1006,532	1018,97	102,424	1006,532	1018,968	102,424	0	-0,002	0	0,002	Projection on sur
32	1006,686	1018,958	101,534	1006,686	1018,957	101,534	0	-0,001	0	0,001	Projection on sur
33	1006,689	1018,972	100,337	1006,689	1018,97	100,337	0	-0,002	0	0,002	Projection on sur
34	1005,981	1019,548	101,849	1005,981	1019,546	101,849	0	-0,002	0	0,002	Projection on sur
35	1006,365	1018,982	103,626	1006,363	1018,981	103,625	-0,002	-0,001	-0,001	0,002	Projection on sur
36	1005,911	1019,04	104,362	1005,911	1019,039	104,359	0	-0,001	-0,003	0,003	Projection on sur
37	999,665	1018,428	106,662	999,665	1018,428	106,662	0	0	0	0	Projection on sur
38	1003,669	1019,613	109,35	1003,672	1019,608	109,353	0,003	-0,005	0,003	0,006	Projection on sur
39	999,667	1018,478	102,104	999,665	1018,473	102,103	-0,002	-0,005	-0,001	0,006	Projection on sur
40	1001,217	1018,499	103,49	1001,215	1018,492	103,49	-0,002	-0,007	0	0,007	Projection on sur
41	1001,92	1019,134	102,668	1001,919	1019,132	102,665	-0,001	-0,002	-0,003	0,004	Projection on sur
42	1002,451	1019,539	102,113	1002,45	1019,534	102,112	-0,001	-0,005	-0,001	0,006	Projection on sur
43	1003,015	1019,457	104,13	1003,014	1019,453	104,13	-0,001	-0,004	0	0,004	Projection on sur
44	1002,746	1019,492	103,602	1002,745	1019,485	103,602	-0,001	-0,007	0	0,007	Projection on sur
45	1002,632	1019,527	101,145	1002,632	1019,525	101,145	0	-0,002	0	0,002	Projection on sur
46	1002,433	1019,561	100,45	1002,433	1019,558	100,45	0	-0,003	0	0,003	Projection on sur
47	997,648	1019,554	104,043	997,647	1019,545	104,042	-0,001	-0,009	-0,001	0,009	Projection on sur
48	1000,114	1018,382	104,54	1000,113	1018,375	104,54	-0,001	-0,007	0	0,008	Projection on sur
49	1002,653	1018,28	105,696	1002,653	1018,278	105,696	0	-0,002	0	0,002	Projection on sur
50	1001,709	1018,423	104,752	1001,707	1018,416	104,752	-0,002	-0,007	0	0,007	Projection on sur
51	1000,968	1018,242	107,002	1000,967	1018,235	107,002	-0,001	-0,007	0	0,007	Projection on sur
52	1003,1	1017,949	107,341	1003,099	1017,942	107,342	-0,001	-0,007	0,001	0,007	Projection on sur
53	1000,364	1018,363	102,762	1000,362	1018,355	102,761	-0,002	-0,008	-0,001	0,008	Projection on sur
54	1000,175	1018,406	101,515	1000,176	1018,401	101,515	0,001	-0,005	0	0,005	Projection on sur
55	1000,153	1018,416	100,933	1000,154	1018,408	100,932	0,001	-0,008	-0,001	0,008	Projection on sur
56	1000,002	1018,431	100,672	1000	1018,422	100,672	-0,002	-0,009	0	0,009	Projection on sur
57	1000,258	1018,377	103,888	1000,261	1018,388	103,888	0,003	0,011	0	-0,011	Projection on sur

Πίνακας 4.3: Τα στατιστικά της σύγκρισης όπως προκύπτουν από το 3Dreshaper

4.9 Συμπεράσματα

Οι διαδικασίες που περιγράφηκαν παραπάνω, είναι η ροή εργασιών που συνηθίζεται να ακολουθείται σε περιπτώσεις περίπλοκων αρχιτεκτονικά αντικειμένων στα οποία απαιτείται μεγάλο επίπεδο λεπτομέρειας.

Σε καθένα από τα παρακάτω στάδια είναι πιθανό να χρειαστεί να επαναληφθούν κάποιες διαδικασίες ώστε να επιτευχθεί ένα αποδεκτό αποτέλεσμα. Το μεγαλύτερο πρόβλημα όμως που ο μελετητής καλείται να αντιμετωπίσει οφείλονται στον μεγάλο όγκο των δεδομένων σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα του αντικειμένου. Ακόμη και εάν χρησιμοποιηθούν ισχυροί επεξεργαστές, οι περισσότερες από τις παραπάνω διαδικασίες είναι δύσκολο να γίνουν και αν τελικά πραγματοποιηθούν είναι εξαιρετικά χρονοβόρες. Ειδικά για μη εξειδικευμένους χρήστες, ο χρόνος επεξεργασίας αυξάνεται, καθώς απαιτείται και ένα χρονικό διάστημα εξοικείωσης με τα διάφορα λογισμικά πακέτα και τις μεθοδολογίες που ακολουθούνται. Η ασυμβατότητα ορισμένων μορφών αρχείων δημιουργεί επίσης πολλά προβλήματα και μπορεί να καθυστερήσει σημαντικά την όλη διαδικασία.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα στάδια της επεξεργασίας, τα αντίστοιχα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν όπως και προσεγγιστικά ο χρόνος επεξεργασίας και εξοικείωσης με τα λογισμικά στην εφαρμογή αυτή:

	ΣΤΑΔΙΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	ΩΡΕΣ ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗΣ	ΩΡΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ
1	Συνένωση νεφών	<i>Cyclone</i>	10-12	2-3
2	Καθάρισμα , Οργάνωση νεφών, Φιλτράρισμα	<i>Cyclone, 3DReshaper</i>	80-90	8-10
3	Μοντελοποίηση	<i>3DReshaper, Geomagic</i>		
4	Εξομάλυνση επιφανείας	<i>3DReshaper</i>		
5	Διόρθωση	<i>Geomagic, 3DReshaper, GSI</i>		100-110
6	Μείωση όγκου δεδομένων	<i>3DReshaper, GSI, Geomagic</i>		8-10
7	Έλεγχος ακρίβειας επιφανείας	<i>Geomagic, 3DReshaper</i>		12-15

Πίνακας 4.4: Τα λογισμικά και ο χρόνος που απαιτήθηκε για την εφαρμογή αυτή

5 *Επένδυση του μοντέλου*

5.1 Εισαγωγή

Στις περισσότερες εφαρμογές είναι επιθυμητή η φωτορεαλιστική απεικόνιση των δεδομένων που συλλέχθηκαν, και αυτό γιατί συνήθως είναι το μόνο προϊόν που ενδιαφέρει το εμπορικό και γενικά το μη ειδικό κοινό. Τα φωτορεαλιστικά μοντέλα συνδυάζουν την γεωμετρική ακρίβεια του σχεδίου με την οπτική-ποιοτική πληροφορία της εικόνας. Σκοπός βέβαια, ειδικά εάν πρόκειται για κάποιο μνημείο, είναι να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις για διάδοση και διαδραστικές εφαρμογές, αλλά ταυτόχρονα θα είναι ακριβές τόσο γεωμετρικά όσο και ραδιομετρικά, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης.

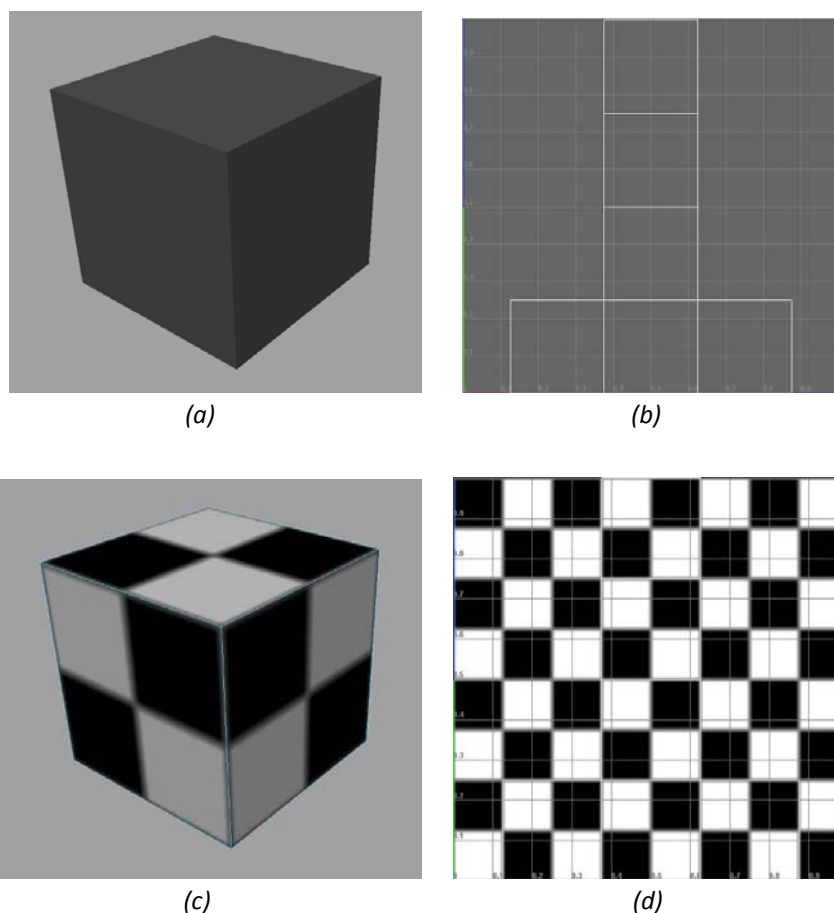
Στα πρώτα στάδια εξέλιξης αυτής της τεχνολογίας δηλαδή στην δεκαετία 1990-2000, τα τρισδιάστατα μοντέλα περιορίζονταν σε πλέγματα πολυγώνων (*wireframe*) μικρών σε μέγεθος αντικειμένων συνήθως χρησιμοποιώντας λογισμικά *CAD*. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας είναι δυνατόν να προστεθεί υφή και σκίαση στα μοντέλα. Παρόλα αυτά εξακολουθεί να απαιτείται μείωση του όγκου των δεδομένων, έτσι ώστε να είναι εύκολα διαχειρίσιμα ακόμα και από τους ισχυρούς υπολογιστές, με όποιες επιπτώσεις στην ακρίβεια των προϊόντων επιφέρει αυτό.

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η τρισδιάστατη επιφάνεια είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί ως πολυγωνικό πλέγμα (*wireframe model*), αποδίδοντας μόνο τις ακμές της επιφανείας με σημεία, γραμμές και καμπύλες. Μπορεί ακόμα να αναπαρασταθεί στην οθόνη του υπολογιστή ως σκιασμένο μοντέλο (*shaded model*). Το σκιασμένο μοντέλο μπορεί να είναι είτε επίπεδο (*flat*) είτε εξομαλυμένο (*smoothed*). Ο τρόπος αυτός οπτικοποίησης βασίζεται στην οπτική θεωρία του *Lambert* και σήμερα υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι που τον υλοποιούν στα λογισμικά *3D*. Τέλος, το *3D* μοντέλο μπορεί να αποδοθεί και με υφή (χρώμα φωτορεαλιστικό ή άλλο), δημιουργώντας το επενδεδυμένο μοντέλο (*textured model*) [Remondino, 2003].

Η επένδυση του τρισδιάστατου μοντέλου συνήθως αφορά στην απόδοση χρώματος πάνω σε αυτό με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ραδιομετρικά σωστό. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ένα φωτορεαλιστικό μοντέλο. Η απόδοση του χρώματος, γίνεται με την βοήθεια φωτογραφιών χαμηλής ή υψηλής ανάλυσης που μπορεί να

έχουν ληφθεί από διάφορες γωνίες. Ωστόσο, η υφή που αποδίδεται στο μοντέλο, δεν είναι απαραίτητο να είναι πραγματικό χρώμα, αλλά μπορεί να είναι και ένταση εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (*intensity*), υψομετρικές διαφορές κτλ. Η διαδικασία αυτή στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται ως *texture mapping*.

Για να τοποθετηθεί σωστά η υφή (*texture*) στο μοντέλο χρησιμοποιούνται *UV maps*. Αντίθετα με τα X, Y, Z, που είναι οι συντεταγμένες του μοντέλου στον τρισδιάστατο χώρο, “U” και “V” είναι οι συντεταγμένες των κόμβων του μετασχηματισμένου αντικειμένου. Το *UV mapping* μετασχηματίζει την τρισδιάστατη επιφάνεια σε μια επίπεδη εικόνα η οποία χρησιμοποιείται για να συνδέσει την πληροφορία της υφής (από 3D σε 2D). Πρόκειται ουσιαστικά για ένα ενός είδους ανάπτυγμα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει αυτόματα με αλγορίθμους κάποιου λογισμικού ή να την εκτελέσει χειροκίνητα ο 3D artist, ή ακόμη και συνδυαστικά. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα *UV maps* είναι τα *height maps*, *normal maps*, *displacement maps*, *light maps*, *specular* και *bump maps*. Από τη στιγμή που δημιουργείται ένα *UV map*, προστίθεται χρώμα πάνω σε αυτό και στη συνέχεια προβάλλεται πάλι στο τρισδιάστατο μοντέλο [Lerma et al., 2008].



Εικόνα 5.1: (a) Κύβος χωρίς υφή, (b) UV διάγραμμα (layout), (c) Κύβος με υφή, (d) Πληροφορία υφής
 Πηγή: [Lerma et al., 2008]

Συνήθως αυτό αποτελεί το τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας επειδή απαιτεί το μοντέλο να έχει λεία υφή, χωρίς λάθη ή κενά. Συνιστά το πιο ενδιαφέρον -ίσως- μέρος της, καθώς οι μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσουν όλες τις απαιτήσεις των επιστημόνων.

Από τα λογισμικά που διατίθενται στο εμπόριο αυτή τη στιγμή, λίγα είναι σε θέση να δημιουργήσουν φωτορεαλιστικά μοντέλα και ακόμη λιγότερα είναι αυτά που μπορούν να δώσουν σωστά αποτελέσματα, ειδικά για περίπλοκες επιφάνειες και για πολλές φωτογραφίες ταυτόχρονα. Ουσιαστικά, η γενική ιδέα των αλγορίθμων αυτών είναι συνήθως η υλοποίηση ενός μετασχηματισμού (*orthographic projection*) μεταξύ της εικόνας και του αντικειμένου, δηλαδή από 2D σε 3D. Σε κάθε εικονοστοιχείο (*pixel*) του μοντέλου αποδίδεται το χρώμα που έχει η φωτογραφία στην αντίστοιχη θέση. Περισσότερες πληροφορίες για αυτά που αναφέρονται παραπάνω μπορεί κανείς να αναζητήσει στον Remondino [2003]. Η διαδικασία αυτή ουσιαστικά αντικαθιστά τη δημιουργία *UV maps*, απλοποιώντας κατά πολύ την όλη επεξεργασία και συντομευόντάς την. Το τελικό αποτέλεσμα βέβαια της επένδυσης εξαρτάται από την ανάλυση των εικόνων που χρησιμοποιούνται, την πολυπλοκότητα της επιφάνειας, την ποιότητα των αρχικών δεδομένων κ.ά.

Πολλές έρευνες έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια με σκοπό την δημιουργία ενός φωτορεαλιστικού, τρισδιάστατου μοντέλου του αντικειμένου που θα αναπαριστά πλήρως και με ακρίβεια την πραγματικότητα στο περιβάλλον του ηλεκτρονικού υπολογιστή, αλλά ταυτόχρονα θα είναι κατάλληλο για διάδοση μέσω διαδικτύου. Οι μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί συνδυάζουν τεχνικές φωτογραμμετρίας, όρασης υπολογιστών (*computer vision*) και *computer graphics* και για να εφαρμοστούν υλοποιούν αλγορίθμους από διάφορα λογισμικά, εμπορικά ή ελεύθερα, ακόμη και *script* γραμμένα σε προγραμματιστικό περιβάλλον.

Αφού επενδυθεί καταλλήλως το τρισδιάστατο μοντέλο, μπορεί να δημιουργηθεί ένα βίντεο (*animation*), μια ακολουθία δηλαδή από σκηνές αναπαράστασης του μοντέλου σε ένα λογισμικό που επεξεργάζεται δεδομένα 3D. Το φωτορεαλιστικό μοντέλο εμφανίζεται από ποικίλες οπτικές γωνίες και υπό διάφορες κλίμακες. Βεβαίως, δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένα βίντεο με μεγάλο επίπεδο λεπτομέρειας, καθώς τα αρχεία που προκύπτουν καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο και η υπολογιστική ισχύς των υπολογιστών δεν επιτρέπει ακόμη την διαχείριση (*display, load, interaction etc.*) τέτοιων δεδομένων. Για την παραγωγή λοιπόν των απαραίτητων για διάδοση και διαδραστικές εφαρμογές βίντεο συνήθως χρησιμοποιούνται μοντέλα χαμηλής ανάλυσης, δίνοντας περισσότερο βάρος στην ραδιομετρία (χρώμα) και όχι τόσο στη γεωμετρία.

Παρακάτω, αναλύονται οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την απόδοση υφής σε τρισδιάστατο αντικείμενο, με την βοήθεια διαφόρων λογισμικών, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή στη Ρωμανική Πύλη. Παρουσιάζονται τα προβλήματα που προέκυψαν σε αυτή την περίπτωση και προτείνεται μια εναλλακτική και -ίσως-

ορθότερη μεθοδολογία βασισμένη στο *UV mapping* που αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ [Valanis et al., 2010].

5.2 Επένδυση μοντέλου υψηλής ανάλυσης

Τα περισσότερα λογισμικά δίνουν την δυνατότητα επένδυσης ενός τρισδιάστατου μοντέλου μέσω διάφορων αλγορίθμων (*3DReshaper*, *Rapidform*, *Image Master* κτλ.). Μπορεί η διαδικασία να διεξάγεται σχετικά απλά, όμως υπάρχουν διάφορα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Αυτά τα προβλήματα αφορούν στην διαχείριση των μεγάλων σε όγκο αρχείων και στην μεταφορά τους από το ένα λογισμικό στο άλλο.

Σε ορισμένα λογισμικά, (λ.χ *Image Master*) κατά τη διαδικασία επένδυσης, είναι εξαιρετικά σημαντικό να δοθεί προσοχή στη γωνία με την οποία θα προβληθεί κάθε εικόνα πάνω στο μοντέλο, ώστε να μην αποδοθεί λάθος χρώμα στην επιφάνεια. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητο επίσης οι εικόνες οι οποίες χρησιμοποιούνται να είναι προσανατολισμένες (εσωτερικά και εξωτερικά). Το μοντέλο κάθε φορά στρέφεται έτσι ώστε να είναι υπό τη γωνία που η κάμερα το έβλεπε κατά τη στιγμή της λήψης. Αντίθετα, άλλα λογισμικά (*3DReshaper*) διαθέτουν -ίσως- πιο εξελιγμένους αλγορίθμους, με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται να προσανατολιστούν οι εικόνες, ούτε να ελέγχεται κάθε φορά η γωνία με την οποία θα προβληθούν πάνω στο μοντέλο.

Κάθε φορά μπορεί να χρησιμοποιηθούν μια ή περισσότερες εικόνες για την επένδυση του μοντέλου. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιηθούν περισσότερες από μια εικόνες, είναι πολύ δύσκολο το αποτέλεσμα να είναι σωστό, καθώς δεν μπορεί να ελεγχθεί με ποιον τρόπο οι αλγόριθμοι επιλέγουν την εικόνα που θα επενδύσει κάθε υποπεριοχή. Η ανομοιομορφία συνήθως έγκειται σε ραδιομετρικές διαφορές, κενά ή περιοχές με εντελώς λάθος χρώμα. Χρησιμοποιώντας λογισμικά επεξεργασίας εικόνων όπως το *Adobe Photoshop*, μπορεί να επιτευχθεί η διόρθωση μερικών τέτοιων λαθών, αλλά τις περισσότερες φορές ούτε αυτό επιφέρει τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Συνήθως, μετά τη δημιουργία της επιφάνειας τα αρχεία που προκύπτουν καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο στο δίσκο. Όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται, ως ένα βαθμό, με την κατάτμηση και οργάνωση της επιφάνειας σε θεματικά επίπεδα. Μόνο με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν λοιπόν να πραγματοποιηθεί και η επένδυση, ειδικά για σύνθετες επιφάνειες.

Για την εφαρμογή που μελετάται εδώ, και από την οποία εξήχθησαν πολλά από τα παραπάνω συμπεράσματα, προφανώς χρειάστηκε να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα. Η επιφάνεια (πάνω από 7.500.000 τρίγωνα) ήταν ήδη οργανωμένη σε διάφορα θεματικά επίπεδα. Μετά από σύντμηση ορισμένων από αυτά, προέκυψαν τελικά 8 νέα:

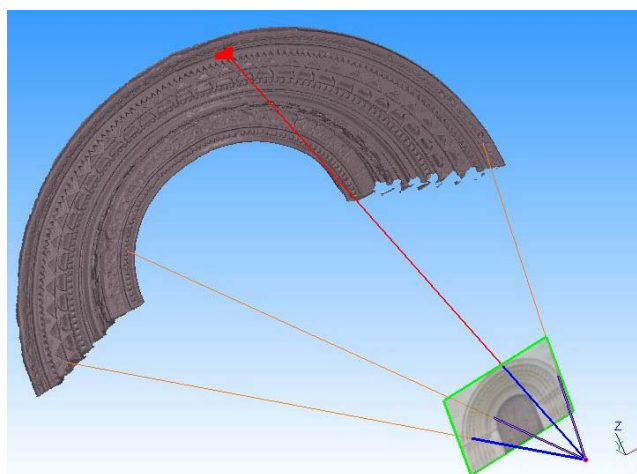
ΟΝΟΜΑ ΘΕΜΑΤΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙ
<i>Upper</i>	Επάνω τμήμα (παράθυρο, φορούσια, υδρορροές, τοίχος)
<i>Above arches</i>	Περιοχή επάνω από τα τόξα και κεφαλές
<i>Left wall</i>	Κατώτερο τμήμα αριστερού τοίχου
<i>Right wall</i>	Κατώτερο τμήμα δεξιού τοίχου
<i>Columns right</i>	Δεξιοί κιονίσκοι
<i>Columns left</i>	Αριστεροί κιονίσκοι
<i>Door</i>	Ξύλινη είσοδος
<i>Arches</i>	Τόξα

Πίνακας 5.1: Τα 8 θεματικά επίπεδα που προέκυψαν μετά την ένωση των αρχικών

Η επένδυση του τρισδιάστατου μοντέλου της *Puerta Romanica* πραγματοποιήθηκε στα λογισμικά *3DReshaper* και *Image Master* χρησιμοποιώντας και τα μοντέλα υψηλής ανάλυσης (πάνω από 7.500.000 τρίγωνα συνολικά) και διάφορα μειωμένα σε όγκο μοντέλα, όπως αυτό που προέκυψε από το *GSI Studio* με 2.000.000 τρίγωνα.

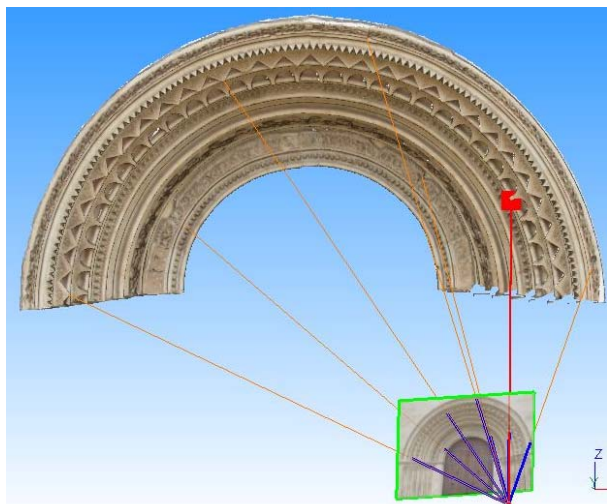
5.2.1 Επένδυση στο 3DReshaper

Στο λογισμικό αυτό είναι ιδιαίτερα εύκολη η διαδικασία της επένδυσης, καθώς υλοποιείται απλώς ένας προβολικός μετασχηματισμός από τις δύο διαστάσεις (εικόνα) στις τρεις (μοντέλο) (εικόνα 5.2). Αρκεί να επιλεγθούν πολύ προσεκτικά τουλάχιστον τρία ομόλογα σημεία μεταξύ της εικόνας και του μοντέλου, αλλά όσο πιο πολλά σημεία επιλέγονται τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα.



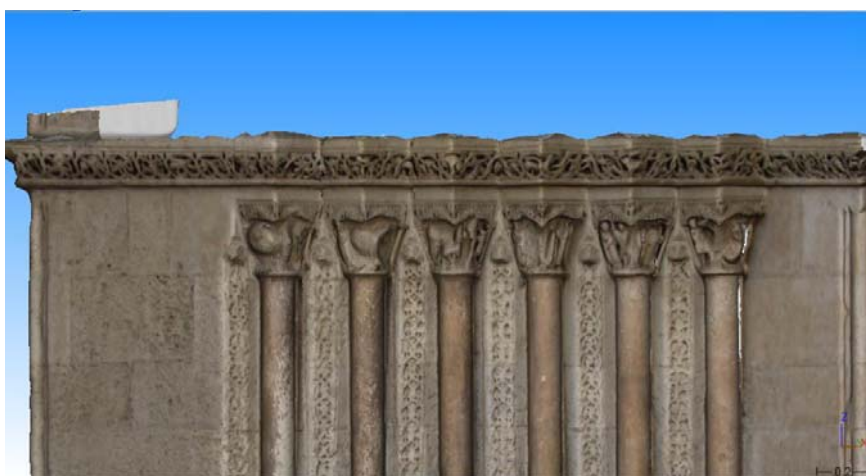
Εικόνα 5.2: Ο προβολικός μετασχηματισμός που υλοποιεί το λογισμικό

Στην εφαρμογή αυτή επιλέχθηκαν από έξι έως δώδεκα ομόλογα σημεία, ανάλογα με το πόσο εύκολη ήταν η επιλογή αυτή (εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Η επενδεδυμένη επιφάνεια μετά τον προβολικό μετασχηματισμό

Σε αυτό το σημείο θεωρείται σκόπιμο να αναφερθεί ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις φωτογραφίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν (να έχουν παρόμοια ραδιομετρία και να καλύπτουν πλήρως το τμήμα της επιφάνειας που πρέπει να επενδυθεί) οι οποίες πρέπει να μην είναι πολύ υψηλής ανάλυσης, γιατί αλλιώς το λογισμικό δεν μπορεί να τις επεξεργαστεί. Στην εφαρμογή που μελετάται εδώ, το λογισμικό διαχειρίστηκε εικόνες ανάλυσης μέχρι 10 MPixel (από την μηχανή *Canon PowerShot G11*). Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιήθηκαν δύο εικόνες για να επενδυθεί πλήρως ένα θεματικό επίπεδο. Ύστερα από αρκετές δοκιμές και κατάλληλες επιλογές εικόνων και ομόλογων σημείων, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά στα περισσότερα τμήματα του μοντέλου (εικόνα 5.4). Παρ' όλα αυτά, δημιουργήθηκαν ορισμένες λευκές περιοχές ή περιοχές όπου το χρώμα δεν είναι σωστό. Η προβολή περισσότερων από δύο εικόνων δημιούργησε ασυνέχειες στη ραδιομετρία (εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.4: Λεπτομέρεια του textured model με καλά αποτελέσματα



Εικόνα 5.5: Οι ραδιομετρικές ασυνέχειες που συνήθως προκαλούνται μετά την προβολή δύο εικόνων στο μοντέλο

Τα επενδεδυμένα μοντέλα που δημιουργήθηκαν, αποτελούσαν αρκετά μεγάλα σε όγκο αρχεία και δύσκολα διαχειρίσιμα δεδομένα. Στο *3DReshaper* ήταν δυνατό να εμφανιστεί μια ή το πολύ δύο επενδεδυμένες επιφάνειες την ίδια στιγμή.

Από το λογισμικό *3DReshaper* εξήχθησαν σε μορφή αρχείου *.obj*, αλλά υπήρχε πρόβλημα στη μεταφορά των αρχείων από το ένα λογισμικό στο άλλο, καθώς δεν αναγνώριζαν όλα το *texture* της επιφάνειας. Στο λογισμικό *Rapidform* κατέστη δυνατό να εμφανιστούν ορισμένες επιφάνειες με την επένδυσή τους όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6.



Εικόνα 5.6: Τα *textured models* που μπορούν να απεικονιστούν την ίδια χρονική στιγμή

5.2.2 Επένδυση στο *Image Master*

Όταν δημιουργείται ένα *texture model* στο λογισμικό αυτό, το αποτέλεσμα είναι μια επενδεδυμένη εικόνα του μοντέλου από μια επιλεγμένη οπτική γωνία και όχι το ανάπτυγμα της. Αυτό σημαίνει ότι οι περιοχές που δεν είναι ορατές από την συγκεκριμένη οπτική δεν επενδύονται σωστά [Valanis et al., 2009]. Είναι πολύ σημαντικό λοιπόν, να έχει επιλεγθεί το σωστό *view* για κάθε επιφάνεια πριν την προβολή της εικόνας πάνω σε αυτή.

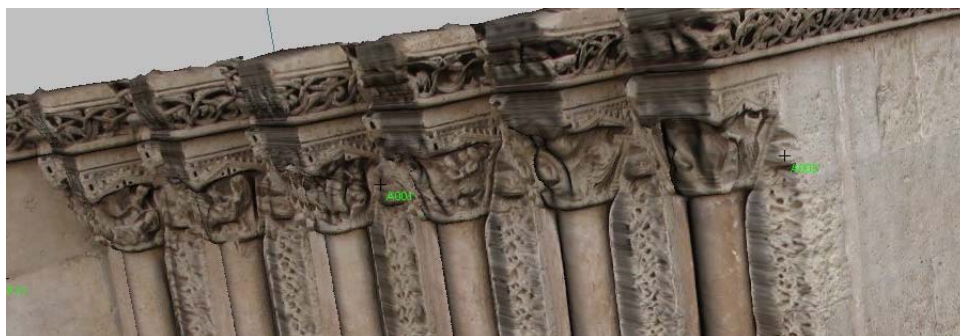
Το *Image Master* είναι από τα λίγα φωτογραμμετρικά λογισμικά τα οποία επιτρέπουν στο χρήστη να εισαγάγει ένα *DTM* σε μορφή *.dxf* ή *.tin*. Η επένδυση του τρισδιάστατου μοντέλου γίνεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, μέσα από φωτογραμμετρικά προσανατολισμένες εικόνες.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, προσανατολίστηκαν για αυτό το σκοπό οι φωτογραφίες που είχαν ληφθεί με την *Canon PowerShot G11*, οι οποίες είναι μικρά σε όγκο αρχεία. Ο προσανατολισμός των φωτογραφιών, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, ήταν αρκετά δύσκολος, λόγω του έντονου αναγλύφου του αντικειμένου, των ελλειπών επικαλύψεων και μεγάλων στροφών, αλλά και της αβεβαιότητας με την οποία είχαν μετρηθεί τα φωτοσταθερά. Ύστερα από πολλές δοκιμές, επιτεύχθηκαν αποδεκτά αποτελέσματα, καθώς οι προσανατολισμοί (εξωτερικοί) έκλειναν με σχετικά μικρά σφάλματα. Η διαδικασία προσανατολισμού των εικόνων θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 6.

Μετά τον προσανατολισμό των εικόνων και την κατάλληλη στροφή κατά ω , ϕ , κ του μοντέλου, το λογισμικό μπορεί να δημιουργήσει αυτόματα την επενδεδυμένη τρισδιάστατη επιφάνεια. Τα αποτελέσματα σε πολλές περιπτώσεις ήταν αποδεκτά, γενικά όμως ήταν χειρότερα από αυτά που προέκυψαν από το *3DReshaper*, ειδικά όταν χρησιμοποιούνταν περισσότερες από μια φωτογραφίες (εικόνες 5.7, 5.8).



Εικόνα 5.7: Λεπτομέρεια του textured model με καλά αποτελέσματα



Εικόνα 5.8: Στα σημεία που αποκρύπτονται στο view προβάλλεται λάθος χρώμα

Τα αρχεία μπορούν να εξαχθούν σε μορφή *.vrml* (αρχείο εικονικής πραγματικότητας) και να εισαχθούν σε κάποιο *viewer* όπως το *Cortona* ή το *Cosmo VRML*. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στο [Valanis et al., 2009].

5.3 Επένδυση μοντέλου χαμηλής ανάλυσης

Τα αρχεία που προκύπτουν μετά την επένδυση του μοντέλου στα διάφορα λογισμικά μέσω μεθοδολογιών, όπως αυτές που αναλύθηκαν παραπάνω, καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο στη μνήμη των υπολογιστών. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μην είναι κατάλληλα για περαιτέρω αξιοποίηση, όπως για διαδραστικές εφαρμογές ή διάδοση μέσω του διαδικτύου. Τα φωτορεαλιστικά μοντέλα που δημιουργούνται μπορούν απλώς να εμφανιστούν στην οθόνη του υπολογιστή μέσα σε κάποιο λογισμικό περιβάλλον διαχείρισης τρισδιάστατων δεδομένων. Για σύνθετες και μεγάλες σε όγκο δεδομένων επιφάνειες ούτε αυτό είναι δυνατό για μεγάλο επίπεδο λεπτομέρειας από τη στιγμή που δεν μπορούν να απεικονιστούν στην οθόνη του υπολογιστή ταυτόχρονα όλα τα θεματικά επίπεδα επενδεδυμένα.

Για να βελτιστοποιηθεί το αποτέλεσμα είναι απαραίτητο να υιοθετηθεί μια διαφορετική μεθοδολογία, η οποία θα συνδυάζει κλασσικές φωτογραμμετρικές διαδικασίες με αλγορίθμους που ήδη υπάρχουν σε διάφορα λογισμικά. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, γίνεται κατάλληλος συνδυασμός των αλγορίθμων που προσφέρονται. Παρακάτω αναλύεται μια τέτοια μεθοδολογία, η οποία έχει δώσει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα την πρώτη φορά που εφαρμόστηκε στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ για το Μνημείο του Ζαλόγγου [Valanis et al., 2010]. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί την επιφάνεια υψηλής ανάλυσης για να προβάλλει μέσω αυτής το χρώμα από τις φωτογραμμετρικά προσανατολισμένες εικόνες στα *UV maps* μιας επιφάνειας πολύ χαμηλότερης ανάλυσης.

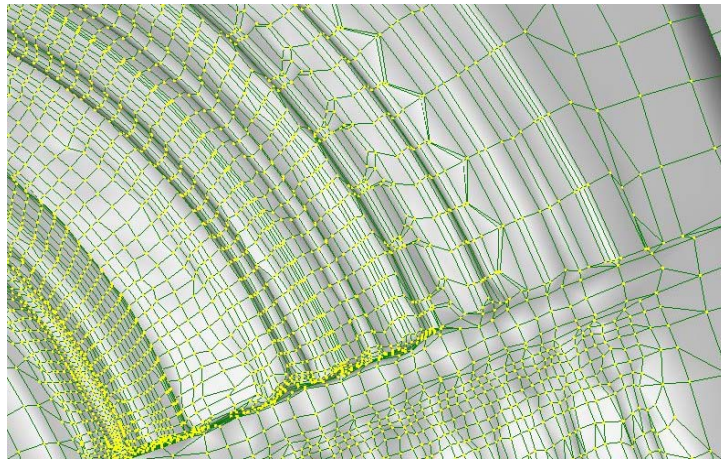
5.3.1 Δημιουργία προσεγγιστικής επιφάνειας (*c-mesh*)

Σε περιπτώσεις σύνθετων επιφανειών, η πυκνότητα σάρωσης συνήθως είναι αρκετά μεγάλη. Αυτό, ενώ μπορεί να έχει πολύ ακριβή αποτελέσματα και με μεγάλο επίπεδο λεπτομέρειας, δημιουργεί από την άλλη πλευρά τεράστια -για τα σημερινά δεδομένα- σε όγκο αρχεία. Επειδή το *UV mapping* είναι το ανάπτυγμα της επιφάνειας με σκοπό να αποδοθεί χρώμα σε αυτή, πρέπει ο αριθμός των κόμβων να είναι αρκετά μικρός ώστε να είναι εύκολα διαχειρίσιμα. Υπάρχει βέβαια πάντα η δυνατότητα αυτόματης μείωσης του όγκου των δεδομένων της επιφάνειας με διάφορους αλγορίθμους που προσφέρουν τα λογισμικά (όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4) που μπορεί να δώσουν πολύ καλά αποτελέσματα. Όμως, εκτός από την ρύθμιση ορισμένων παραμέτρων, δεν δίνεται η δυνατότητα από το χρήστη να ελέγξει αυτή την διαδικασία.

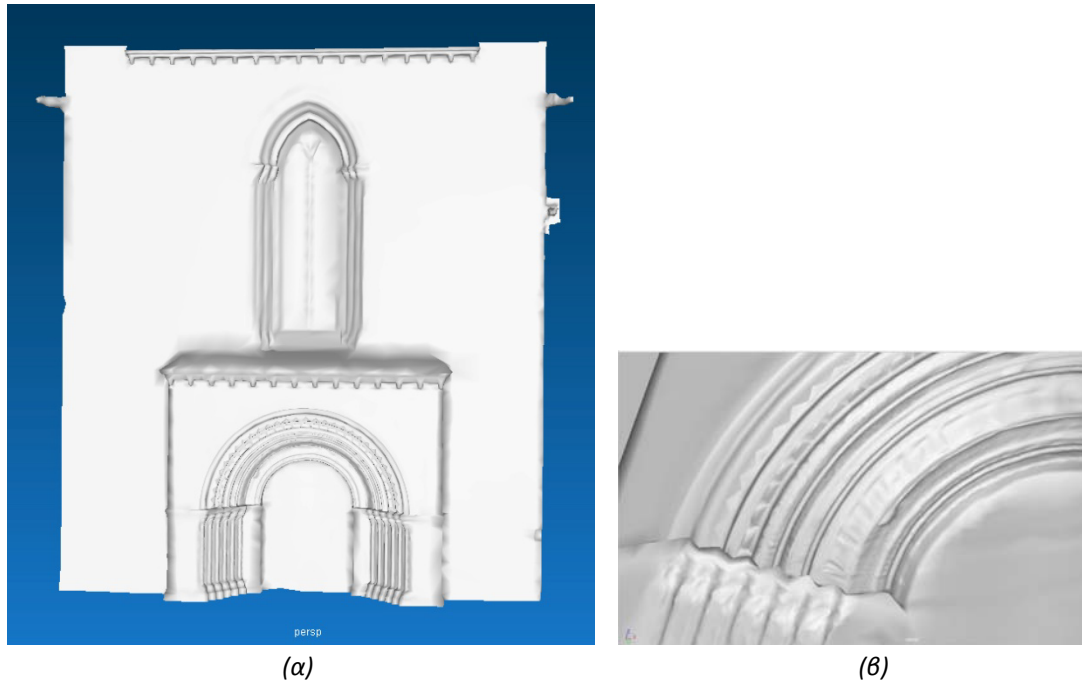
Γι' αυτό το λόγο, προτιμάται να δημιουργείται μια προσεγγιστική επιφάνεια (*constrained mesh* ή *c-mesh*), η οποία είναι κατά πολύ μικρότερη της αρχικής (ακόμα και της μειωμένης). Πρόκειται για μια επιφάνεια που σχεδιάζεται χειροκίνητα, στο περιβάλλον ορισμένων λογισμικών 3D. Αποτελείται από απλά γεωμετρικά σχήματα, συνήθως τετράπλευρα και όπου αυτό δεν είναι δυνατό, τρίγωνα και όλα τα στοιχεία που σχεδιάζονται είναι επίπεδα [Valanis et al., 2010].

Για τη δημιουργία της προσεγγιστικής επιφάνειας για την *Puerta Romanica*, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *GSI Studio*. Τοποθετώντας κόμβους που εφάπτονται στην αρχική επιφάνεια, δημιουργήθηκαν τετράπλευρα και όπου αυτό δεν ήταν δυνατό λόγω πολυπλοκότητας της επιφάνειας, τοποθετήθηκαν τρίγωνα. Η όλη διαδικασία έγινε χειροκίνητα, εκτός από την τοπική αυτόματη πύκνωση των κόμβων σε επιλεγμένες περιοχές και επαναλήφθηκε αρκετές φορές μέχρι να επιτευχθεί το κατάλληλο αποτέλεσμα (εικόνα 5.9).

Η τελική προσεγγιστική επιφάνεια αποτελούνταν από περίπου 49.000 πολύγωνα, δηλαδή είχε μειωθεί σχεδόν στο 1/200 της αρχικής (εικόνα 5.10α). Βέβαια, τα τετράπλευρα και τα τρίγωνα ήταν πολύ πιο πυκνά σε περιοχές που περιλάμβαναν λεπτομέρειες όπως στα τόξα και στα φορούσια (εικόνα 5.10β). Σε ομαλές περιοχές όπως λ.χ οι τοίχοι, τα τετράπλευρα ήταν αρκετά μεγάλα και ομοιόμορφα, δίνοντας μια λεία υφή στην επιφάνεια.



Εικόνα 5.9: Το πολυγωνικό πλέγμα που δημιουργήθηκε



(α) (β)
Εικόνα 5.10: (α) Η c-mesh (β) λεπτομέρεια από τα τόξα της c-mesh

5.3.2 Δημιουργία UV Texture Map

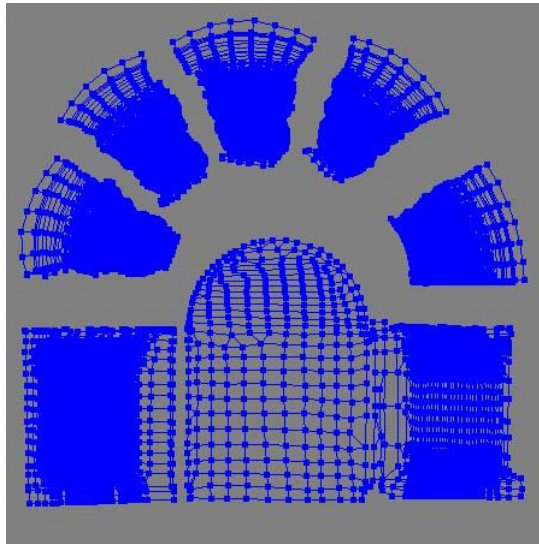
Όπως ειπώθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, το *UV mapping* είναι το ανάπτυγμα της επιφάνειας σε δυο διαστάσεις. Όσο λιγότερους κόμβους περιέχει μια επιφάνεια, τόσο πιο εύκολο είναι να πραγματοποιηθεί επιτυχώς η διαδικασία. Η προσεγγιστική επιφάνεια αποτελείται από πολύ λιγότερους κόμβους από την αρχική, πράγμα που διευκολύνει και επιταχύνει σημαντικά την διαδικασία. Επίσης τα τετράπλευρα που σχηματίζουν τη *c-mesh* είναι πολύ πιο εύκολο να υποστούν επεξεργασία από τα τρίγωνα της αρχικής επιφάνειας.

Στην εφαρμογή αυτή, η προσεγγιστική επιφάνεια που δημιουργήθηκε εισήχθη στο λογισμικό *Deep UV* της εταιρείας *Right Hemisphere*, ώστε να αναπτυχθεί σε 2D. Για να είναι εύκολα διαχειρίσιμο το πολυγωνικό πλέγμα, χωρίστηκε στα παρακάτω τέσσερα θεματικά επίπεδα:

ΟΝΟΜΑ ΘΕΜΑΤΙΚΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ	ΠΕΡΙΟΧΗ ΠΟΥ ΠΕΡΙΓΡΑΦΕΙ
<i>window</i>	Παράθυρο
<i>up</i>	Επάνω τμήμα τοίχου και υδρορροές
<i>down</i>	Κατώτερο τμήμα τοίχου
<i>arch</i>	Τόξα, ξύλινη είσοδος και κιονίσκοι

Πίνακας 5.2: Τα θεματικά επίπεδα που δημιουργήθηκαν για το *texture map*

Τα παραπάνω τμήματα της επιφάνειας αναπτύχθηκαν αυτόματα σε ένα επίπεδο (εικόνα 5.11). Μετά την δημιουργία του αναπτύγματος, απαραίτητη ήταν η –άλλοτε χειροκίνητη και άλλοτε αυτόματη- επεξεργασία, ώστε να αναπτυχθεί πλήρως η επιφάνεια και να μην αποκρύπτονται πολύγωνα. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά χρονοβόρα και απαιτεί πολλές δοκιμές έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 5.11: Το ανάπτυγμα ενός θεματικού επιπέδου

Τα αρχεία εξάγονται τελικά σε μορφή *.obj*.

5.3.3 Προσανατολισμός των φωτογραφιών

Για την εφαρμογή αυτής της διαδικασίας, είναι απαραίτητο να προσανατολιστούν με φωτογραμμετρικές διαδικασίες (εσωτερικά – εξωτερικά) όλες οι εικόνες από τις οποίες πρόκειται να προβληθεί χρώμα στο μοντέλο.

Στην περίπτωση που μελετάται εδώ, είχε προηγηθεί ο προσανατολισμός των εικόνων στο λογισμικό *Image Master*, με σκοπό την επένδυση του μοντέλου μέσα στο περιβάλλον αυτό. Σε αυτό το στάδιο όμως προσανατολίστηκαν και άλλες φωτογραφίες που είχαν προκύψει με την *Canon PowerShot G11* και με την *Canon Mark III*, ώστε να καλύπτονται πλήρως όλες οι περιοχές του μοντέλου. Συνολικά προσανατολίστηκαν 68 εικόνες.

5.3.4 Δημιουργία textured *.obj* μέσω αλγορίθμου

Οι προσανατολισμένες εικόνες πρέπει να προβληθούν πάνω στο μοντέλο, ώστε μέσω αυτής της προβολής να αποδοθεί χρώμα σε κάθε κόμβο του. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω ενός αλγορίθμου σχεδιασμένου στο προγραμματιστικό περιβάλλον του *MatLab*, ο

οποίος είχε αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του ΕΜΠ [Valanis et al., 2010].

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τις παραμέτρους του προσανατολισμού κάθε εικόνας και την εξίσωση συγγραμμικότητας για να απομονώσει την περιοχή του μοντέλου του αντικειμένου που είναι ορατή από κάθε εικόνα. Λαμβάνει επίσης υπ' όψιν τον προσανατολισμό της επιφάνειας ώστε να αποκλείονται αναδιπλωμένα ή κακώς απεικονισμένα τρίγωνα. Στη συνέχεια, μέσω ενός αρχείου *.obj* συνδέεται κάθε ορατός κόμβος της επιφάνειας με την αρχική εικόνα. Έτσι, για κάθε εικόνα δημιουργείται ένα αρχείο *.obj* που περιλαμβάνει την ορατή περιοχή του μοντέλου και η κάθε εικόνα συνδέεται με αυτό το αρχείο ώστε να αποτελεί το αντίστοιχο *texture map*. Όλες οι προσανατολισμένες εικόνες υπέστησαν αυτήν την επεξεργασία, και προβλήθηκαν επάνω στην προσεγγιστική επιφάνεια των 49.000 πολυγώνων (εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.12: Η προβολή των εικόνων στην επιφάνεια μέσω του αλγορίθμου

5.3.5 Rendering (απόδοση)

Κατά τον Patias [2001], ο όρος *rendering*, είναι η διαδικασία δημιουργίας μιας εικόνας του μοντέλου στο περιβάλλον του υπολογιστή.

Μετά από την προβολή των εικόνων επάνω στην *c-mesh*, είναι απαραίτητο να προβληθούν και στα *UV map* της. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει σε κάποιο λογισμικό που έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει *rendered* μοντέλα. Η διαδικασία αυτή συνήθως πρέπει να επαναληφθεί περισσότερες από μια φορές, έτσι ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός εικόνων που τελικά θα συνθέσουν το *rendered model*.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *3DStudio Max* της *Autodesk*, προβάλλοντας το χρώμα από τα *.obj* που προέκυψαν από το *MatLab* στο *UV map*. Μετά από αυτή την διαδικασία, προέκυπταν αρχεία *.obj* τα οποία

συνδέονται με μια εικόνα *.tif* για κάθε ένα από τα θεματικά επίπεδα που συνθέταν τα *texture maps*.

Με αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκαν μικρότερα *texture maps*, που ενώθηκαν όλα μαζί (*blending*) στο λογισμικό *Adobe Photoshop* (εικόνα 5.13).



Εικόνα 5.13: Η *rendered* εικόνα ενός τμήματος του μοντέλου

5.4 Εικονική περιήγηση στο μοντέλο (Animation)

Το *animation* ενός τρισδιάστατου μοντέλου αποτελεί μια συνέχεια σκηνών (*frames*) που έχουν προέλθει από την απεικόνιση του σε ένα 3D λογισμικό. Είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, καθώς προσφέρει εικονική περιήγηση στο αντικείμενο μελέτης. Εάν πρόκειται για κάποιο μνημείο, βοηθά ιδιαίτερα στη διάδοση του μέσω διαδικτύου. Για να είναι όμως εφικτό κάτι τέτοιο, θα πρέπει τα αρχεία να είναι αρκετά μικρά σε μέγεθος και εύκολα διαχειρίσιμα. Συνήθως, αυτή η ακολουθία σκηνών είναι μικρής διάρκειας, της τάξεως των μερικών λεπτών.

Για να δημιουργηθεί ένα *animation*, είναι απαραίτητο να έχει προηγηθεί η διαδικασία του *rendering* στο μοντέλο (με απόδοση πραγματικής υφής ή όχι) και να οριστεί η οπτική γωνία υπό την οποία θα εμφανίζεται αυτό σε κάθε σκηνή. Οι τεχνικές *computer graphics* δίνουν επιπλέον την δυνατότητα να σχεδιαστεί το εικονικό περιβάλλον στο οποίο θα βρίσκεται το μοντέλο, να επιλεγθεί ο φωτισμός, να προστεθούν διάφορα εφέ κτλ. Η δεδομένη υπολογιστική ισχύς όμως δεν επιτρέπει την επεξεργασία μεγάλων σε όγκο αρχείων, γι' αυτό και είναι πολύ σημαντικό τα αρχεία που θα χρησιμοποιηθούν να είναι μικρά.

Εδώ, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *3DStudio Max*, και δημιουργήθηκε ένα βίντεο εικονικής περιήγησης στο επενδεδυμένο μοντέλο, όπως αυτό είχε δημιουργηθεί με την διαδικασία του *rendering* στο προηγούμενο στάδιο. Δημιουργήθηκαν 1800 σκηνές του μοντέλου, από διάφορες οπτικές γωνίες (αρχεία *.tga*). Μετά την ένωσή τους, προέκυψε βίντεο διάρκειας περίπου ενός λεπτού.

5.5 Συμπεράσματα

Για περιπτώσεις απλών και σχετικά μικρών σε μέγεθος αντικειμένων, τα αποτελέσματα που δίνουν τα εμπορικά λογισμικά με τρόπο ανάλογο με αυτόν που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2 είναι αρκετά ικανοποιητικά.

Εφαρμόζοντας τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.3, είναι δυνατόν να παραχθούν λεπτομερή *texture maps* για μεγάλα και περίπλοκα αντικείμενα, με σημαντική μείωση του όγκου των αρχείων. Επίσης, αντιμετωπίζεται έτσι εν μέρει και η ασυμβατότητα των μορφών αρχείων, καθώς μετά από αυτή την επεξεργασία τα μοντέλα μπορεί να εξαχθούν σε πολλές μορφές αρχείων (π.χ. *vrmf*) που είναι συμβατές με διάφορα λογισμικά ή απλούς *web viewers*.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας ήταν ικανοποιητικά, ωστόσο η διαδικασία αυτή αποδείχθηκε πολύ χρονοβόρα, καθώς χρησιμοποιήθηκαν διάφορα λογισμικά τα οποία απαιτούσαν αρκετό χρόνο εξοικείωσης. Πολλές από τις παραπάνω διαδικασίες επαναλήφθηκαν πολλές φορές, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι αποδεκτό. Την ροή των εργασιών καθυστερούσε επίσης και η ασυμβατότητα των αρχείων. Στο πλαίσιο βελτιστοποίησης της μεθοδολογίας, απαιτείται η αυτοματοποίηση με ανάπτυξη νέων αλγορίθμων ορισμένων από τις διαδικασίες που την συνιστούν, ώστε να μειωθεί δραστικά ο χρόνος επεξεργασίας.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα στάδια της επεξεργασίας, τα αντίστοιχα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν όπως και προσεγγιστικά ο χρόνος επεξεργασίας και εξοικείωσης με τα λογισμικά στην εφαρμογή αυτή:

	ΣΤΑΔΙΟ	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	ΩΡΕΣ ΕΞΟΙΚΕΙΩΣΗΣ	ΩΡΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ
1	Δημιουργία προσεγγιστικής επιφάνειας	<i>GSI Studio</i>	30-40	40-50
2	Δημιουργία <i>UV Texture Map</i>	<i>Deep UV</i>	30-40	40-50
3	Προσανατολισμός των φωτογραφιών	<i>Image Master</i>	30-40	70-80
4	Δημιουργία <i>textured .obj</i> μέσω αλγορίθμου	<i>Matlab</i>	--	4-5
5	Rendering	<i>3DStudio Max</i>	10-15	5-10
6	Blending	<i>Adobe Photoshop</i>	2-4	10-15
7	Animation (δημιουργία σκηνών βίντεο)	<i>3DStudio Max</i>	5-10	1-2
8	Παραγωγή βίντεο (διάρκειας 1')		--	~1

Πίνακας 4.4 : Τα λογισμικά και ο χρόνος που απαιτήθηκε για αυτή τη ροή εργασιών

6 Παραγωγή Ορθοφωτογραφίας

6.1 Εισαγωγή

Παρόλο που οι σαρωτές *laser* συλλέγουν πλήθος σημείων τα οποία περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία την επιφάνεια του σαρωμένου αντικειμένου, δεν είναι δυνατόν να ειπωθεί ακόμα ότι είναι σε θέση να αντικαταστήσουν πλήρως τις παραδοσιακές φωτογραμμετρικές διαδικασίες και τα παράγωγά τους, δηλαδή τις ορθοφωτογραφίες μεγάλης κλίμακας, τα γραμμικά σχέδια, τις οψοτομές κ.ά.

Επειδή όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η συλλογή των σημείων από τον σαρωτή γίνεται τυχαία και υπεισέρχονται διάφορα σφάλματα στη διαδικασία αυτή, είναι δύσκολο να περιγραφούν σωστά περιοχές ακμών και λοιπά γραμμικά στοιχεία. Σε αυτό ακριβώς το σημείο η φωτογραμμετρία υπερέχει, καθώς είναι ο πλέον ακριβής τρόπος να εξαχθούν γραμμικά στοιχεία, ιδιαίτερα εάν αυτά είναι σαφώς καθορισμένα και στην πραγματικότητα. Επομένως ο συνδυασμός της κλασσικής φωτογραμμετρίας με τις μεθόδους επίγειας σάρωσης με σαρωτές *laser* μπορεί να δώσει το πληρέστερο δυνατό αποτέλεσμα για μια γεωμετρική τεκμηρίωση αντικειμένου.

Η ανάλυση της φωτογραμμετρικής μεθοδολογίας δεν είναι ο κύριος στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η επεξεργασία με φωτογραμμετρικές μεθόδους αποτέλεσε, ωστόσο, σημαντικό κομμάτι της όλης διαδικασίας, καθώς αυτές οι εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για την επένδυση του τρισδιάστατου μοντέλου. Με σκοπό την πλήρη γεωμετρική τεκμηρίωση του αντικειμένου θεωρήθηκε απαραίτητο να εξαχθούν και ορισμένες ψηφιακές ορθοφωτογραφίες.

6.2 Προαπαιτούμενα - Προεπεξεργασία

Η μονοεικονική διαδικασία της παραγωγής ψηφιακής ορθοφωτογραφίας προϋποθέτει την ύπαρξη ψηφιακού μοντέλου της επιφανείας (*DSM*), του αντικειμένου δηλαδή που πρόκειται να απεικονιστεί στην ορθοφωτογραφία. Το ψηφιακό αυτό μοντέλο μπορεί να έχει συλλεχθεί με κλασσικές φωτογραμμετρικές διαδικασίες (αυτόματη ή χειροκίνητη συλλογή σε στέρεο μετά τους προσανατολισμούς των εικόνων) ή να έχει προκύψει από μεθόδους σάρωσης.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση και για λόγους οικονομίας χρόνου χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου που είχε προκύψει από τον επίγειο σαρωτή *laser*. Το ψηφιακό μοντέλο αυτό, αν και δύσχρηστο λόγω του μεγάλου όγκου των αρχείων, ήταν πολύ πιο λεπτομερές και πυκνό από οποιοδήποτε *DSM* που μπορεί να είχε προκύψει φωτογραμμετρικά.

- Με σκοπό την παραγωγή ψηφιακών ορθοφωτογραφιών που να απεικονίζουν μεγάλο τμήμα ή και ολόκληρη την Πύλη (κλίμακας 1:50 ή και μικρότερης), χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες που είχαν ληφθεί από σχετικά μακρινή απόσταση με την *Canon Mark III*. Με αυτόν τον τρόπο παράχθηκαν ορθοφωτογραφίες για το κατώτερο τμήμα της Πύλης, αλλά και για το παράθυρο επάνω από αυτήν. Ακόμη, για να αναδειχθούν οι λαξευμένες λεπτομέρειες στην περιοχή των τόξων και των κιονίσκων, παράχθηκαν ορισμένες ορθοφωτογραφίες κλίμακας 1:25 από κοντινότερες λήψεις με την *Canon PowerShot*.

Δεδομένου ότι το μέγεθος της εδαφοψηφίδας (*Ground Sampling Distance* ή *groundel*) που θα έχει η ορθοφωτογραφία ισούται με:

1/10 mm * ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΟΡΘΟΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑΣ

ισχύει:

Μηχανή	Κλίμακα Ορθοφωτογραφίας	Groundel
Canon Mark III	1:50	5 mm
Canon PowerShot	1:25	2.5 mm

Πίνακας 6.1: Το μέγεθος της εδαφοψηφίδας στην αντίστοιχη κλίμακα

Έγινε έλεγχος εάν είναι δυνατό να προκύψει τέτοια κλίμακα από αυτές τις φωτογραφίες:

Μηχανή	f	Κλίμακα Αρχικής (1/κ)	Pixel size	Pixel size*κ	Κ οριακή Ο/Φ	Αποτέλεσμα ελέγχου
Canon Mark III	52 mm	1:300	6.41 μm	2 mm	5	OK
Canon PowerShot	12 mm	1:250	2 μm	0.5 mm	10	OK
Canon PowerShot	6.1 mm	1:800	2 μm	1.6 mm	20	OK

Πίνακας 6.2: Έλεγχος οριακών κλιμάκων τελικών ορθοφωτογραφιών

Στο εκτυπωμένο φωτομωσαϊκό σύμφωνα με την διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου ματιού (0.25 mm) γίνονται αποδεκτές αποκλίσεις μικρότερες από:

Κλίμακα	Επιθυμητή ακρίβεια
1:50	13 mm
1:25	7 mm

Πίνακας 6.3: Η ακρίβεια που πρέπει να έχουν οι τελικές ορθοφωτογραφίες

- Για την παραγωγή της ψηφιακής ορθοφωτογραφίας είναι απαραίτητο να οριστεί ένα σύστημα αναφοράς στο οποίο θα γίνει η προβολή. Ως σύστημα αναφοράς ορίστηκε το τοπικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς που είχε οριστεί κατά τη διάρκεια των μετρήσεων των περίπου 60 σημείων με τον γεωδαιτικό σταθμό. Στις επίγειες εφαρμογές, όταν πρόκειται για όψη ή τομή αντικειμένου, είναι απαραίτητο να προηγηθεί στροφή του συστήματος συντεταγμένων, έτσι ώστε οι άξονες X και Y να σχηματίζουν ένα επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο στο οποίο θα γίνει η προβολή και ο άξονας Z να είναι κάθετος σε αυτό το επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται οι παραμορφώσεις λόγω της προβολής. Η στροφή των σημείων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό *MatLab*.

6.3 Φωτογραμμετρική επεξεργασία

Η φωτογραμμετρική επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό *Topcon Image Master*. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, το λογισμικό αυτό είναι από τα λίγα που δίνουν την δυνατότητα στο χρήστη να εισαγάγει ψηφιακό μοντέλο αντικειμένου σε μορφή *.dxf* ή *.tin*. Οι προσανατολισμοί των εικόνων πραγματοποιήθηκαν όχι μόνο για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας, αλλά και με σκοπό την απόδοση υψών στο μοντέλο, με την διαδικασία που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (§ 5.2.2). Δημιουργήθηκαν πολλά διαφορετικά *project*, καθένα από τα οποία αφορούσε σε μια περιοχή του αντικειμένου. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε με χωρικά και τοπολογικά κριτήρια όπως είχε γίνει και η οργάνωση των θεματικών επιπέδων των νεφών σημείων και των επιφανειών, έτσι ώστε να είναι ευκολότερα διαχειρίσιμα τα δεδομένα. Στο λογισμικό επίσης εισήχθησαν και τα σημεία λεπτομερειών που είχαν μετρηθεί με τον γεωδαιτικό σταθμό, με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως φωτοσταθερά.

6.3.1 Εσωτερικός προσανατολισμός

Ο εσωτερικός προσανατολισμός των εικόνων πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή των στοιχείων της γεωμετρίας της μηχανής, όπως αυτά προέκυψαν από την βαθμονόμηση (*Canon Mark III*) ή όπως δίδονται από τον κατασκευαστή (*Canon PowerShot*). Τα στοιχεία της μηχανής *Canon PowerShot*, δεν δίνονται με ικανοποιητική ακρίβεια και ούτε μπορούν να θεωρηθούν απολύτως αξιόπιστα και πλήρη, αφού πρόκειται για μια απλή, *compact* μηχανή, χωρίς σταθερή εσωτερική γεωμετρία. Για την διαστροφή του φακού δεν δινόταν από τον κατασκευαστή κάποια τιμή και θεωρήθηκε αμελητέα, κάτι που προφανώς, επηρέασε σε ένα βαθμό τα αποτελέσματα. Επίσης, κατά τη διάρκεια των λήψεων με την *Canon PowerShot*, άλλαξε η εστιακή απόσταση του φακού αρκετές φορές (*zoom in – zoom out*). Για κάθε φωτογραφία ελέγχθηκε η τιμή της εστιακής απόστασης του φακού μέσω του λογισμικού *Canon EOS Digital Photo Professional* και τοποθετήθηκε η σωστή τιμή στο *Image Master*. Αρχικά, αυτές οι εικόνες με αυτή την φωτογραφική μηχανή είχαν

ληφθεί με σκοπό την επένδυση του τρισδιάστατου μοντέλου, αλλά τελικά χρησιμοποιήθηκαν και για την ορθοφωτογραφία, αφού αυτές που είχαν ληφθεί με την *Canon Mark III*, δεν ήταν αρκετές.

6.3.2 Εξωτερικός προσανατολισμός

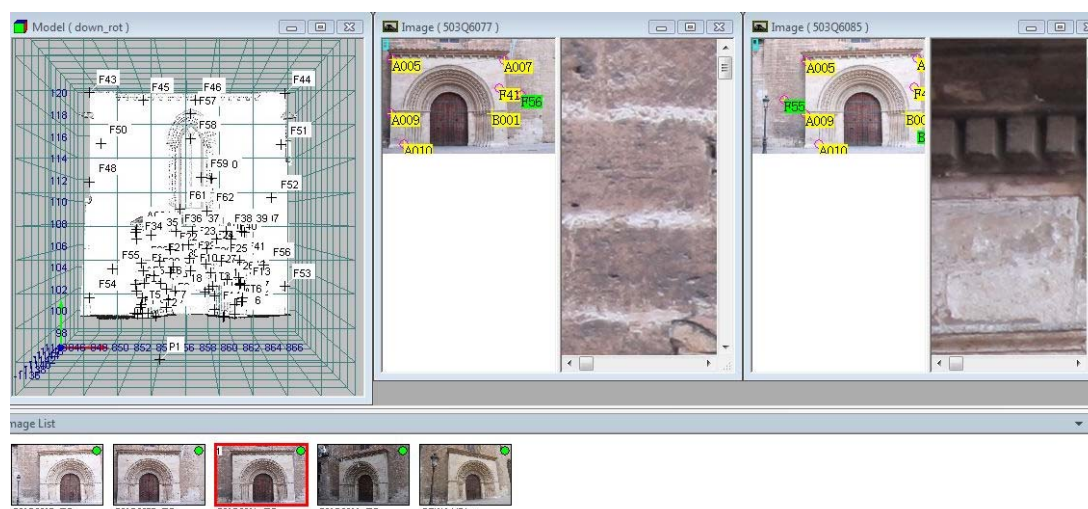
Στη συνέχεια κάθε εικόνα προσανατολίστηκε εξωτερικά, σκοπεύοντας σε αυτήν τουλάχιστον 4 σημεία με γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες. Τα σημεία αυτά ήταν είτε φωτοσταθερά είτε σημεία που σκοπεύτηκαν απ' ευθείας στο μοντέλο στο περιβάλλον του λογισμικού (εικόνα 6.1).

Σε αυτό το σημείο σημειώνεται ότι η στροφή του τρισδιάστατου μοντέλου από το γεωδαιτικό σύστημα σε αυτό που είναι παράλληλο με το επίπεδο της όψης έγινε στο *Image Master*, μέσω ενός αλγορίθμου μετασχηματισμού συντεταγμένων.

Η επίλυση του τριγωνισμού έγινε με την μέθοδο των δεσμών (*bundle adjustment*).

Η διαδικασία αυτή ήταν αρκετά δύσκολη και χρονοβόρα, καθώς οι γωνίες στροφής μεταξύ των εικόνων ήταν μεγάλες και το ανάγλυφο το αντικείμενου έντονο. Τα αποτελέσματα της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας επηρέασε αρνητικά και το γεγονός ότι τα σημεία λεπτομερειών που χρησιμοποιήθηκαν ως φωτοσταθερά είχαν μετρηθεί με μεγάλη αβεβαιότητα.

Οι επιλύσεις του εξωτερικού προσανατολισμού είχαν γενικά καλά αποτελέσματα, δηλαδή το σφάλμα τους ήταν κάτω από 1.5 cm στις μακρινές και κάτω από 1 cm στις κοντινές. Το σφάλμα των σχετικών προσανατολισμών μεταξύ των εικόνων υπερέβαινε το όριο του 1/3 του pixel (έφτανε έως 1.5 pixel).



Εικόνα 6.1: Παράδειγμα προσανατολισμού φωτογραφιών

Παρ' όλα αυτά, το λογισμικό *Image Master*, φάνηκε ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση αυτή, καθώς είχε προηγηθεί και μια προσπάθεια προσανατολισμού των εικόνων στο λογισμικό *Racurs PhotoMOD*, με καθόλου ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης, σε αυτό το λογισμικό ήταν αδύνατο να εισαχθεί το *DSM* που είχε προέλθει από την επεξεργασία των δεδομένων του σαρωτή και έπρεπε να παραχθεί φωτογραμμετρικά. Γι' αυτούς τους λόγους, αλλά και για οικονομία χρόνου, θεωρήθηκε προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό *Image Master*.

6.4 Σύνταξη φωτομωσαϊκών

Αφού παραχθούν όλες οι απαραίτητες ορθοφωτογραφίες που συνθέτουν το προς αποτύπωση αντικείμενο, συντάσσονται τα σχέδια (φωτομωσαϊκά) που αποτελούν σύνθεση των επί μέρους ορθοφωτογραφιών σε ένα ενιαίο σχέδιο και τυπώνονται υπό την απαιτούμενη κλίμακα.

Σε αυτή την περίπτωση, δημιουργήθηκε ένα φωτομωσαϊκό που απεικονίζει το κατώτερο τμήμα της Πύλης και τυπώθηκε σε κλίμακα 1:50. Το σχέδιο περιλαμβάνεται στο τέλος του τεύχους.

Τα εκτυπωμένα φωτομωσαϊκά είναι απαραίτητο να ελέγχονται, για να διαπιστωθεί εάν καλύπτουν τις απαιτήσεις ακριβείας που είχαν τεθεί αρχικά. Ο έλεγχος αυτός αφορά τόσο την ραδιομετρία, όσο και την γεωμετρία.

Για το σχέδιο που τυπώθηκε σε αυτή την εφαρμογή, αρχικά έγινε οπτικός έλεγχος της ραδιομετρίας. Ακολούθησε η επίθεση του σχεδίου στο σχέδιο που περιείχε τα σημεία που είχαν μετρηθεί με το γεωδαιτικό σταθμό (λογισμικό *AutoCAD*) και διαπιστώθηκε ότι τα υπόλοιπα κυμαίνονταν από 1cm έως 2.5 cm.

7 Συμπεράσματα

7.1 Χρήση τρισδιάστατων μοντέλων για αποτύπωση αντικειμένων

Τα τρισδιάστατα μοντέλα, όπως αυτά προκύπτουν από την επεξεργασία δεδομένων που έχουν συλλεχθεί με σαρωτές *laser* μπορούν να περιγράψουν με μεγάλη λεπτομέρεια και ακρίβεια ακόμη και περίπλοκα αρχιτεκτονικά αντικείμενα. Αυτά τα *3D models* μπορεί να φέρουν πληροφορία όχι μόνο για την γεωμετρία αλλά και για την υφή του αντικειμένου (φωτορεαλισμός) και μπορούν να οπτικοποιηθούν σε βίντεο. Λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων τους, χρησιμοποιούνται όλο και συχνότερα σε εφαρμογές αρχιτεκτονικής, αποτύπωσης μνημείων, κατασκευών, τοπογραφικών αποτυπώσεων, βιομηχανίας, ελέγχου ποιότητας, *reverse engineering* κτλ.

Σκοπός των μετρήσεων είναι να συλλεχθεί ένα πυκνό νέφος σημείων, έτσι ώστε να καταγράφονται όλες οι λεπτομέρειες του αντικειμένου. Η διαδικασία αυτή απαιτεί:

- Προσεκτικό προγραμματισμό. Ανάλογα με το είδος του προς αποτύπωση αντικειμένου, πρέπει να επιλεγεί κατάλληλος σαρωτής, ώστε να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός όγκου μετρημένων σημείων και χρόνου εργασιών. Επίσης πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις θέσεις σάρωσης, ώστε να καλύπτεται όσο το δυνατόν πληρέστερα το μοντέλο. Είναι απαραίτητο, ακόμη να τοποθετηθούν αρκετοί στόχοι και με σωστή κατανομή, ώστε να γίνει ευκολότερα η συνένωση των νεφών σημείων.
- Εξειδικευμένο συνεργείο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα χονδροειδούς λάθους και ο χρόνος εργασιών.
- Εξοπλισμό υψηλού κόστους (σαρωτής, total station, φωτογραφική μηχανή). Οι εφαρμογές με επίγειους σαρωτές *laser* μέχρι στιγμής είναι εφικτές μόνο σε έργα που διαχειρίζονται μεγάλοι φορείς όπως λ.χ. επιστημονικά ιδρύματα ή ιδιαίτερα εξειδικευμένες ιδιωτικές εταιρείες.
- Αρκετό χρόνο για ολοκλήρωση των μετρήσεων (ιδιαίτερα των σαρώσεων), ανάλογα με την πολυπλοκότητα, το μέγεθος του αντικειμένου και το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας. Συνήθως απαιτούνται αρκετές ώρες ή και ημέρες.

Ωστόσο, η διαδικασία των σαρώσεων είναι σχεδόν αυτοματοποιημένη. Αντίθετα, η ροή των εργασιών επεξεργασίας των δεδομένων ώστε από το πυκνό -αλλά

ακανόνιστο- νέφος σημείων που συλλέχθηκε να προκύψει ένα ολοκληρωμένο 3D model, είναι ακόμα σε μεγάλο τμήμα της μη αυτοματοποιημένη και χρονοβόρα διαδικασία.

Προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν σε όλα τα στάδια επεξεργασίας, από την συνένωση των νεφών σημείων έως και την επένδυση του ολοκληρωμένου τρισδιάστατου μοντέλου και την οπτικοποίησή του σε βίντεο. Τα συνήθη προβλήματα που καλείται ο μελετητής να αντιμετωπίσει συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Έλλειψη ικανού αριθμού στόχων που προκαλεί μεγάλα σφάλματα στη συνένωση των νεφών.
- Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων συλλέγονται πολλά λάθος σημεία, τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν λάθη κατά τη δημιουργία της επιφάνεια. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται εν μέρει με την αφαίρεση του θορύβου, αλλά ακόμη και μετά από αυτή τη διαδικασία απομένουν τέτοια σημεία.
- Η αδυναμία σάρωσης ορισμένων περιοχών δημιουργεί μεγάλων διαστάσεων κενά στην επιφάνεια, τα οποία καλύπτονται αρκετά δύσκολα και το αποτέλεσμα δεν είναι πάντα ικανοποιητικό.
- Η απαλλαγή του μοντέλου από τα λάθη που δημιουργήθηκαν κατά τον τριγωνισμό είναι αρκετά χρονοβόρα και απαιτεί πολλές επαναλήψεις και δοκιμές για να επιτευχθεί επιθυμητό αποτέλεσμα (λεία υφή, χωρίς λάθη ή κενά).
- Η επένδυση του τρισδιάστατου μοντέλου αποτελεί θέμα έρευνας τα τελευταία χρόνια. Σχεδόν κανένα από τα διατιθέμενα εργαλεία δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις πολύ σύνθετων αντικειμένων.
- Ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος. Σε συνδυασμό με μια μέτρια υπολογιστική ισχύ, δυσχεραίνει και καθυστερεί την ροή των εργασιών. Ο μελετητής τις περισσότερες φορές καταφεύγει σε σημαντική μείωση του όγκου των δεδομένων. Η μείωση αυτή δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια του μοντέλου, απαλείφει ωστόσο αρκετές λεπτομέρειες.
- Η ασυμβατότητα των μορφών αρχείων. Η μεταφορά των δεδομένων από το ένα λογισμικό στο άλλο συνήθως απαιτεί πολλές μετατροπές στην μορφή των δεδομένων.
- Γενικά η ολοκλήρωση των εργασιών είναι χρονοβόρα. Ειδικά εάν το επίπεδο λεπτομέρειας είναι υψηλό η επεξεργασία μπορεί να διαρκέσει μήνες.
- Απαιτείται εξειδικευμένο προσωπικό, εξοικειωμένο με λογισμικά 3D.
- Το κόστος της επεξεργασίας είναι υψηλό, καθώς χρησιμοποιούνται αρκετά εμπορικά λογισμικά πακέτα.

7.1.1 Προτάσεις

- Η μέθοδος των σαρώσεων ως μέθοδος αποτύπωσης σύνθετων φυσικών ή τεχνητών αντικειμένων συνιστάται να εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις που απαιτείται υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας. Ακόμη και τότε, το βήμα της σάρωσης θα πρέπει να καθορίζεται έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ακριβείας και ανάλυσης λεπτομέρειας χωρίς να προκύπτει υπερβολικά μεγάλος όγκος δεδομένων. Ο όγκος αυτός θα είναι τελικά δύσχρηστος και θα μειωθεί κατόπιν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας.
- Απαιτείται αυτοματοποίηση του μεγαλύτερου τμήματος της διαδικασίας επεξεργασίας του μοντέλου, όπως λ.χ. η ανάπτυξη αλγορίθμων που αναγνωρίζουν αυτόματα τα αναδιπλωμένα τρίγωνα και τα αποβάλλουν. Οι αλγόριθμοι αυτοί θα επιτεχύνουν σημαντικά την όλη διαδικασία.
- Σε περιπτώσεις που τα αποτελέσματα που δίνουν τα λογισμικά κατά την επένδυση του μοντέλου δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις, είναι απαραίτητο να ακολουθείται κάποια άλλου είδους μεθοδολογία, όπως αυτή που αναπτύχθηκε και προτάθηκε παραπάνω (§5.3). Ακόμα όμως και τέτοιου είδους μεθοδολογίες, απαιτούν αυτοματοποίηση ορισμένων διαδικασιών τους, ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος επεξεργασίας.
- Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ασυμβατότητας των αρχείων που εξάγουν τα λογισμικά, θα πρέπει να καθοριστούν προδιαγραφές και περιορισμοί στη μορφή αυτών των δεδομένων και μεταδεδομένων.
- Για να μειωθεί το κόστος παραγωγής ενός *3D model*, μπορούν να χρησιμοποιηθούν *open source* λογισμικά τα οποία δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να πραγματοποιήσει επιτυχώς ορισμένες από τις διαδικασίες που εμπορικά λογισμικά, αλλά με μηδενικό κόστος.

7.2 Παραγωγή ορθοφωτογραφίας από τρισδιάστατα μοντέλα

Τα λεπτομερή τρισδιάστατα μοντέλα που προκύπτουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ορθοφωτογραφιών, με αρκετά καλά αποτελέσματα. Η χρήση αυτών των μοντέλων αντικαθιστά την δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Αντικειμένου, η οποία συνήθως πραγματοποιείται χειροκίνητα, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο παραγωγής ορθοφωτομωσαϊκών. Λόγω της μεγάλης λεπτομέρειας του μοντέλου αποδίδεται σωστό χρώμα στους κόμβους του μειώνοντας σημαντικά κάποια λάθη στις ορθοφωτογραφίες (διπλοεκθέσεις, ραδιομετρικά λάθη κτλ). Σε εφαρμογές που οι φωτογραφίες έχουν ληφθεί με προσοχή (ικανές επικαλύψεις, στροφές κτλ) και το *RMS error* των προσανατολισμών τους είναι μικρό, τα αποτελέσματα είναι πολύ καλά.

Ωστόσο, την διαδικασία δυσχεραίνει η ασυμβατότητα των μορφών αρχείων, καθώς λίγα φωτογραμμετρικά λογισμικά έχουν την δυνατότητα να εισαγάγουν *DSM* σε μορφές *.dxf* ή *.obj*, μορφές δηλαδή αρχείων στα οποία εξάγονται τα *3D models* μετά την επεξεργασία τους.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Τρισδιάστατα Μοντέλα Αρχιτεκτονικά Σύνθετων Αντικειμένων

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΣΥΝΟΡΘΩΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΝΕΦΩΝ							
Status:	VALID Registration						
Mean Absolute Er.							
<i>for Enabled Constraints</i>	0.001 m						
<i>for Disabled Constraints</i>	0.025 m						
Database name	PRomanica20100316_1						
ScanWorlds							
SW1_CentroCerca (Leveled)							
SW2_CentroMitad (Leveled)							
SW3_Izquierda (Leveled)							
SW4_Derecha (Leveled)							
SW5_CentroLejos (Leveled)							
			CONSTRAINTS				
Name	ScanWorld	ScanWorld	Type	On/Off	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 1	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW2_CentroMitad (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 2	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW2_CentroMitad (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.000) m
TargetID: 3	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW2_CentroMitad (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(-0.001, 0.000, 0.000) m
TargetID: 1	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW3_Izquierda (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 2	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW3_Izquierda (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.000) m
TargetID: 3	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW3_Izquierda (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 1	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW4_Derecha (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 2	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW4_Derecha (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, 0.000, -0.001) m
TargetID: 1	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.004 m	(0.002, 0.003, 0.000) m
TargetID: 2	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.000) m
TargetID: 3	SW1_CentroCerca (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.002 m	(-0.001, -0.001, 0.000) m
TargetID: 1	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW3_Izquierda (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 2	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW3_Izquierda (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.001, 0.000, 0.001) m
TargetID: 3	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW3_Izquierda (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 5	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW3_Izquierda (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.002 m	(-0.001, 0.001, -0.001) m
TargetID: 1	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW4_Derecha (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 2	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW4_Derecha (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, 0.001, 0.000) m
TargetID: 6	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW4_Derecha (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.000) m
TargetID: 1	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.004 m	(0.002, 0.003, -0.001) m
TargetID: 2	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, -0.001, 0.000) m
TargetID: 3	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(-0.001, -0.001, 0.001) m
TargetID: 5	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	Off	10.000	0.026 m	(-0.002, 0.003, -0.025) m
TargetID: 6	SW2_CentroMitad (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.003 m	(-0.002, -0.002, 0.000) m
TargetID: 2	SW3_Izquierda (Leveled)	SW4_Derecha (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.001 m	(0.000, 0.000, -0.001) m
TargetID: 1	SW3_Izquierda (Leveled)	SW4_Derecha (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.000 m	(0.000, 0.000, 0.000) m
TargetID: 5	SW3_Izquierda (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	Off	10.000	0.024 m	(-0.001, 0.002, -0.024) m
TargetID: 2	SW3_Izquierda (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.002 m	(-0.001, -0.001, 0.000) m
TargetID: 3	SW3_Izquierda (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.002 m	(-0.001, -0.001, 0.000) m
TargetID: 1	SW3_Izquierda (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.004 m	(0.002, 0.003, 0.000) m
TargetID: 2	SW4_Derecha (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.002 m	(-0.001, -0.002, 0.001) m
TargetID: 1	SW4_Derecha (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.004 m	(0.002, 0.003, -0.001) m
TargetID: 6	SW4_Derecha (Leveled)	SW5_CentroLejos (Leveled)	Coincident: Vertex-V	On	10.000	0.002 m	(-0.002, -0.001, 0.000) m
ScanWorld Transformations							
SW1_CentroCerca (Leveled)							
translation:	(0.000, 0.000, 0.000) m						
rotation:	(0.0000, 1.0000, 0.0000) 0.000 deg						
SW2_CentroMitad (Leveled)							
translation:	(-3.397, 0.928, 0.345) m						
rotation:	(-0.0000, -0.0000, -1.0000) 49.342 deg						
SW3_Izquierda (Leveled)							
translation:	(-1.270, 14.304, 0.471) m						
rotation:	(0.0000, 0.0000, 1.0000) -172.379 deg						
SW4_Derecha (Leveled)							
translation:	(-9.360, -9.580, 0.525) m						
rotation:	(-0.0000, -0.0000, -1.0000) 33.281 deg						
SW5_CentroLejos (Leveled)							
translation:	(-21.521, 7.070, 0.796) m						
rotation:	(-0.0000, -0.0000, -1.0000) 90.675 deg						

Τρισδιάστατα Μοντέλα Αρχιτεκτονικά Σύνθετων Αντικειμένων

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΕΩΝΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΝΕΦΩΝ ΣΤΟ ΤΟΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ							
Status:	VALID Registration						
Mean Absolute Error							
<i>for Enabled Constraints</i>	0.003 m						
<i>for Disabled Constraints</i>	0.015 m						
Database name :	PRomanica20100316_1						
ScanWorlds							
FS1 (Leveled)							
ScanWorld [SW1-SW5] (Leveled)							
CONSTRAINTS							
Name	ScanWorld	ScanWorld	Type	On/Off	Weight	Error	Error Vector
TargetID: 5	FS1 (Leveled)	ScanWorld [SW1-SW5]	Coincident: Vertex-Ve	Off	10.000	0.015 m	(0.003, 0.009, 0.011)
TargetID: 6	FS1 (Leveled)	ScanWorld [SW1-SW5]	Coincident: Vertex-Ve	On	10.000	0.004 m	(0.000, 0.004, 0.001)
TargetID: 1	FS1 (Leveled)	ScanWorld [SW1-SW5]	Coincident: Vertex-Ve	On	10.000	0.003 m	(-0.002, -0.003, 0.000)
TargetID: 2	FS1 (Leveled)	ScanWorld [SW1-SW5]	Coincident: Vertex-Ve	On	10.000	0.002 m	(0.002, 0.001, 0.000)
TargetID: 3	FS1 (Leveled)	ScanWorld [SW1-SW5]	Coincident: Vertex-Ve	On	10.000	0.002 m	(0.000, -0.002, -0.001)
ScanWorld Transformations							
FS1 (Leveled)							
translation:	(0.000, 0.000,0.000) m						
rotation:	(0.0000, 1.0000,0.0000)	0.000 deg					
ScanWorld [SW1-SW5] (Leveled)							
translation:	(1004.623, 1019.062, 101.196) m						
rotation:	(-0.0000, -0.0000, -1.0000)	-99.622 deg					

Βιβλιογραφία

Στην Ελληνική Γλώσσα

- Ιωαννίδης Χ., 2008. *Σημειώσεις Μαθήματος Αποτυπώσεις Μνημείων*.
- Περιοδικό *National Geographic*, Ελληνική Έκδοση, τ.Οκτώβριος 2010
- Digitech III, 2005. *Εγχειρίδιο Τρισδιάστατης Ψηφιοποίησης Ακίνητων Μνημείων και Χώρων*.

Ξενόγλωσσα

- Bray, N., 2004. *Notes on Mesh Smoothing*.
- Froehlich, C., Mettenleiter, M., 2004. *Terrestrial Laser Scanning – New Perspectives in 3D Survey*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI -8/W2.
- Georgopoulos, A., Ioannidis, Ch., 2005. *3D visualization by integrating multisource data for the Geometric Recording of Minumenta*, Proceedings of the International Workshop on Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage. Ascona.
- Kraus, K., 2004. *Photogrammetrie Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 7. Auflage.
- Lerma Garcia, J.L, Van Genechten, B., Heine, E., Santana Quintero, M. (eds), 2008. *Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. Training material based on practical applications*, Universidad Politécnica de Valencia, Spain.
- Manfredini, A. M., Remondino, F., 2010. *Reality-Based 3D Modeling, Segmentation and Web Based Visualization*, EuroMed Conference Cyprus, Limassol.
- Moller, Th., Séquin, C., 2000. *Heuristic Backface Culling of Animated Subdivision Surfaces*, SIGGRAPH 2000, Conference Abstracts, New Orleans LA, p 212 University of California at Berkeley.
- Patias, P., 2001. *Photogrammetry and Visualization*, Technical Report, ETH Zurich.
- Remondino, F., 2010. *Terrestrial Optical Active Sensors – Theory and Applications*, International Summer School “3D Modeling in Archaeology and Cultural Heritage 2010”, Durham, UK, p.18-19.

- Remondino, F., 2003. *From Point Cloud to Surface: the Modeling and Visualization Problem*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV -5/W10, International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, Tarasp-Vulpera, Switzerland
- Stathopoulou, E., Lerma, J.L., Georgopoulos, A., 2010. *Geometric Documentation of the Cathedral of Valencia*, Euromed Conference, Cyprus, Limassol.
- Tekumalla, L. S., Cohen, E., 2004. *A Hole-Filling Algorithm for Triangular Meshes*.
- Tsakiri, M., Ioannidis, Ch., Carty, A., 2003. *Laser scanning issues for geometrical recording of a complex statue*, Proc. of the 6th Conference 'Optical 3-D Measurement Techniques', Zurich, Switzerland.
- Valanis, A., Tapinaki, S., Georgopoulos, A., Ioannidis, C., 2009. *High Resolution Textured Models for Engineering Applications*, 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japan.
- Valanis, A., Fournaros, S., Georgopoulos, A., 2010. *Photogrammetric Texture Mapping of Complex Objects*, Euromed Conference 2010, Cyprus, Limassol.
- Wei, Z., Shuming, G., Hongwei, L., 2007. *A robust hole-filling algorithm for triangular Mesh*, Visual Computing.
- Xiao, J., Michael, Y., Wang H., 2008. *An Automatic Hole Filling Algorithm for Polygon Meshes*, Computer-Aided Design and Applications.
- Technodigit, 2008. *3DReshaper Tutorials*, France.

Ιστότοποι

- <http://www.europeana.eu/portal/index.html>
- Catedral de Valencia, 2007, http://www.catedraldevalencia.es/en/arte_paseo-por-los-exteriores.php (accessed on December 20th, 2010)
- Catedral de Valencia, 2007, http://www.catedraldevalencia.es/en/historia-de-la-catedral_iglesia-catedral.php (accessed on December 20th, 2010)
- <http://www.gothicmed.es/browsable/en/Catedral-3.html.htm>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Valencia_Cathedral
- http://en.wikipedia.org/wiki/Valencia,_Spain
- Leica ScanStation2, 2007. http://hds.leicageosystems.com/en/Leica-ScanStation-2_62189.htm (accessed 20 Jun. 2010).

- Technodigit, 2009b. Using 3DReshaper to prevent measurement noise and orange skin effect. http://www.3dreshaper.cpm/en1/En_Noise.htm (accessed 26 Apr. 2010)
- http://www.faro.com/focus/uk?int_cid=but_uk_f3d
- <http://www.geometrysystems.net/html/products/index.htm>