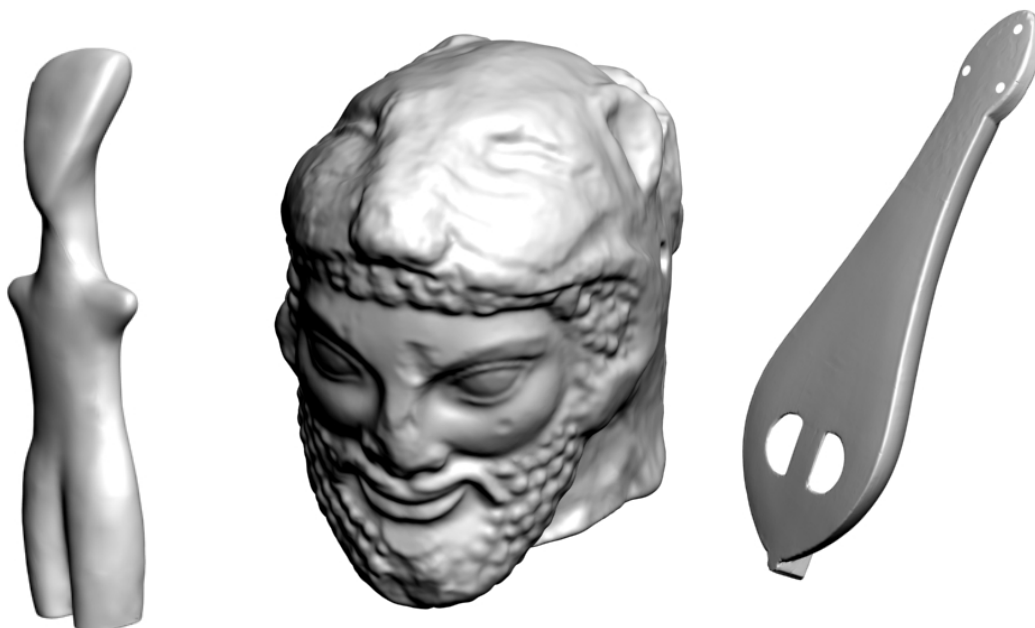




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤ'ΥΩΝ & ΑΥΤ. ΕΛΕΓΧΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Σ. ΔΙΠΛΑΡΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Συμβολή στη χρήση τεχνολογιών
για την τρισδιάστατη ψηφιακή
αποτύπωση αντικειμένων
πολιτιστικής κληρονομιάς

Ελευθέριος Φωτόπουλος

ΙΟΥΛΙΟΣ 2008



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤ/ΥΩΝ & ΑΥΤ. ΕΛΕΓΧΟΥ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Σ. ΔΙΠΛΑΡΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Συμβολή στη χρήση τεχνολογιών
για την τρισδιάστατη ψηφιακή
αποτύπωση αντικειμένων
πολιτιστικής κληρονομιάς

Ελευθέριος Φωτόπουλος

ΙΟΥΛΙΟΣ 2008

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους ακόλουθους αναφερομένους, καθώς χωρίς την ουσιαστική συνεισφορά του καθενός τους προς την παρούσα εργασία, δεν ήταν δυνατή η υλοποίηση και αρτιότητα της.

- Κο. Στέφανο Διπλάρη, επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π., που μου εμπιστεύθηκε το θέμα της εργασίας
- Κο. Γιώργο Καϊσαρλή διδάκτορα Ε.Μ.Π., για την πολύτιμη συμμετοχή του στην υλοποίηση της εργασίας και για τις συμβουλές του σε θέματα Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού.
- Την Βιομήχανία χυτών αλουμινίου BRALCO για τη διάθεση του εξοπλισμού μη-καταστροφικού ελέγχου με ακτίνες - Χ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας.....	1
Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας στην αγγλική (Abstract).....	2
Πίνακας εικόνων.....	3

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....4

1.1 Τεχνολογία, Πολιτισμός και Αρχαιολογία	4
1.2 Η σημασία της τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης στην τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος	7
1.3 Ο ρόλος του Μηχανολόγου Μηχανικού.....	8
1.4 Οριοθέτηση Διπλωματικής Εργασίας.....	11
1.5 Δομή και οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας.....	12

Κεφάλαιο 2 - Συμβατικοί τρόποι τεκμηρίωσης / αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς13

2.1 Γενικά-Εκμαγεία.....13

2.1.1 Εκμαγεία χωρίς «εσάρπα» (κέλυφος)	14
2.1.2 Εκμαγεία με εσάρπα.....	14

2.2 Γύψος.....17

2.2.1 Γενικά.....	17
2.2.2 Ιδιότητες της γύψου.....	17
2.2.3 Χρήση της γύψου.....	19

2.3 Ελαστικά.....20

2.3.1 Γενικά.....	20
2.3.2 Ιδιότητες των ελαστικών.....	20
2.3.2.1 Αναλογία πρόσμιξης.....	20
2.3.2.2 Ικανότητα παραμόρφωσης του ελαστικού.....	20
2.3.2.3 Ιξώδες.....	21
2.3.3 Συνήθη ελαστικά υλικά εκμαγείων.....	21
2.3.4 Χύτευση σε εκμαγείο άμμου.....	23
2.3.5 Κατασκευή γλυπτού από φυσικό λίθο.....	25

Κεφάλαιο 3 - Σύγχρονες τεχνολογίες τεκμηρίωσης / τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.....26

3.1 Εισαγωγή στην τρισδιάστατη ψηφιοποίηση.....26

3.1.1 Οριοθέτηση και Ορισμοί τρισδιάστατης ψηφιακής σάρωσης.....	27
3.1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	28
3.1.2.1 Τρισδιάστατη όραση υπολογιστών.....	28
3.1.2.2 Αναπαράσταση τρισδιάστατων επιφανειών	29

3.1.2.2.1 Χάρτης βάθους	29
3.1.2.2.2 Νέφος σημείων	29
3.1.2.2.3 Πολυγωνικό – τριγωνικό πλέγμα	29
3.1.2.2.4 Ογκομετρικά εικονοστοιχεία.....	29
3.1.2.3 Συστήματα τρισδιάστατης οπτικής αναπαράστασης.....	30

3.2 Οι ιδιαιτερότητες των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.....32

3.3 Παρουσίαση της τρέχουσας στάθμης της τεχνολογίας – Βασικές μέθοδοι αποτύπωσης και ανακατασκευής36

3.3.1 Εισαγωγή	36
3.3.2 Μεθοδολογίες τρισδιάστατης σάρωσης	37
3.3.2.1 Αναλυτική τεχνολογική ανασκόπηση	38
3.3.2.1.1 Τεχνικές ψηφιοποίησης εξαιρετικά μικρών αντικειμένων.....	39
3.3.2.1.2 Τεχνικές ψηφιοποίησης μικρών αντικειμένων.....	41
3.3.2.1.3 Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεσαίου μεγέθους.....	41
3.3.2.1.4 Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεγάλου μεγέθους	46

3.4 Σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων.....47

3.4.1 Η ακρίβεια των γεωμετρικών αποτελεσμάτων	54
3.4.1.1 Η διαδικασία της βαθμονόμησης	54
3.4.1.2 Ανάλυση του σαρωτή	54
3.4.1.3 Ο θόρυβος της δέσμης φωτός.....	56
3.4.1.4 Γεωμετρική ακρίβεια και μετάδοση του θορύβου	59

3.5 Μέθοδοι Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς61

3.5.1 Τρισδιάστατη Εκτύπωση	61
3.5.1.1 Τρισδιάστατοι εκτυπωτές εναπόθεσης ύλης	61
3.5.1.2 Τρισδιάστατοι εκτυπωτές λιθογραφίας	61
3.5.2 Μέθοδος LOM (Laminated Object Manufacturing).....	63
3.5.3 Τρισδιάστατη Σμίλευση	65

Κεφάλαιο 4 - Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς στο Εργαστήριο ΤΚΠ-Ε&ΑΣ του Τομέα ΜΚ&ΑΕ.....67

4.1 Παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.....68

4.1.1 Τρισδιάστατος Σαρωτής FARO	68
4.1.2 Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης Geomagic Studio.....	69

4.2 Παρουσίαση της διαδικασίας και της εκτέλεσης των ψηφιακών αποτυπώσεων.....69

4.2.1 Καθορισμός και Βαθμονόμηση (Calibration) εργαλείων.....	69
4.2.2 Διαδικασία σάρωσης αντικειμένου.....	72

4.2.3 Κατηγορίες δεδομένων.....	74
4.2.4 Διαδικασία ψηφιακής αποτύπωσης και δημιουργίας ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD.....	74

Κεφάλαιο 5 – Εφαρμογές

5.1 Εφαρμογή 1 - Ψηφιακή αποτύπωση μουσικού αντιγράφου: Κυκλαδίτικο Ειδώλιο.....	85
5.2 Εφαρμογή 2 - Ψηφιακή αποτύπωση μουσικού αντιγράφου: Κεφαλή Ηρακλή	101
5.3 Εφαρμογή 3 - Ψηφιακή αποτύπωση παραδοσιακού μουσικού οργάνου : Πολίτικη λύρα	133

Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα–Μελλοντικές Προοπτικές Έρευνας.....144

Βιβλιογραφικές Αναφορές.....146

Περίληψη

Η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αποτελεί πλέον στις μέρες μας ένα αναπόσπαστο κομμάτι της προσπάθειας αρχειοθέτησης και τεκμηρίωσης της πολιτιστικής και πολιτισμικής μας κληρονομιάς αφού προσφέρει σημαντικές δυνατότητες καταγραφής, διατήρησης και προβολής αρχιτεκτονικών δημιουργιών, αρχαιολογικών ευρημάτων, ιστορικών μνημείων και αντικειμένων τέχνης.

Στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας καταρχήν πραγματοποιείται επισκόπηση της διεθνούς δραστηριοποίησης και της υφιστάμενης τεχνογνωσίας (*state of the art*) και τεχνολογίας στα ζητήματα που αφορούν στην τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος με σκοπό τη διαμόρφωση σαφέστερης εικόνας για τις υπάρχουσες και τις μελλοντικές ανάγκες, τα προβλήματα, τις σημερινές πρακτικές τις πιθανές προοπτικές τόσο στη χώρα μας όσο και διεθνώς στο εν λόγω επιστημονικό πεδίο.

Κύριο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είναι η συστηματική καταγραφή και τεκμηρίωση η οποία αφορά στα απαραίτητα στάδια και στα επιμέρους βήματα της διαδικασίας ψηφιακής αποτύπωσης και της δημιουργίας ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με σκοπό τη δημιουργία ενός αντίστοιχου διαγράμματος ροής (*workflow*) των σχετικών εργασιών.

Για τις πιλοτικές εφαρμογές του διαγράμματος ροής χρησιμοποιήθηκε ο υφιστάμενος εξοπλισμός (μέσα ψηφιακής αποτύπωσης, σαρωτές laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM, λογισμικό επεξεργασίας, μηχανές ταχείας πρωτοτυποποίησης κ.α.) του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Παρουσιάζονται αναλυτικά τρεις χαρακτηριστικές μελέτες περίπτωσης - εφαρμογές ψηφιακής αποτύπωσης (Κυκλαδίτικο Ειδώλιο, Κεφαλή Ηρακλή, Πολίτικη λύρα) για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν μουσειακά αντίγραφα και αυθεντικά αντικείμενα. Τα αποτελέσματα των τριών εφαρμογών σχολιάζονται και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενό της Διπλωματικής Εργασίας.

Από τη συνολική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι διαμορφώνεται ένα ευρύ επιστημονικό/ ερευνητικό πεδίο με αντικείμενο τη συστηματική μελέτη και αξιολόγηση όλων των φάσεων της διαδικασίας της ψηφιακής τεκμηρίωσης πολιτιστικών αντικειμένων, από την αποτύπωση και τη δημιουργία του στερεού ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD έως την παραγωγή και τον έλεγχο των παραγόμενων αρχείων τεκμηρίωσης, πιστών αντιγράφων, σχεδιασμού εναλλακτικών λύσεων στήριξης, συσκευασίας, κλπ. στο οποίο ο ρόλος του μηχανολόγου μηχανικού είναι καθοριστικός.

Περίληψη Διπλωματικής Εργασίας στην αγγλική Abstract

Three-dimensional digitization has nowadays become an integral part of archiving and documentation effort of cultural heritage, offering important benefits in reconstruction and restoration tasks of architectural creations, archaeological sites, historic monuments, sculptures, jewels and objects of art in general.

An overview of the international achievement, existing know-how and technological state of the art on digital three-dimensional representation and reconstruction of objects of cultural interest is presented. In this context, one of the main objectives of this work is to develop a clearer picture of current and future needs, problems, current practices and future prospects in the above mentioned scientific field, both in our country and internationally. However, the main target of the diploma thesis is the designation of the stages and the individual steps of the process that aims on the creation of the electronic model in 3D CAD environment for digital reconstruction of objects of cultural heritage and their systematic definition in terms of a relevant workflow chart.

For the pilot application of the proposed workflow the equipment of the Laboratory of Rapid Prototyping and Reverse Engineering (*RpLaB*) in the School of Mechanical Engineering in NTUA was used (laser scanners, coordinate measuring machines, processing software, rapid prototyping machines etc.). Three typical digitization applications that make use of both museum copies and original artefacts (*Cycladic figurine*, *Hercules head*, *classical Kemeñçe*) are presented. The benchmarking of the designated workflow along with the final results of the applications are discussed and guidelines for future work in the topic of the diploma thesis are proposed.

Πίνακας εικόνων

Εικόνα	Τίτλος	Σελίδα
1	Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων χωρίς εσάρπα	14
2	Προεργασία ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα	15
3	Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα	15
4	Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα	15
5	Κατασκευή ελαστικού εκμαγείου με εσάρπα	16
6	Κατασκευή ελαστικού εκμαγείου με εσάρπα	16
7	Χύτευση χαλκού σε άμμο με κοίλο εσωτερικό	24
8	Αντιγραφή του έργου με συμβατικές μετρητικές διατάξεις από γύψο σε φυσικό λίθο	25
9	Μέθοδοι οπτικής αναπαράστασης τρισδιάστατων δεδομένων	30
10	Διάχυση φωτός σε μάρμαρο	33
11	Δημιουργία απόκλισης της δέσμης φωτός	33
12	Σάρωση κατά την παρουσία αποφράξεων	34
13	Ανακλάσεις και ασυνέχειες της δέσμης φωτός	34
14	Αδυναμία αποφυγής πρόσκρουσης	35
15	Κανονικοποιημένη αποτελεσματικότητα διαφορετικών ενδείξεων βάθους	37
16	Βασικός διαχωρισμός τεχνικών οπτικής τρισδιάστατης σάρωσης	38
17	Όμοια τρίγωνα και νόμος συνημίτονων	47
18	Διάφοροι τύποι μοτίβων προβολής ακτίνων λέιζερ	48
19	Η αρχή της τριγωνοποίησης	49
20	Συμβατική προσέγγιση σάρωσης	51
21	Απλοποιημένο διάγραμμα σαρωτή με ένα άξονα σάρωσης	52
22	Σάρωση διπλών αξόνων	52
23	Χειροκίνητος έλεγχος βέλτιστης εστίασης της ακτίνας πάνω σε αντικείμενο	55
24	Φυσικά όρια τρισδιάστατων οπτικών μετρήσεων που βασίζονται σε προβολή δέσμης φωτός – λέιζερ	55
25	Θορυβώδες Gaussian προφίλ δέσμης φωτός (speckle noise	57
26	Συμπεριφορά ανάκλασης φωτός πάνω σε επιφάνειες	57
27	Λάθη κατά τη διαδικασία τριγωνοποίησης	58
28	Θόρυβος σε νέφος σημείων και η μεταφορά του στο πολυγωνικό πλέγμα	60
29	Συσκευή εκτύπωσης με εναπόθεση υλικού και δείγμα εκτύπωσης	61
30	Συσκευές στερεολιθογραφίας με δείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης	62
31	Μηχανές τρισδιάστατης σμίλευσης ελεγχόμενες από H/Y	66
32	Βραχίονας FARO PLATINUM ARM Model Po83D	68
33	Ενδεικτική Οθόνη του λογισμικού Geomagic Studio 9	69
34	Η λέιζερ κάμερα του Faro Arm	72
35	Σάρωση Κυκλαδικού ειδωλίου	72
36	Σάρωση Κεφαλής Ηρακλή	73
37	Σάρωση Πολίτικης Λύρας	73
38	Γενικό διάγραμμα ροής των διαδικασιών δημιουργίας 3D μοντέλου.	75
39	Ομαλοποίηση νέφους σημείων	78
40	Ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων	80
41	Αναγνώριση ασυνεχειών σε τριγωνικό πλέγμα	82

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Τεχνολογία, Πολιτισμός και Αρχαιολογία

Η Αρχαιολογία βρίσκεται μονίμως αντιμέτωπη με το πρόβλημα της καταγραφής και μελέτης αντικειμένων ανυπολόγιστης ιστορικής και πολιτιστικής αξίας. Από τη στιγμή της ανασκαφής τα αρχαιολογικά ευρήματα εκτίθενται σε μια προοδευτική και συχνά μη αναστρέψιμη διαδικασία παραμόρφωσης και φθοράς που μπορεί να καταλήξει και σε ολική καταστροφή ή/και απώλειά τους. Τα δεδομένα που καταγράφονται για τους σκοπούς μίας αρχαιολογικής έρευνας έχουν διττό σκοπό: τη δημιουργία ενός μέσου που θα επιτρέπει την υψηλής πιστότητας δημοσίευση του αντικειμένου αλλά και την εικονική διατήρηση του ακόμα και στο απλούστερο επίπεδο της διάσωσης της ίδιας της αρχαιολογικής πληροφορίας που εμπεριέχει.

Η προστασία και διατήρηση αρχαιολογικών – πολιτιστικών αντικειμένων δεν είναι ένα απλό θεωρητικό πρόβλημα. Η αρχαιολογία είναι, εξ ορισμού, καταστροφική κατά τη διάρκεια της αποκάλυψης του παρελθόντος. Η απαραίτητη καταστροφή του ανασκαφικού συνόλου αποβλέπει στην αποκάλυψη του εκάστοτε αντικειμένου. Μετά την ανασκαφή, το αντικείμενο εκτίθεται σε ένα πλήθος νέων περιβαλλοντικών επιθέσεων (φυσικοχημική και τουριστική μόλυνση). Σε πολλές περιπτώσεις είναι αναπόφευκτη η φθορά του και πραγματοποιείται σε πολύ σύντομο σε σχέση με την ηλικία του χρονικό διάστημα. Για την αντιμετώπιση αυτής της προοδευτικής και μη αναστρέψιμης φθοράς, οι αρχαιολόγοι χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές καταγραφής και αρχειοθέτησης. Σε αντίθεση με μια γενικότερη άποψη που επικρατεί, η φωτογραφία δεν πληρεί τις ανάγκες καταγραφής της Αρχαιολογίας και της Ιστορίας Τέχνης, αφού προβάλλει πάντα το αντικείμενο από μία οπτική γωνία, μειώνοντας τον όγκο του αντικειμένου σε δύο διαστάσεις και εισάγοντας συχνά οπτικές παραμορφώσεις. Επίσης οι ερμηνευτικές παραστάσεις, οι οποίες βοηθούν στην μελέτη του αντικειμένου, είναι πολλές φορές αδύνατο να πραγματοποιηθούν πάνω στη φωτογραφία. Τα αποτελέσματα της παραδοσιακής φωτογράφισης δεν έχουν ικανοποιητική ανθεκτικότητα στο χρόνο. Για όλους τους προηγούμενους λόγους οι αρχαιολόγοι και οι ιστορικοί τέχνης βασίζονται συνήθως και σε άλλες μεθόδους αρχειοθέτησης όπως είναι η χειρόγραφη σχεδίαση και η ζωγραφική. Τις περισσότερες φορές τα σχέδια αυτά γίνονται με αργούς ρυθμούς, ώστε να έχουν ικανοποιητική ακρίβεια, παρουσιάζοντας το μειονέκτημα να προσαρμόζονται δύσκολα στις σύγχρονες ανάγκες διαχείρισης και οργάνωσης.

Η αρχειοθέτηση - τεκμηρίωση αντικειμένων στην Αρχαιολογία και στην Ιστορία Τέχνης έχει να αντιμετωπίσει **δύο ουσιώδη προβλήματα** τα όποια σχετίζονται απόλυτα μεταξύ τους. Αυτά είναι:

- Η αντικειμενικότητα περιγραφής του αντικειμένου (πιστότητα)
- Η ταχύτητα και η προσαρμοστικότητα της καταγραφής

Η τεκμηρίωση της πολιτισμικής κληρονομιάς σε αρκετές περιπτώσεις επιβάλλει την καταγραφή των αντικειμένων στον ίδιο τον τόπο της ανασκαφής. Τα πολιτιστικά αντικείμενα ποικίλουν σε διαστάσεις. Τα ακανόνιστα – μη γεωμετρικά σχήματα και η μορφολογική πολυπλοκότητα των επιφανειών τους είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο. Ο διαθέσιμος χρόνος για μετρήσεις είναι τις περισσότερες φορές περιορισμένος και στο παρελθόν η φωτογραμμετρία ήταν η μόνη μέθοδος που μπορούσε να εφαρμοστεί σε τόσο στενά χρονικά περιθώρια. Η αρχειοθέτηση με σκοπό τη μακροπρόθεσμη διατήρηση αντικειμένων της πολιτιστικής κληρονομιάς αντιμετωπίζει μεγάλες προκλήσεις καθώς βαδίζουμε τη νέα χιλιετία. Νέες τεχνολογίες έρχονται να δώσουν απαντήσεις στο πρόβλημα της καταγραφής, τεκμηρίωσης και προβολής του πολιτιστικού μας θησαυρού. Η ψηφιακή αναπαράσταση και η μετάδοση της ψηφιακής πληροφορίας είναι από τα πλέον σημαντικά ερευνητικά πεδία που επιτρέπουν σε όλους τους φορείς που ασχολούνται με τον πολιτισμό να προβάλουν τα αποτελέσματα της δουλειάς τους με πολλαπλούς νέους και δυναμικούς τρόπους. Για παράδειγμα, πολλά αρχαιολογικά μνημεία είναι κλειστά για το ευρύ κοινό για την αποφυγή πιθανών ζημιών. Η χρήση τρισδιάστατων φωτορεαλιστικών μοντέλων και η παρουσίαση τους μέσω εικονικής πραγματικότητας στο διαδίκτυο ή σε οπτικούς δίσκους μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τόσο στην εκπαίδευση όσο και στη διάδοση της γνώσης σε πολύ ευρύτερο κοινό. Έτσι, οι τρισδιάστατοι σαρωτές λείζερ μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία στην αρχαιολογία ως ένα σημαντικό εργαλείο για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις και ψηφιακές αποτυπώσεις.

Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αποτελεί πλέον στις μέρες μας ένα αναπόσπαστο κομμάτι της προσπάθειας αρχειοθέτησης και τεκμηρίωσης της πολιτιστικής και πολιτισμικής μας κληρονομιάς αφού προσφέρει σημαντικές δυνατότητες καταγραφής αρχιτεκτονικών δημιουργιών, αρχαιολογικών ευρημάτων, ιστορικών μνημείων και μνημείων τέχνης. Η επικράτηση των τρισδιάστατων σαρωτών τα τελευταία χρόνια έχει επιφέρει την αύξηση του ενδιαφέροντος σχετικά με τη χρήση τρισδιάστατων ηλεκτρονικών μοντέλων σε πλήθος αρχαιολογικών μελετών. Την ίδια στιγμή η αύξηση στις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων αλλά και επεξεργασίας τρισδιάστατων γραφικών επιτρέπουν στο μέσο χρήστη να έχει πρόσβαση σε υψηλού επιπέδου υλικοτεχνική υποδομή και να διαθέτει την απαραίτητη υπολογιστική ισχύ για την προβολή μεγάλου όγκου τρισδιάστατης πληροφορίας.

Τα κίνητρα για την τρισδιάστατη ψηφιακή ανακατασκευή πολιτιστικών αντικειμένων και μνημείων είναι πολλά, π.χ.:

- Η καταγραφή ιστορικών κτηρίων, τοποθεσιών και αντικειμένων για ανακατασκευή ή αποκατάσταση σε περιπτώσεις που έχουν υποστεί καταστροφές από φωτιές, σεισμούς, πλημμύρες, πολέμους ή, όπως, είναι φυσικό από διάβρωση.
- Η δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού για ερευνητές και μαθητές της ιστορίας και του πολιτισμού.
- Η εικονική ανακατασκευή ιστορικών μνημείων και αντικειμένων που πλέον δεν υπάρχουν ή υπάρχουν μερικώς.

- Η εικονική τρισδιάστατη εξομοίωση μνημείων και αντικειμένων με επιλογές επανόρθωσης και ανάπλασης τμημάτων του τρισδιάστατου μοντέλου.
- Η εικονική τρισδιάστατη απόδοση αρχαιολογικών ανασκαφών.
- Η υπολογιστική ανάλυση κατασκευαστικών και επανορθωτικών τεχνικών.
- Η αναπαράσταση χώρων από οπτικές γωνίες που είναι αδύνατον να πραγματοποιηθούν στον πραγματικό κόσμο εξαιτίας των μεγεθών ή της θέσης.
- Η αλληλεπίδραση με τα πολιτιστικά αντικείμενα (σε εικονικό περιβάλλον) χωρίς τον φόβο για κάποια ζημιά.
- Οι εφαρμογές προβολής του πολιτιστικού μας πλούτου π.χ. εικονικός τουρισμός και εικονικά μουσεία.
- Η κατασκευή υψηλής πιστότητας τρισδιάστατων μοντέλων που μπορούν να βοηθήσουν ουσιαστικά στη μελέτη αντικειμένων από απόσταση, καθώς και στη διεύρυνση του πλήθους ατόμων που μπορούν να μελετήσουν ταυτόχρονα κάθε αντικείμενο.
- Η συγκέντρωση και παρουσίαση όλων των πληροφοριών που απαιτούνται για την τεκμηρίωση μέσω μίας τρισδιάστατης βάσης δεδομένων.

Στην πραγματικότητα κάθε ένα από τα παραπάνω κίνητρα καθορίζει και ένα πλήθος απαιτήσεων που μεταφράζονται άμεσα ως τεχνικές προδιαγραφές για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας και του συναφούς αντίστοιχου εξοπλισμού. Μερικές από αυτές είναι οι εξής:

- Η γεωμετρική ακρίβεια
- Η δυνατότητα αποτύπωσης τυχόν λεπτομερειών
- Ο φωτορεαλισμός
- Το χαμηλό κόστος
- Η φορητότητα
- Η προσαρμοστικότητα
- Τα μεγέθη πληροφορίας που φέρουν τα τρισδιάστατα μοντέλα
- Ο χρόνος ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης
- Η εξειδίκευση προσωπικού και η τεχνική υποστήριξη

Η σειρά προτεραιότητας και η βαρύτητα των απαιτήσεων αυτών μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, π.χ. διαφορετική σημασία θα είχε ο φωτορεαλισμός σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης πηλινών αντικειμένων και διαφορετική στην δημιουργία ενός εικονικού μουσείου. Μέχρι σήμερα μπορούμε να πούμε πως από όσα γνωρίζουμε, δεν έχει, ακόμα, αναπτυχθεί και δεν διατίθεται στην αγορά κάποιο σύστημα ψηφιακής σάρωσης που να καλύπτει τις απαιτήσεις όλων των περιπτώσεων. Σε κάθε περίπτωση η χρήση των νέων τεχνολογιών τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης αποτελεί ένα νέο δυναμικό εργαλείο για την αρχαιολογική επιστήμη και για την διάσωση, διάδοση και προβολή του πολιτισμού γενικότερα.

1.2 Η σημασία της τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης στην τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται διεθνώς ερευνητικές δραστηριότητες και συναφείς εφαρμογές με στόχο την *υψηλής πιστότητας* τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση και τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς (αγαλμάτων, αγγείων, ανάγλυφων, κοσμημάτων, χρηστικών ειδών, εργαλείων, μουσικών οργάνων, έργων λαϊκής τέχνης κ.α.). Η εφαρμογή των σύγχρονων τεχνολογιών και μέσων ψηφιακής αποτύπωσης (σαρωτές laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM κ.α.) δίνει πλέον τη δυνατότητα τεκμηρίωσης, *με τη μορφή ψηφιακών στερεών μοντέλων*, αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό μπορεί, καταρχήν, να αντικατασταθεί η παραδοσιακή τεκμηρίωσή τους με φωτογραφίες και σχέδια που προφανώς δεν εξασφαλίζουν άμεση, πλήρη και ακριβή από κάθε άποψη πληροφόρηση, αξιοποίηση αλλά και δυνατότητα πιστής αναπαραγωγής.

Σε σύγκριση με τις καθιερωμένες μεθόδους τεκμηρίωσης των παραπάνω αντικειμένων, που βασίζονται στη χειρόγραφη σχεδίαση και τη συμβατική/ ψηφιακή φωτογράφιση, η υψηλής πιστότητας ψηφιακή τρισδιάστατη τεκμηρίωσή τους μεταξύ άλλων εξασφαλίζει:

- Χρονικά αναλλοίωτα και ασφαλέστερα διαφυλασσόμενα και ενημερωνόμενα ψηφιακά αρχεία.
- Συστηματική παρακολούθηση μεταβολών από ηλικία, βλαβών από τυχαίες ή συστηματικές αιτίες.
- Υψηλής ποιότητας και πολλαπλών δυνατοτήτων υποστήριξη της αρχαιολογικής έρευνας και μελέτης.
- Ακριβέστερη συντήρηση – αποκατάσταση.
- Άμεση διάδοση και προβολή των έργων της πολιτιστικής κληρονομιάς (μουσειακές ψηφιακές/ διαδικτυακές ανταλλαγές, διεθνείς σχέσεις, εκπαιδευτικές και τουριστικές εφαρμογές).
- Κινηματική/ στατική/ δυναμική ανάλυση σε περιβάλλον CAD – CAE (*Computer Aided Engineering*) με βάση το ψηφιακό μοντέλο των αντικειμένων για την επιστημονική κατάρτιση τεχνικών προδιαγραφών μουσειακής στήριξης, συσκευασίας, διακίνησης, μεταφοράς, ασφάλειας έναντι πτώσης-βανδαλισμού κλπ.
- Κατασκευή πιστών αντιγράφων με χρήση σύγχρονων τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ψηφιακή μοντελοποίηση και μεθόδους ταχείας προτυποποίησης CAD/CAE/ CAM (*Computed Aided Manufacturing*) - RP (*Rapid Prototyping*) – RT (*Rapid Tooling*).
- Συστηματική και αντικειμενική αξιολόγηση της πιστότητας των αρχείων και των αντιγράφων καθώς και της αντοχής των τελευταίων.

Αποτελεί γεγονός ότι η εισαγωγή και χρήση των σύγχρονων τεχνολογιών ψηφιακής αποτύπωσης σαν εργαλείο για τη διαφύλαξη και προβολή της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς είναι ένα νέο, συναρπαστικό και ταχύτατα εξελισσόμενο επιστημονικό πεδίο. Τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα, σημαντικά αλλά οπωσδήποτε αποσπασματικού

χαρακτήρα, καταδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης ώστε να προκύψουν εύχρηστοι, ταχείς, χαμηλού κόστους και, κυρίως, αξιόπιστες συναφείς μέθοδοι, μέσα και διαδικασίες. Για τη χώρα μας με την πλούσια πολιτιστική κληρονομιά είναι προφανής η σημασία καθώς επίσης και τα άμεσα και έμμεσα οφέλη που θα προκύψουν από τη δημιουργία ενός πόλου επιστημονικής και τεχνολογικής δραστηριοποίησης στον τομέα αυτόν. Άλλες χώρες με σαφώς μικρότερο πολιτιστικό δυναμικό από εμάς ήδη το κάνουν.

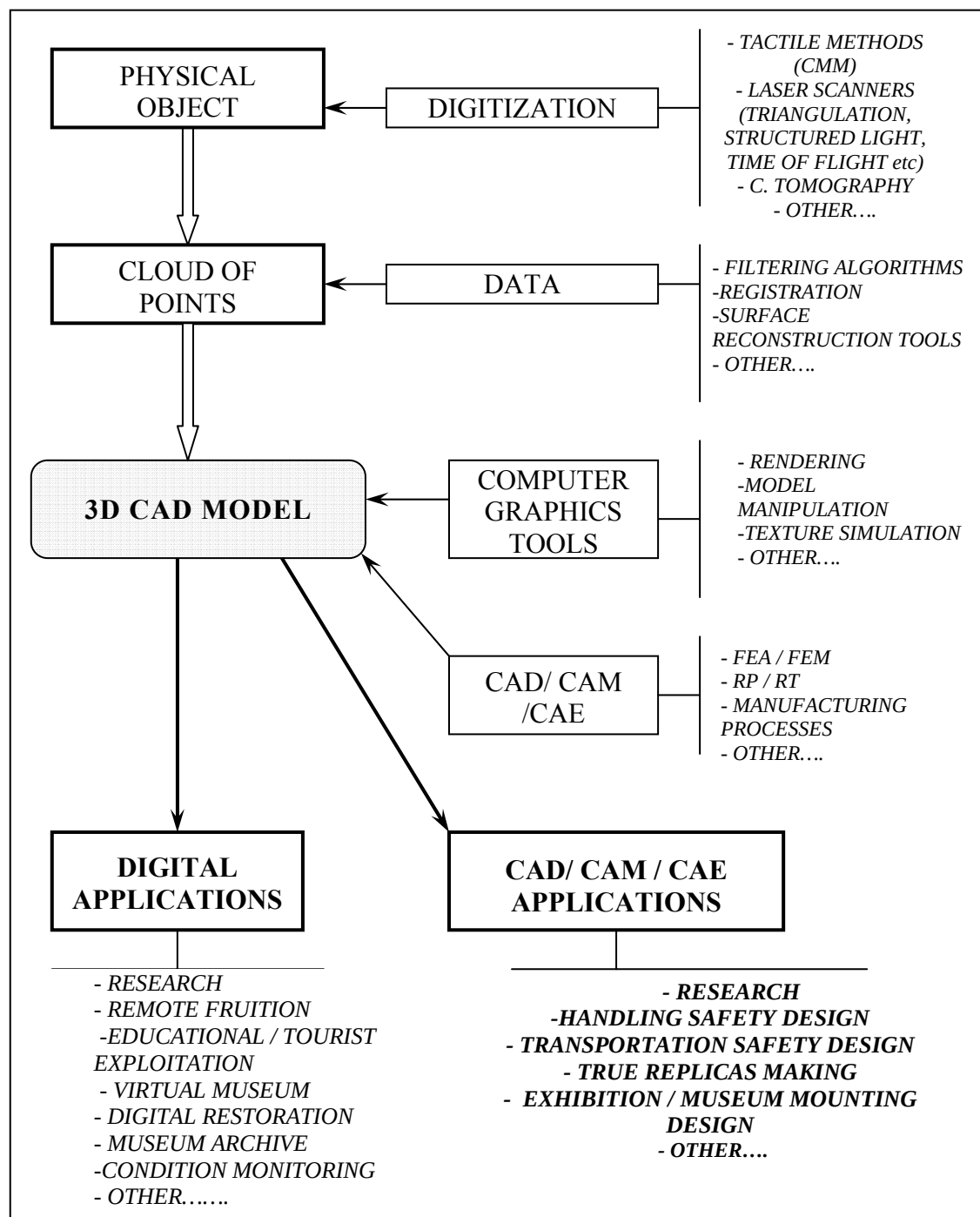
Από της έως τώρα έρευνά για την καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης στην Ελλάδα δεν φαίνεται, τουλάχιστον εξ όσων έχουμε διαπιστώσει, να έχει αρχίσει να αναπτύσσεται μέχρι σήμερα συναφής συστηματική επιστημονική δραστηριότητα. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιου είδους δραστηριότητας αναμένονται να συμβάλλουν στην κατεύθυνση της καθιέρωσης μιας εθνικής στρατηγικής στο εξαιρετικά σημαντικό πεδίο της τεκμηρίωσης της πολιτιστικής κληρονομιάς.

1.3 Ο ρόλος του Μηχανολόγου Μηχανικού

Η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνολογιών ψηφιακής αποτύπωσης τόσο με επαφή (π.χ. μηχανών μέτρησης συντεταγμένων CMM) όσο και χωρίς επαφή (π.χ. σαρωτές 3D laser), οι τεχνολογίες ανάλυσης και πιστοποίησης γεωμετρικής ακρίβειας / ποιοτικού ελέγχου, οι μέθοδοι και οι τεχνικές του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού, η δημιουργία, απεικόνιση και τροποποίηση ενός τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου που αποδίδει με υψηλή ακρίβεια τη μορφή ενός φυσικού αντικειμένου σε περιβάλλον CAD (*Computer Aided Design*) αποτελούν σημαντικές περιοχές δραστηριότητας του μηχανολόγου μηχανικού. Με στόχο την επίλυση προβλημάτων που εμφανίζονται στο βιομηχανικό και κατασκευαστικό περιβάλλον οι παραπάνω περιοχές εδώ και αρκετές δεκαετίες αποτέλεσαν και αποτελούν αντικείμενο μελέτης που εντάσσεται και στο επιστημονικό πεδίο του μηχανολόγου μηχανικού. Πρόσφατα, όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, διερευνάται η εφαρμογή των επιστημονικών αυτών περιοχών στον τομέα της τεκμηρίωσης, προβολής, παρακολούθησης, αποκατάστασης και αναπαραγωγής αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος.

Η τρέχουσα έρευνα σε διεθνές επίπεδο επιδιώκει οι σχετικές εργασίες υλοποιούμενες σε περιβάλλον CAD να επιτυγχάνουν *υψηλή ακρίβεια αποτύπωσης γεωμετρίας και διαστάσεων* και να εξασφαλίζουν προϋποθέσεις περαιτέρω αξιοποίησης των αποτελεσμάτων τους εις όφελος της προστασίας, αποκατάστασης και προβολής των αντικειμένων της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η ύπαρξη ακριβούς/ υψηλής πιστότητας ψηφιακού μοντέλου αποτελεί **την απαραίτητη προϋπόθεση** για την ανάπτυξη εφαρμογών CAD/ CAE (*Computer Aided Engineering*)/ CAM (*Computed Aided Manufacturing*), με σκοπό την κατασκευή εργαλείων για τη δημιουργία πιστών αντιγράφων, την κινηματική/ στατική/ δυναμική μελέτη συσκευασιών διακίνησης/ μεταφοράς, τη μελέτη μουσειακής στήριξης και ασφάλειας έναντι πτώσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, κ.α. Σε κάθε περίπτωση η δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου αποτελεί τον πλέον αξιόπιστο

και σύγχρονο τρόπο αρχειοθέτησης και τεκμηρίωσης του αντικειμένου και παίζει έναν καίριο ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, Πίνακας 1.



Πίνακας 1. Η διαδικασία της ψηφιακής τεκμηρίωσης και οι εφαρμογές της σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς, [16]

Η σημαντική πρόοδος σε θέματα ταχύτητας επεξεργασίας, διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος και δυνατότητας αποθήκευσης πληροφορίας που γίνεται στο πεδίο των ηλεκτρονικών υπολογιστών τα τελευταία χρόνια, έχει

καταστήσει προσιτή τη δημιουργία και διαχείριση τρισδιάστατων στερεών μοντέλων *πολύπλοκων αντικειμένων με ελεύθερες επιφάνειες (free form surfaces)* όπως κατ' εξοχήν είναι τα αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς. Εντούτοις, η ευρύτατη διαφοροποίηση που χαρακτηρίζει τις μορφές, τα υλικά και τις επιμέρους λεπτομέρειες τέτοιου είδους αντικειμένων *κάνει τη δημιουργία ενός υψηλής ακρίβειας/ πιστότητας ψηφιακού μοντέλου τους μια εργασία χρονοβόρα, υψηλών απαιτήσεων και κόστους.*

Η δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου σε περιβάλλον CAD αποτελεί το κεντρικό και ίσως το κρίσιμότερο στάδιο της διαδικασίας ψηφιακής τεκμηρίωσης που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Σχ. 1. Τα διαθέσιμα τεχνολογικά μέσα και εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή αποτύπωση του πρωτότυπου/ αυθεντικού αντικειμένου εισάγουν, αναπόφευκτα, *διατασιολογικές και γεωμετρικές αποκλίσεις στο παραγόμενο ψηφιακό μοντέλο.* Το μέγεθος των αποκλίσεων αυτών εξαρτάται άμεσα από ένα πλήθος τεχνολογικών παραγόντων όπως οι επιδόσεις ακρίβειας των χρησιμοποιούμενων μέσων ψηφιοποίησης και οι μέθοδοι/ δοκιμές με τις οποίες αυτές επαληθεύονται από τον κατασκευαστή τους, οι συνθήκες του περιβάλλοντος κατά τη χρήση τους (π.χ. θερμοκρασία, φωτισμός), το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων που προέκυψαν από την ψηφιοποίηση και προσαρμογές κατάλληλων επιφανειών κ.α.

Για την ποσοτική έκφραση της *πιστότητας του λαμβανόμενου ψηφιακού μοντέλου*, της *ακρίβειάς του*, ή – με τους όρους της σύγχρονης μετρολογίας – της *συνολικής αβεβαιότητάς του* είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός όλων αυτών των παραγόντων και η χρήση μεθοδολογιών που βασίζονται στις γενικές κατευθύνσεις του «Οδηγού για τον υπολογισμό της Αβεβαιότητας Μετρήσεων» (*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement – GUM*) του διεθνούς οργανισμού προτύπων *ISO*. Η σημασία του επιστημονικά τεκμηριωμένου υπολογισμού του παραπάνω μεγέθους είναι προφανής για την ποιότητα και την επιτυχία της ψηφιακής τεκμηρίωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς.

Επιπλέον η επιστημονική κατάρτιση των απαιτήσεων /προδιαγραφών ακρίβειας διαστάσεων και γεωμετρίας του παραγόμενου σε περιβάλλον CAD 3D ψηφιακού μοντέλου συνδέεται άμεσα τόσο με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ίδιου του αντικειμένου (π.χ. μέγεθος, γεωμετρική πολυπλοκότητα) όσο και με τις απαιτήσεις ακρίβειας της εκάστοτε εφαρμογής (π.χ. μελέτη μουσειακής στήριξης, παραγωγή πιστών αντιγράφων, ψηφιακή αποκατάσταση, εκπαιδευτική αξιοποίηση). Η συστηματική μελέτη και ο καθορισμός της *αναγκαίας ακρίβειας ψηφιοποίησης* με όρους διατασιολογικών και γεωμετρικών ανοχών σε σχέση με τον ποσοτικό υπολογισμό της συνολικής αβεβαιότητας των εμπλεκόμενων, κατά περίπτωση, φάσεων του Σχήματος 1 αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για τη στήριξη αποφάσεων σχετικά με την τεχνολογικά ορθή και κοστολογικά βέλτιστη επιλογή αντίστοιχων μέσων και τεχνολογικών εργαλείων. Ο ρόλος και η συμβολή του μηχανολόγου μηχανικού στη διερεύνηση των τεχνολογικών αυτών προβλημάτων είναι καθοριστικός.

1.4 Οριοθέτηση Διπλωματικής Εργασίας

Από όσα αναφέρθηκαν στις παραπάνω παραγράφους προκύπτει ότι διαμορφώνεται ένα ευρύ επιστημονικό/ ερευνητικό πεδίο με αντικείμενο τη συστηματική μελέτη και αξιολόγηση όλων των φάσεων της διαδικασίας της ψηφιακής τεκμηρίωσης πολιτιστικών αντικειμένων, Πίνακας 1, από την αποτύπωση και τη δημιουργία του στερεού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD έως την παραγωγή και τον έλεγχο των παραγόμενων αρχείων τεκμηρίωσης, πιστών αντιγράφων, σχεδιασμού εναλλακτικών λύσεων στήριξης, συσκευασίας, κλπ. Τόσο από την πρόσφατη βιβλιογραφία, όσο και από τις σχετικές εκδηλώσεις της επιστημονικής κοινότητας που λαμβάνουν χώρα διεθνώς τα τελευταία 3 – 4 χρόνια (συνέδρια, διαλέξεις, ημερίδες κλπ), γίνεται φανερό πως υπάρχει μια εντονότατη σχετική διεθνής δράση και κινητικότητα στα προαναφερόμενα θέματα.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι καταρχήν η επισκόπηση της διεθνούς δραστηριοποίησης και της υφιστάμενης τεχνογνωσίας (*state of the art*) και τεχνολογίας στα ζητήματα που αφορούν στην *τριδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος*. Στο πλαίσιο αυτό μια από τις κυριότερες επιδιώξεις της διπλωματικής εργασίας είναι η διαμόρφωση σαφέστερης εικόνας για τις υπάρχουσες και τις μελλοντικές ανάγκες, τα προβλήματα, τις σημερινές πρακτικές τις πιθανές προοπτικές στο πεδίο της τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος τόσο στη χώρα μας όσο και διεθνώς.

Κύριο αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας είναι η συστηματική καταγραφή και τεκμηρίωση η οποία αφορά στα απαραίτητα στάδια και στα επιμέρους βήματα της διαδικασίας ψηφιακής αποτύπωσης και της δημιουργίας ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με σκοπό τη δημιουργία ενός αντίστοιχου διαγράμματος ροής (*workflow*) των σχετικών εργασιών.

Για την πιλοτική εφαρμογή του διαγράμματος ροής σε συγκεκριμένες μελέτες περίπτωσης (*case studies*) χρησιμοποιήθηκε ο υφιστάμενος εξοπλισμός (μέσα ψηφιακής αποτύπωσης, σαρωτές laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM, λογισμικό επεξεργασίας, μηχανές ταχείας πρωτοτυποποίησης κ.α.) του Εργαστηρίου Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων και Αντιστρόφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το εν λόγω Εργαστήριο έχει αναπτύξει ερευνητική δραστηριότητα στα πεδία της ψηφιοποίησης ελεύθερων επιφανειών, του αντιστρόφου σχεδιασμού (*reverse engineering*) και ποιοτικού ελέγχου με τη χρήση μεθόδων επαφής και μη-επαφής (*contact, non-contact*), ενώ τελευταία έχει επεκτείνει τη σχετική έρευνά του σε αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Τέλος, για την αποτύπωση της γεωμετρίας και των διαστάσεων εσωτερικών κοιλοτήτων και διαμορφώσεων έγινε χρήση βιομηχανικού εξοπλισμού μη καταστροφικού ελέγχου με ακτίνες X (*industrial X-ray inspection system*) τύπου YXLON MU2000 που παραχωρήθηκε από τη βιομηχανία παραγωγής χυτών αλουμινίου BRALCO Α.Ε.

1.5 Δομή και οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

Η Διπλωματική Εργασία έχει οργανωθεί με την παρακάτω δομή :

Στο *Κεφάλαιο 1* γίνεται η εισαγωγή στη σύγχρονη προσέγγιση του αντικειμένου της τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης στην τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος, επισημαίνεται ο ρόλος του μηχανολόγου μηχανικού και οροθετείται το πεδίο συμβολής της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζονται οι συμβατικοί τρόποι τεκμηρίωσης / αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με τη χρήση εκμαγείων γύψου και ελαστικών, με στόχο να διαπιστωθούν οι συναφείς αδυναμίες και οι ελλείψεις τους.

Στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζονται οι σύγχρονες τεχνολογίες τεκμηρίωσης / τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς και τα πλεονεκτήματα που αυτές προσφέρουν σε συνέχεια των διαπιστώσεων του Κεφαλαίου που προηγήθηκε, με ιδιαίτερη έμφαση στους σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων. Επίσης αναφέρονται οι ιδιαιτερότητες των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς και εξετάζονται οι εφαρμογές των μεθόδων Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων στο πεδίο αυτό.

Στο *Κεφάλαιο 4* παρουσιάζεται σύντομα ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται από το Εργαστήριο ΤΚΠ-Ε&ΑΣ του Τομέα ΜΚ&ΑΕ του Ε.Μ.Π. για εφαρμογές τρισδιάστατης ψηφιοποίησης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς και γίνεται αναλυτική αναφορά στο διάγραμμα ροής που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της Διπλωματικής Εργασίας, η οποία αφορά στα στάδια και στα επιμέρους βήματα της διαδικασίας και της εκτέλεσης των ψηφιακών αποτυπώσεων με στόχο τη δημιουργία ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD.

Στο *Κεφάλαιο 5* παρουσιάζονται αναλυτικά τρεις χαρακτηριστικές εφαρμογές ψηφιακής αποτύπωσης (Κυκλαδίτικο Ειδώλιο, Κεφαλή Ηρακλή, Πολίτικη λύρα) που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο ΤΚΠ-Ε&ΑΣ του Τομέα ΜΚ&ΑΕ του Ε.Μ.Π. βασισμένες στο διάγραμμα ροής που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.

Στο *Κεφάλαιο 6* παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενό της.

Η Διπλωματική Εργασία κλείνει με τις Βιβλιογραφικές Αναφορές.

Κεφάλαιο 2 - Συμβατικοί τρόποι τεκμηρίωσης / αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

2.1 Γενικά -Εκμαγεία

Η κατασκευή εκμαγείων χρονολογείται εδώ και χιλιάδες χρόνια. Τα πρώτα εκμαγεία κατασκευάστηκαν στην αρχαία Αίγυπτο και στην Κίνα. Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά και διαφορετικά υλικά για την κατασκευή εκμαγείων στα οποία περιλαμβάνονται η άμμος το κερί, οι κόλες, το δέρμα ζώων, η γύψος τα μέταλλα και άλλα υλικά.

Το κύριο πρόβλημα στην επιλογή των εκμαγείων προκύπτει από το μέγεθος και τη μορφή του έργου. Εάν το έργο είναι μεγάλο το εκμαγείο πρέπει να γίνει σε τμήματα και αυτά να συνδεθούν χωρίς να χαθεί η μορφή του προπλάσματος του έργου. Εάν το έργο έχει πολλές κοίλες επιφάνειες είναι απαραίτητη η χρήση ελαστικών μέσων.

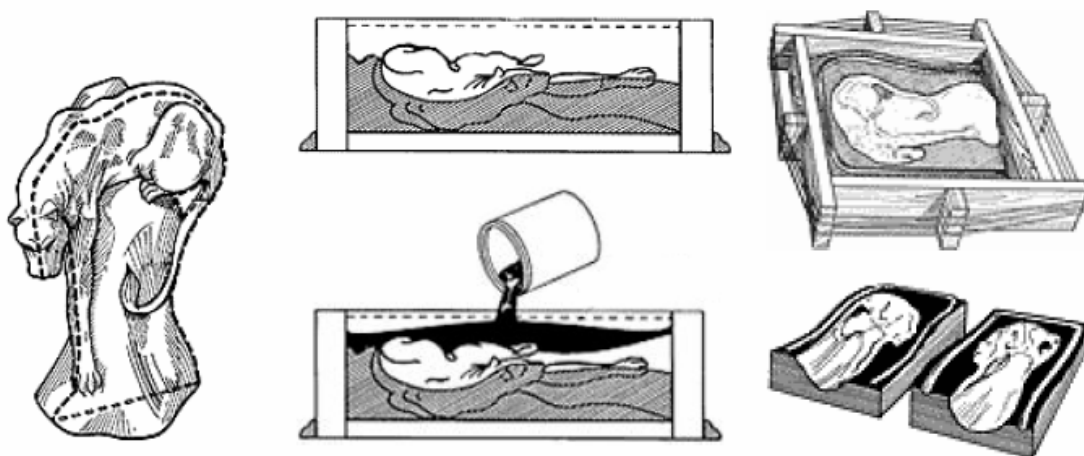
Το βέλτιστο εκμαγείο προπλάσματος προκύπτει με την εξ' ολοκλήρου κατασκευή εκμαγείου από γύψο (όταν το πρόπλασμα είναι νωπό σε πηλό) και ακολούθως η χύτευση στο εκμαγείο σταθερότερου υλικού. Για την κατασκευή αντιγράφων η γύψος είναι το περισσότερο συνηθισμένο υλικό χύτευσης. Η γύψος είναι ιδανικό υλικό για εκμαγεία γιατί λόγω της διαστολής της κατά την σκλήρυνση αποκολλάται εύκολα από το πρόπλασμα δημιουργώντας, μικρά σφάλματα. Κατά την εκμάγευση του έργου μπορεί να καταστραφεί το εκμαγείο. **Βασικό μειονέκτημα του γύψινου εκμαγείου πλήνους προπλάσματος είναι ότι δεν επιτρέπονται λάθη γιατί ένα σφάλμα στο εκμαγείο μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφή ολόκληρου του έργου. Παράλληλα είναι δυνατή μόνο η κατασκευή ενός αντιγράφου.** Τα γύψινα εκμαγεία αποτελούνται κατά περίπτωση από δύο και έως πεντακόσια κομμάτια (σπαστό καλούπι) ανάλογα με το μέγεθος και τις δυσκολίες του πρωτότυπου έργου. Για να γίνει η κατασκευή ενός εκμαγείου, το πρόπλασμα του γλυπτού καθαρίζεται επιμελώς και ακολούθως επαλείφεται με υγρό που βοηθάει στην αποκόλληση του εκμαγείου. Το υγρό αυτό είναι συνήθως πυκνό διάλυμα σαπουνιού σε νερό (μονωτικό για την γύψο) ή πυκνό διάλυμα πηλού (μονωτικό για ελαστικά). Επάνω από το διάλυμα αυτό, το έργο καλύπτεται με λάδι. Το πρόπλασμα χωρίζεται με λεπτές λωρίδες πηλού σε τμήματα κατά ζώνες. Σε αυτές ο εκμαγέας διαστρώνει λεπτό στρώμα παχύρρευστης γύψου και μόλις η γύψος σκληρυνθεί, τα τμήματα διαμορφώνονται εντέχνως έτσι ώστε να ταυτίζονται μεταξύ τους και να δημιουργούν μία ενιαία επιφάνεια. Όταν έχει ολοκληρωθεί η εκμάγευση και η επεξεργασία όλων των τμημάτων, τα τμήματα συναρμολογούνται και πάνω από αυτά τοποθετείται δεύτερο στρώμα γύψου ο «μανδύας» ή «εσάρπα».

Κάθε εσάρπα περικλείει ένα μέρος του εκμαγείου και όχι ολόκληρο το εκμαγείο. Πάνω από την εσάρπα απλώνεται τρίτο στρώμα γύψου ενισχυμένου με ίνες. Στο γύψινο εκμαγείο μπορεί να χυτευτεί γύψος και να κατασκευαστεί

γύψινο θετικό. Το γύψινο εκμαγείο είναι ακριβές αλλά είναι δύσκολο στην κατασκευή του. Για τον λόγο αυτό, συνηθίζεται να κατασκευάζονται εκμαγεία από ελαστικά με ή χωρίς γύψινη «εσάρπα» (κέλυφος). Χωρίς να είναι πάντα απαραίτητη, η εσάρπα βοηθάει στην σταθεροποίηση του ελαστικού και την τοποθέτησή του σε ακριβή θέση.

2.1.1 Εκμαγεία χωρίς «εσάρπα» (κέλυφος)

Τα εκμαγεία χωρίς εσάρπα γίνονται για μικρά κυρίως γλυπτά που παρουσιάζουν ισορροπία κατ' άξονα. Γενικά για να κατασκευαστεί το εκμαγείο ενός έργου χωρίς εσάρπα το πρόπλασμα πρέπει να είναι κωνικής μορφής. Το έργο τοποθετείται σε μία σταθερή κιβωτιόσχημη μορφή και χυτεύεται ελαστικό. Ακολουθώντας το ελαστικό κόβεται με κοπίδι σε δύο μέρη έτσι ώστε το έργο να μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα μέσα από αυτό (Εικόνα 1).



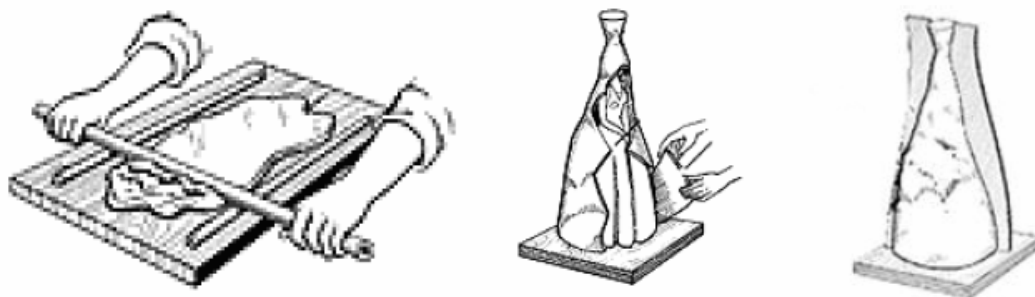
Εικόνα 1: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων χωρίς εσάρπα

2.1.2 Εκμαγεία με εσάρπα

Το πρόπλασμα καλύπτεται με φύλλο πηλού πάχους 3-5 cm, το οποίο με την σειρά του καλύπτεται με γύψινη εσάρπα (Εικόνες 2, 3, 4, 5,6).

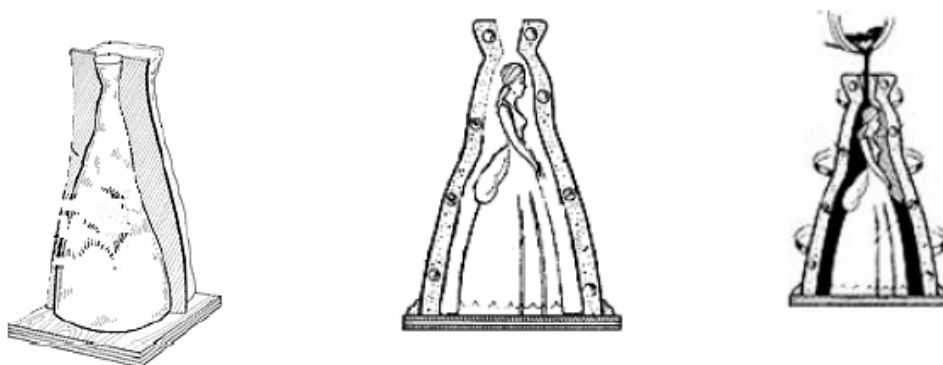
Σε κάθε μέρος κατασκευάζεται διαδοχικά μία εσάρπα από γύψο. Στο πρώτο μέρος σκαλίζονται εσοχές έτσι ώστε μόλις κατασκευαστεί το δεύτερο μέρος, οι εσοχές αυτές να γίνουν οδηγοί και να ταυτίζεται η ένωση στα τμήματα της εσάρπας.

Όταν η γύψος σκληρυνθεί, αφαιρείται η εσάρπα και καθαρίζονται σχολαστικά ο πηλός και το πρόπλασμα. Καθαρό πλέον, το πρόπλασμα περιβάλλεται από την εσάρπα από την οποία έχουν αφαιρεθεί τα υπολείμματα της πλαστελίνης ή του πηλού. Στην εσάρπα ανοίγεται μία κεντρική οπή και μικρότερες οπές εξαερισμού. Από την κεντρική οπή διοχετεύεται ελαστικό υλικό σε υγρή μορφή το οποίο περιβάλλει το πρόπλασμα. Με την στερεοποίηση του ελαστικού δημιουργείται το ελαστικό εκμαγείο.



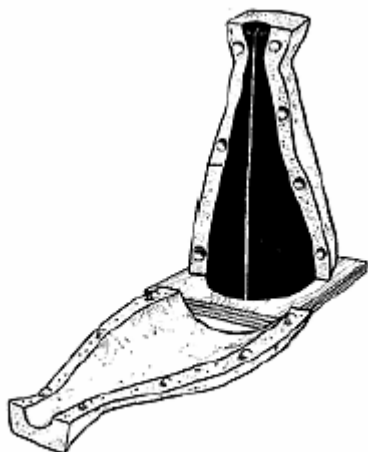
Εικόνα 2: Προεργασία ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα.

Μετά την αφαίρεση της εσάρπας, το ελαστικό κόβεται έτσι ώστε η ένωση των μερών του ελαστικού να μην συμπίπτει με την ένωση των μερών της εσάρπας (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα

Εναλλακτικά μπορεί το ελαστικό να χυτευτεί σε δύο μέρη, για να αποφευχθεί η εκ των υστέρων κοπή του. Για να γίνει αυτό χωρίζονται τα μέρη του προπλάσματος που θα χυτευτεί το ελαστικό με οδηγούς από πηλό. Ακολουθώντας χυτεύεται το ελαστικό στο πρώτο μέρος του έργου ενώ μετά την πήξη του πρώτου μέρους χυτεύεται και το δεύτερο μέρος αφού έχει επαλειφθεί η επιφάνεια της ένωσης με μονωτικό υλικό (αν είναι απαραίτητο) έτσι ώστε να μην συγκολληθούν τα δύο ελαστικά μεταξύ τους. Εκτός από τα ελαστικά σε υγρή μορφή, έχουν αναπτυχθεί και ελαστικά τα οποία είναι σε στερεά μορφή και ζυμώνονται με καταλύτη για να αποκτήσουν την



Εικόνα 4: Κατασκευή ελαστικών εκμαγείων με εσάρπα

τελική τους μορφή. Τα ελαστικά αυτά εφαρμόζονται με πίεση επάνω στο έργο και αποφεύγεται η διαδικασία της χύτευσης του ελαστικού. Εξάλλου ο ψεκασμός, η επάλειψη αλλά και η εφαρμογή του ελαστικού με πίεση στο έργο προφυλάσσει από τις εκπλήξεις που μπορεί να επιφυλάσσει η χύτευση του ελαστικού.

Σημαντικό μειονέκτημα κατά την διαδικασία της χύτευσης, είναι ότι στις κοιλότητες του προπλάσματος εγκλωβίζεται αέρας ο οποίος δεν επιτρέπει στο ελαστικό να πάρει την θέση του επάνω στο πρόπλασμα. Αυτή είναι μία συνήθης αστοχία που παρατηρείται σε εκμαγεία από χυτά ελαστικά.

Για να αποφευχθεί αυτό δημιουργούνται κατασκευαστικές λύσεις έτσι ώστε να διευκολύνεται η διαφυγή του αέρα κατά την χύτευση του ελαστικού του εκμαγείου (σχεδιασμός που είναι απαραίτητος σε κάθε μορφή χύτευσης). Η χύτευση του ελαστικού γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε με την είσοδο του ρευστού ελαστικού να αποβάλλεται ο αέρας (που ενδεχομένως εγκλωβίζεται) προς το εξωτερικό του μητρικού εκμαγείου.



Εικόνα 5: Κατασκευή ελαστικού εκμαγείου με εσάρπα

Για την κατασκευή κάθε εκμαγείου απαιτείται διαφορετικός σχεδιασμός των μεθόδων που περιγράφηκαν και εξαρτάται από την ιδιομορφία του κάθε προπλάσματος.



Εικόνα 6: Κατασκευή ελαστικού εκμαγείου με εσάρπα

2.2 Γύψος

2.2.1 Γενικά

Η γύψος δεν είναι πρόσφατο υλικό για την κατασκευή εκμαγείων. Ως εύπλαστη αλλά και σταθερή ύλη χρησιμοποιήθηκε κατ' αρχήν για αποτύπωση των χαρακτηριστικών του προσώπου νεκρών προγόνων. Τα παλαιότερα γύψινα νεκρικά προσώπια ανάγονται στην 6η χιλιετία π.Χ. όπως αποκάλυψαν το 1953 ανασκαφές στην Ιεριχώ της Μεσοποταμίας.

Εκτός από την Μεσοποταμία και στην Αίγυπτο υπήρχαν κατασκευές με γύψο ιδιαίτερα ως επίχρυσμα για την εξομάλυνση της τοιχοποιίας. Η λείανση της τοιχοποιίας ήταν απαραίτητη για την εξαιρετικά λεπτή ζωγραφική με Ιερογλυφικά. Οι Αιγύπτιοι είχαν ειδικά εκπαιδευμένους τεχνίτες για την κατασκευή προπλάσμάτων γύψου καθώς επίσης και εκμαγείων γύψου. Η ανακάλυψη του εργαστηρίου του γλύπτη Θουτμόζου που ανακαλύφθηκε το 1912 ήταν το μεγαλύτερο επίτευγμα στην ιστορία της Αιγυπτιολογίας. Στο εργαστήριό του, στο οποίο εργάζονταν το 1350 π.Χ. είχαν παραμείνει 20 γύψινα εκμαγεία που είχαν δημιουργηθεί από πήλινα προπλάσματα ενώ εκτός αυτού βρέθηκαν και αρκετά γύψινα και πέτρινα γλυπτά.

Στο Αιγυπτιακό εργαστήριο ο γλύπτης σημείωνε επάνω στο γλυπτό τον όγκο που ήθελε να αφαιρεθεί. Ακολουθώντας οι βοηθοί του υλοποιούσαν τις οδηγίες του. Όλα γύρω του ήταν έτσι ώστε να ευχαριστούν την όρασή του μέχρι τα γλυπτά να πάρουν την θέση τους στην Αιγυπτιακή Ιστορία.

Σύμφωνα με τον Πλίνιο ο Λυσίστρατος ο Σικυώνιος, αδελφός του περίφημου γλύπτη Λύσιππου, αναφέρει ότι ο Λύσιππος για το πρώτο του γύψινο εκμαγείο χρησιμοποίησε απευθείας το όμορφο πρόσωπο ενός νέου άνδρα και αφού κατασκεύασε το θετικό αντίγραφο, το τελειοποίησε με τη σμίλη. Στην ρωμαϊκή εποχή η γυψοπλαστική γνωρίζει ευρύτατη διάδοση με την κατασκευή των νεκρικών προσωπείων των προγόνων, τα οποία ευλαβικά φυλάσσονται μαζί με τους οικογενειακούς θεούς, τους λάτρητες, στα λαράρια (εικονοστάσια) των σπιτιών. Στην Δύση η γύψος χρησιμοποιήθηκε ευρέως όταν εξαιρετικά κοιτάσματα γύψου στην Γαλλία έκαναν την Γύψο του Παρισιού ένα από τα διασημότερα είδη γύψου στον κόσμο. Η Γύψος του Παρισιού ήταν επί της ουσίας το υλικό που έφερε σε μαζική επαφή την γύψο με τον Δυτικό πολιτισμό.

2.2.2 Ιδιότητες της γύψου

Ονομάζεται πλαστική γύψος το προϊόν που προκύπτει από την όπτηση της φυσικής γύψου σε θερμοκρασίες 120-180° C και που φέρεται στο εμπόριο με την μορφή της λεπτής υπόλευκης μέχρι λευκής σκόνης. Η όπτηση της φυσικής γύψου γίνεται σήμερα σε περιφλεγή σιδηρά καμίνια γιατί η γύψος δεν πρέπει να έρχεται σε άμεση επαφή με τις φλόγες της εστίας.

Η γύψος είναι λευκή σκόνη και έχει ειδικό βάρος 2,6-2,65 και φαινόμενο βάρος 0,8-1,4 ανάλογα με την στίβαξη που θα υποστεί κατά την αποθήκευση.

Η γύψος συσκευάζεται σε σάκους οι οποίοι πρέπει να διατηρούνται σε ξηρές αποθήκες γιατί απορροφά εύκολα υγρασία από τον αέρα. Επίσης πρέπει να χρησιμοποιείται ταχέως μετά την παρασκευή της.

Όταν αναμειχθεί με το νερό προσλαμβάνει εύκολα όλο το νερό που έχασε κατά την όπτηση και σκληρύνεται αφού προηγουμένως μετατραπεί σε φυσική γύψο (ένυδρο θειικό ασβέστιο) με έκλυση θερμότητας κατά την αντίδραση: $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{θερμότητα}$

Κατά την πήξη η θερμοκρασία υψώνεται αισθητά. Η πλαστική γύψος χρειάζεται περίπου 18.6% νερό για να μετατραπεί σε ένυδρο θειικό ασβέστιο. Στην πράξη όμως για την παρασκευή ενός πλαστικού και εργάσιμου πολτού απαιτείται τριπλάσια ως τετραπλάσια ποσότητα νερού από την θεωρητική δηλαδή 60-80% του βάρους της γύψου.

Η πήξη-σκλήρυνση οφείλεται στην ενυδάτωση του ημιυδρικού άλατος και στην απόθεση κρυστάλλων από υπέρκορα διαλύματα. Ακολουθώς οι κρύσταλλοι συμπλέκονται και προσφύονται μεταξύ τους.

Στην πήξη και στην σκλήρυνση της πλαστικής γύψου δεν συμμετέχει το CO_2 της ατμόσφαιρας και συνεπώς η πλαστική γύψος θα μπορούσε να θεωρηθεί ως υδραυλική κονία. Επειδή όμως δεν διατηρείται σε υγρό περιβάλλον λόγω της διαλυτότητας του θειικού άλατος κατατάσσεται στις αερικές κονίες.

Η πήξη του πολτού αρχίζει αμέσως μετά τον σχηματισμό του και συμπληρώνεται συνήθως στα δέκα πρώτα λεπτά ή το αργότερο σε μισή ώρα. Για τον λόγο αυτό η γύψος είναι κονία ταχύπηκτος. Αν γίνει η πήξη της γύψου σε χρόνο μεγαλύτερο από 1 με 1 1/2 ώρα η γύψος δεν θεωρείται πλαστική.

Ο χρόνος της πήξης της γύψου εξαρτάται από την ποιότητά της. Όσο λεπτότερη είναι η κονία τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος πήξης. Αντίθετα ο χρόνος γίνεται μεγαλύτερος όταν η γύψος περιέχει ξένα συστατικά, το άλεσμα είναι χονδρότερο, η όπτηση είναι μακρύτερη ή εφόσον κατά τον σχηματισμό του πολτού αναμίχθηκαν και ξένες προσμίξεις όπως πριονίδια ξύλου φυτικές ή ζωικές ίνες κ.λ.π.

Είναι δυνατόν να γίνει εύκολα επιβράδυνση της πήξης μιας κανονικής γύψου με προσθήκη αραιού διαλύματος ζωικής κόλλας (οπότε ο αντίστοιχος πολτός γίνεται συνεκτικότερος, στιλπνότερος και έχει ισχυρή πρόσφυση) και με διάφορα άλλα αδρανή προσμίγματα όπως βόρακας, φωσφορικό νάτριο κ.λ.π. Κατ' εξαίρεση με προσθήκη διαλύματος μαγειρικού άλατος ή θειικού καλίου σε γύψο κακής ποιότητας επιτυγχάνεται η αισθητή επιτάχυνση του χρόνου πήξης της. Η πλαστική γύψος αντίθετα προς τις άλλες δομήσιμες κονίες διογκώνεται αισθητά κατά την πήξη της. Η διόγκωση αυτή μετά από 24 ώρες φτάνει το 1% του αρχικού όγκου του πολτού. Λόγω της ιδιότητας αυτής τα από γύψο εκμαγεία αποτυπώνουν κάθε λεπτομέρεια του προτύπου. Τα αντικείμενα από πλαστική γύψο όταν εκτεθούν στην υγρασία και ιδίως στην επίδραση του νερού υφίστανται με τον χρόνο βραδεία επιφανειακή διάβρωση, λόγω της διαλυτότητας της πλαστικής γύψου. Για τον λόγο αυτόν τα γύψινα

αντικείμενα είναι ακατάλληλα για εξωτερικές διακοσμήσεις και τοποθετούνται αποκλειστικά στο εσωτερικό χώρο. Τα αντικείμενα αυτά είναι δυνατό να αποκτήσουν μεγαλύτερη αντοχή με ειδικές επιφανειακές κατεργασίες. Οι σπουδαιότερες από αυτές είναι

- εμποτισμός με διάλυμα παραφίνης, βενζίνης, τερεβινθέλαιο.
- χρωματισμός ή επιχρύσωση που συνήθως γίνεται με χρυσόχρωμο βερνίκι από λινέλαιο και σκόνη θειούχου κασσίτερου Sn S₂ (ψευδής χρυσός) σκλήρυνση της επιφάνειας με εμβάπτιση σε διάλυμα υδροξειδίου του Βαρίου ή πυριτικού οξέος.

2.2.3 Χρήση της γύψου

Η χρήση της γύψου στην γλυπτική γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία. Κατ' αρχήν η γύψος κοσκινίζεται μέσα σε λεκάνη με νερό και όχι προσθήκη νερού στην γύψο. Η λεκάνη χρήσιμο είναι να παραμορφώνεται έτσι ώστε να καθαρίζεται εύκολα. Μόλις το νερό κορεστεί από την γύψο και υπάρχει λεπτή επιφάνεια λεπτού στρώματος αδιάλυτης γύψου (1 έως 3 mm πάχους) επάνω από τον πολτό τότε η γύψος είναι έτοιμη προς χρήση.

Όταν η γύψος ανακατευτεί επιταχύνεται η πήξη της. Για τον λόγο αυτό ο γλύπτης παίρνει γύψο από ένα συγκεκριμένο μέρος του δοχείου, χωρίς να ανακατεύει ολόκληρο το πολτό. Επειδή η γύψος στο στάδιο αυτό είναι παχύρρευστο ρευστό χρησιμοποιείται οπλισμός ίνες ή ύφασμα για την βελτίωση των μηχανικών αντοχών της. Ο οπλισμός αυτός εμβαπτίζεται μέσα στο παχύρρευστο υγρό και το υλικό τοποθετείται επάνω σε σκελετό ή διαμορφώνεται το μέρος ενός εκμαγείου που θέλουμε να κατασκευαστεί. Μετά από 10 έως 15 λεπτά όπου η γύψος θα περάσει στο στάδιο της πήξης (θα «τραβήξει») η γύψος μπορεί να τοποθετηθεί με ένα πλατύ μαχαίρι επάνω μέρος που θέλουμε να μορφοποιηθεί. Για να κατασκευαστεί κατ' ευθείαν το πρόπλασμα από γύψο απαιτείται ιδιαίτερη επιδεξιότητα και εμπειρία. Το πρόπλασμα από γύψο γίνεται αφού έχει κατασκευαστεί ο σκελετός του έργου. Στον σκελετό διαμορφώνονται οι κύριοι όγκοι με εφημερίδες εμβαπτισμένες σε γύψο. Πολτός γύψου επικαλύπτει τους κυρίως όγκους και επάνω σε αυτόν μορφοποιούνται οι λεπτομέρειες του έργου.

Οι γλύπτες παρατηρούν ότι σε αντίθεση με τον πηλό, η γύψος αποκαλύπτει αμέσως τις αδυναμίες του έργου. Γενικά, η γύψος χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή εκμαγείων και την κατασκευή προσωρινών θετικών αντιγράφων με χύτευση.

2.3 Ελαστικά

2.3.1 Γενικά

Σήμερα χρησιμοποιείται μεγάλη ποικιλία από διαφορετικά ευέλικτα ελαστικά προϊόντα για την κατασκευή των εκμαγείων για τους εξής λόγους:

- Τα ελαστικά μπορούν και δίνουν ακριβές αντίγραφο του προπλάσματος.
- Λόγω της ελαστικότητας τους μπορούν να ξεκαλουπωθούν εύκολα.
- Γενικά αντέχουν αρκετά στην χρήση και την επανάληψη των αντιγράφων.

Συνήθη ελαστικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή εκμαγείων είναι το latex (καοτσούκ), τα πολυσουλφίδια, οι πολυουρεθάνες και οι σιλικόνες. Πολλά από τα ελαστικά αυτά είναι δύο συστατικών. Το πρώτο συστατικό αναμειγνύεται με το έτερο συστατικό σε ορισμένη αναλογία και ακολούθως το υλικό είτε χυτεύεται επάνω στην επιφάνεια του προπλάσματος, είτε επαλείφεται με πινέλο, είτε ψεκάζεται στο υλικό.

Η επιτυχία του ελαστικού να παρακολουθήσει το πρόπλασμα εξαρτάται από την αναλογία πρόσμιξης, την ικανότητα παραμόρφωσης του ελαστικού και το ιξώδες του ελαστικού.

2.3.2 Ιδιότητες των ελαστικών

2.3.2.1 Αναλογία πρόσμιξης

Εκφράζει το ποσοστό ανάμειξης (σε βάρος ή όγκο) του ενός μέρους που πρέπει να αναμειχθεί με το δεύτερο μέρος πριν την χρήση. Η αναλογία ποικίλει από προϊόν σε προϊόν και εξαρτάται από τις οδηγίες του κατασκευαστή για κάθε υλικό.

2.3.2.2 Ικανότητα παραμόρφωσης του ελαστικού

Η ικανότητα παραμόρφωσης ενός ελαστικού, διαβαθμίζεται στο εμπόριο από το ιδιαίτερα μαλακό με σκληρότητα το ελατό 0A έως το ανελαστικό 95 A. Όσο μικρότερη είναι η σκληρότητα τόσο περισσότερο ελαστικό είναι το εκμαγείο.

Εάν ένα πρόπλασμα έχει έντονες γωνίες ή κοιλότητες, αν δεν μπορεί να παραμορφωθεί δεν θα μπορέσει να ξεκαλουπωθεί. Για τον λόγο αυτό για τέτοιου τύπου προπλάσματα απαιτείται ελαστικό με μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης 15A έως 30A.

Εάν το πρόπλασμα δεν έχει έντονες γωνίες ή πολλές κοιλότητες τότε είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί και ελαστικό με σκληρότητα 50A. Μόνο στην περίπτωση που το πρόπλασμα είναι εντελώς αφαιρετικής μορφής, δεν έχει καθόλου κοιλότητες και θέλουμε να παραχθεί σε τσιμέντο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ελαστικό σκληρότητας 80A που θα δώσει και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο εκμαγείο.

2.3.2.3 Ιξώδες

Ιξώδης είναι η ρεολογική συμπεριφορά των υλικών σε υγρή κατάσταση και μελετάται με την βοήθεια ειδικού οργάνου του βισκομέτρου. Για τα ιδανικά ιξώδη υγρά υπάρχει αναλογία μεταξύ της διατμητικής τάσης, τ , και της ταχύτητας της διατμητικής παραμόρφωσης $\dot{\gamma}$. Το νερό έχει ιξώδες 1cps. Η μελάσα έχει ιξώδες 100.000 cps .

Το ιξώδες έχει ιδιαίτερη σημασία στην επιλογή ενός ελαστικού. Όσο μεγαλύτερο είναι το ιξώδες του ελαστικού τόσο δυσκολότερο είναι να παρακολουθήσει τις λεπτομέρειες του προπλάσματος χωρίς βοήθεια. Επίσης όσο μικρότερο ιξώδες έχει ένα υλικό τόσο καλύτερα θα συμπεριφερθεί κατά την χύτευσή του.

Τα περισσότερα ελαστικά με βάση τη σιλικόνη έχουν μεγάλο ιξώδες από 20.000 cps έως 150.000 cps και για τον λόγο αυτό συνίσταται η τοποθέτηση του μείγματος σε κενό αέρος για να αφαιρεθούν από το μείγμα ενδεχόμενες φυσαλίδες που θα προκληθούν κατά την ανάμειξη και τη χύτευση. Διαφορετικά οι φυσαλίδες που θα αποτυπωθούν επάνω στην επιφάνεια του προπλάσματος και θα παραμορφώσουν την τελική επιφάνεια του έργου. Η πολυουρεθάνες έχουν σχετικά μικρό ιξώδες 800- 4500 cps και μπορούν να αποβάλουν από μόνες τους τον αέρα που ενδεχομένως περιέχουν.

Νερό	1 cps
Μαγειρικό λάδι	500 cps
Λάδι μηχανής	2.500 cps
Μελάσα	100.000 cps

Πίνακας 2: Ιξώδες. Χαρακτηριστικές τιμές

2.3.3 Συνήθη ελαστικά υλικά εκμαγείων *Latex* (καουτσούκ)

Το καουτσούκ είναι φυσικό ελαστικό που παράγεται από δέντρα. Για να γίνει το υλικό χρήσιμο για εκμαγεία παρασκευάζεται διάλυμα με αμμωνία και νερό. Το καουτσούκ επαλείφεται πάνω στο πρόπλασμα και δεν χυτεύεται.

Το καουτσούκ δεν είναι ιδιαίτερα ακριβό. Τα εκμαγεία με καουτσούκ είναι ελαστικά με λεπτά τοιχώματα σχετικά ανθεκτικά με ικανοποιητική αντοχή. Λόγω της μεγάλης ελαστικότητας του καουτσούκ το εκμαγείο είναι πολύ εύκολο στο ξεκαλούπωμα. Τα εκμαγεία από καουτσούκ είναι ιδανικά για κατασκευή αντιγράφων μικρών έργων από κονίαμα, καθώς επίσης και για κερή ή γύψο.

Η κατασκευή εκμαγείων από καουτσούκ είναι επίπονη και χρονοβόρος. Η κατασκευή του εκμαγείου απαιτεί επάλειψη του έργου με πινέλο σε στρώσεις (τουλάχιστον είκοσι). Για κάθε στρώση απαιτούνται τέσσερις ώρες αναμονής για να στερεοποιηθεί το προηγούμενο υλικό. Έτσι για να κατασκευαστεί ένα εκμαγείο από καουτσούκ απαιτούνται περίπου δέκα μέρες. Εκτός αυτού πολλά προϊόντα από καουτσούκ έχουν αμμωνία και εκπέμπουν αρωματικούς υδρογονάνθρακες. Στα εκμαγεία που έχουν κατασκευαστεί με καουτσούκ δεν ενδείκνυται η χύτευση συνθετικής ρητίνης.

Ελαστικά πολυσουλφίδια

Τα ελαστικά από πολυσουλφίδια χρησιμοποιούνται ευρέως για κατασκευή εκμαγείων. Είναι υλικά δύο συστατικών και απαιτείται ακριβής ανάμειξη των μερών βάρους των δύο συστατικών σύμφωνα με τις οδηγίες. Μπορούν να εφαρμοστούν επάνω στο πρόπλασμα και με επάλειψη αλλά και με χύτευση. Έχουν μεγάλη ικανότητα παραμόρφωσης και αντέχουν στον χρόνο. Δεν επηρεάζονται από υγρασία που υπάρχει στο πρόπλασμα όπως τα άλλα ελαστικά. Τα εκμαγεία από πολυσουλφίδια είναι κατάλληλα για κατασκευή αντιγράφων κεριού και γύψου αλλά όχι τσιμέντου και συνθετικής ρητίνης. Τα περισσότερο συνηθισμένα ελαστικά από πολυσουλφίδια έχουν έντονη οσμή. Πολλά από αυτά μπορεί να ρυπάνουν την γύψο αν έρθουν σε επαφή με αυτήν. Το κόστος τους είναι γενικά μεγαλύτερο από το καουτσούκ και από τις σιλικόνες.

Ελαστικά σιλικόνης

Αντίστοιχα με τα πολυσουλφίδια τα ελαστικά σιλικόνης είναι δύο συστατικών. Οι σιλικόνες διατίθεται σε σκληρές, μεσαίας σκληρότητας και μαλακές. Οι σιλικόνες μπορεί να σκληρύνονται με καταλύτη πλατίνα ή κασσίτερο. Είναι ιδιαίτερα εύχρηστες στην κατασκευή ενός εκμαγείου καθώς μπορεί να επαλειφθούν, να χυτευτούν ή και να ψεκαστούν επάνω στο πρόπλασμα και να πάρουν τα χαρακτηριστικά του με την καλλίτερη ακρίβεια από οποιοδήποτε άλλο ελαστικό.

Τα εκμαγεία από σιλικόνη έχουν την καλύτερη συμπεριφορά από τα άλλα εκμαγεία και είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για κατασκευή αντιγράφων με ρητίνες, (πολυουρεθάνες, πολυεστέρες και εποξειδικές). Τα ελαστικά από σιλικόνη είναι ανθεκτικά στη θερμοκρασία μέχρι περίπου (205°C). Η μεγάλη αντοχή στην θερμοκρασία κάνει την σιλικόνη το μόνο ελαστικό κατάλληλο για χύτευση μετάλλων με χαμηλό σημείο τήξεως (κασσίτερος, αντιμόνιο, μόλυβδος). Η σιλικόνη είναι η καλύτερη επιλογή για κατασκευή αντιγράφων από ρητίνη γιατί συνδυάζει πολύ καλές μηχανικές αντοχές, καλή χημική αδράνεια (σε σχέση με άλλα ελαστικά) και θερμική αντίσταση. Γενικά η σιλικόνη είναι ακριβότερη από τα άλλα ελαστικά. Η σιλικόνη αντιδρά με θειούχο άργιλο και δεν είναι κατάλληλη στην κατασκευή εκμαγείου από πρόπλασμα αυτής της συστάσεως. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την πήξη της είναι αρκετά μεγαλύτερο από τα πολυσουλφίδια αλλά μικρότερο από το καουτσούκ. Για την χρήση της σιλικόνης είναι απαραίτητο να γίνει ακριβής ανάμειξη των μερών βάρους σύμφωνα με τις οδηγίες. Οι σιλικόνες με καταλύτη κασσίτερο δεν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

Ελαστικά πολυουρεθάνης

Τα ελαστικά πολυουρεθάνης είναι και αυτά υλικά δύο συστατικών που καλύπτουν μεγάλη ποικιλία από εφαρμογές, με σχετικά χαμηλό κόστος. Τα ελαστικά πολυουρεθάνης είναι δυνατό να χυτευτούν, να επαλειφτούν, ή να ψεκαστούν επάνω στο πρόπλασμα. Η πολυουρεθάνη είναι εύκολη στην χρήση και την ανάμειξη σε μέρη όγκου.

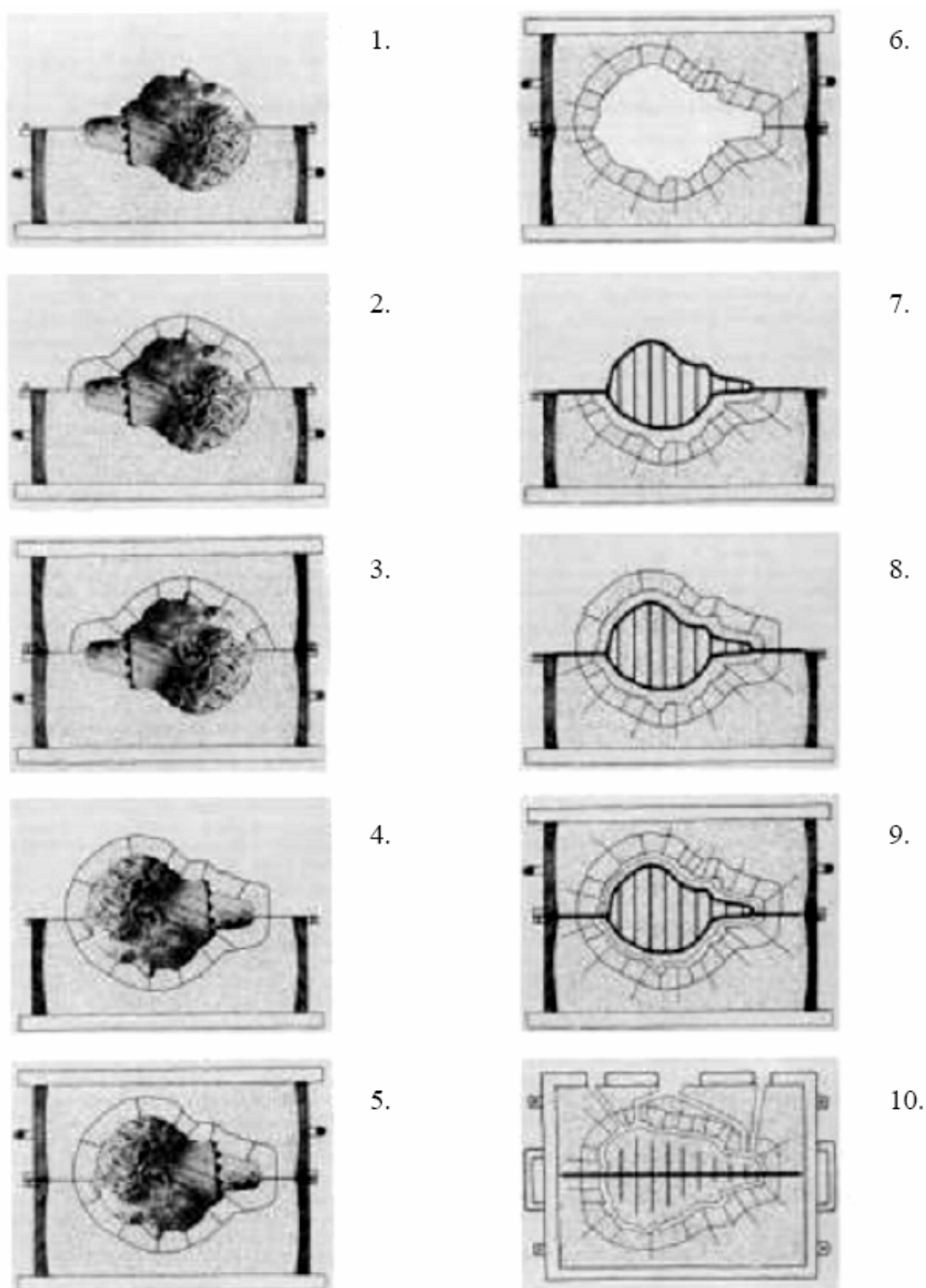
Ελαστικές πολυουρεθάνες είναι διαθέσιμες σε διάφορες σκληρότητες. Ανάλογα με το αντικείμενο και το υλικό που θέλουμε να κατασκευαστεί επιλέγεται και η κατάλληλη σύσταση. Σε υγρή μορφή έχουν χαμηλό ιξώδες. Έχουν όμως μεγάλη αντοχή σε τριβή και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ανθεκτικών εκμαγείων, όπως αντιγράφων τσιμέντου, είναι δέ περισσότερο οικονομικές από τις σιλικόνες και τα πολυσουλφίδια. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ελαστικών πολυουρεθάνης είναι ότι δεν είναι πολύ συνεκτικά και συγκολλούνται επάνω σε κάθε επιφάνεια ενώ κατά την διάρκεια της χύτευσης μπορεί να εμφανίσουν φυσαλίδες στην επιφάνεια του εκμαγείου. Σε υγρό περιβάλλον είναι δυνατόν να παρουσιάσουν κενά.

2.3.4 Χύτευση σε εκμαγείο άμμου

Η αρχή της χύτευσης με άμμο είναι σχετικά απλή. Το πρόπλασμα αφήνει το αποτύπωμά του πάνω στην άμμο. Το έργο αφαιρείται από το αποτύπωμα και παραμένει το αρνητικό στο εκμαγείο. Σε δεύτερο εκμαγείο αποτυπώνεται το υπόλοιπο μέρος του έργου που δεν έχει αποτυπωθεί στο αρχικό εκμαγείο. Στο αποτύπωμα αυτό σχεδιάζονται οι αγωγοί της εισόδου και της εξόδου του μετάλλου. Τα εκμαγεία ενώνονται και χυτεύεται το μέταλλο. Η διαδικασία είναι σαφώς απλούστερη από την χύτευση των έργων με χαμένο κερί, όμως δεν δίνει έργα μεγάλης ακρίβειας και πολλές λεπτομέρειες χάνονται με τη διαδικασία αυτή.

Τα έργα που μπορούν να χυτευτούν είναι μικρού όγκου ενώ δύσκολα χυτεύονται έργα με κοίλο εσωτερικό. Τα εκμαγεία χωρίς κοίλο εσωτερικό δέχονται μεγάλες πιέσεις κατά την χύτευση. Γι αυτό σε εκμαγεία από άμμο δεν είναι εύκολο να χυτευτούνε μεγάλα έργα αλλά κυρίως επιφάνειες και έργα χαμηλού αναγλύφου. Γενικά αποφεύγεται η χύτευση ολόγλυφων γλυπτών σε εκμαγεία από άμμο γιατί στα εκμαγεία αυτά δεν είναι εύκολο να αποτυπωθούν ολόγλυφα αντικείμενα. Σημαντικό μειονέκτημα που παρουσιάζεται στη χύτευση χαλκού σε εκμαγεία άμμου είναι οι ατέλειες που εμφανίζονται στο χάλκινο γλυπτό στην ένωση των εκμαγείων χύτευσης. Στην ένωση των εκμαγείων χύτευσης εμφανίζονται ραφές (γρέζια) τα οποία είναι ιδιαίτερα δύσκολο να καθαριστούν έτσι ώστε το έργο να διατηρήσει αναλλοίωτη την αρχική του μορφή. Η μέθοδος αυτή δεν προτιμάται στην κατασκευή γλυπτών έργων τέχνης, παρ' όλα αυτά όμως αποτελεί μία φτηνή λύση για την κατασκευή μικρών έργων, ενώ συνήθως με την τεχνική υτή κατασκευάζονται έργα χαμηλού αναγλύφου.

Εξέλιξη της μεθόδου χύτευσης με άμμο είναι η μέθοδος με χαμένο αφρό. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται όταν το πρόπλασμα της χύτευσης είναι σε πλαστικά (π.χ. φελιζόλ). Αν και η μέθοδος χύτευσης με άμμο γίνεται με οριζόντια χύτευση με την τεχνική του «χαμένου αφρού» μπορεί να γίνει και με κατακόρυφη χύτευση. Η μέθοδος αυτή απλοποιεί την τεχνική καθότι το πρόπλασμα της χύτευσης καλύπτεται με άμμο και με την εισαγωγή του μετάλλου καίγεται και εξαερώνεται.



Εικόνα 7: Χύτευση χαλκού σε άμμο με κοίλο εσωτερικό

2.3.5 Κατασκευή γλυπτού από φυσικό λίθο

Ένας ακόμη συμβατικός τρόπος που χρησιμοποιείται για την αντιγραφή έργων τέχνης – γλυπτών είναι και η «λήψη μέτρων» με τη χρήση συμβατικών μετροτεχνικών διατάξεων κι εξοπλισμού, όπως αυτός που φαίνεται στην Εικόνα 8. Ο εν λόγω εξοπλισμός είναι χειροκίνητος και η χρήση του απαιτεί ειδικές δεξιότητες, ενώ ο ρόλος του είναι κυρίως υποβοηθητικός στους τεχνίτες παραγωγής αντιγράφων (*copistes*).

Όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο επόμενο Κεφάλαιο 3, σήμερα, με τη χρήση των νέων τεχνολογιών, εισάγονται οι συντεταγμένες του γλυπτού/ προπλάσματος μέσω σαρωτή ακτίνας Laser απευθείας σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ παράλληλα, οι παντογράφοι κατασκευάζουν/ σκαλίζουν αυτοματοποιημένα το τρισδιάστατο αντικείμενο στο ζητούμενο όγκο υλικού και δημιουργούν αυτόματα το γλυπτό σε οποιοδήποτε υλικό με αφαιρετική διαδικασία.



Εικόνα 8: Αντιγραφή του έργου με συμβατικές μετρητικές διατάξεις από γύψο σε φυσικό λίθο.

Κεφάλαιο 3 - Σύγχρονες τεχνολογίες τεκμηρίωσης / τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

3.1 Εισαγωγή στην τρισδιάστατη ψηφιοποίηση

Η αποτύπωση αντικειμένων και σχημάτων με οπτικά μέσα χρονολογείται στις αρχές του 19ου αιώνα, την ίδια χρονική περίοδο που έχει τις ρίζες της και η φωτογραφική τέχνη. Από τότε μέχρι σήμερα η τεχνολογία αποτύπωσης με οπτικά μέσα έχει προχωρήσει με ραγδαίους ρυθμούς. Αυτή η τεχνολογική εξέλιξη είναι πια μέρος της καθημερινής μας ζωής, π.χ. ένας τυπικός σαρωτής εγγράφων αποτελεί πλέον αναπόσπαστο κομμάτι κάθε σύγχρονου γραφείου, καθώς επιτρέπει τη γρήγορη και αποτελεσματική ψηφιοποίηση οποιουδήποτε εγγράφου. Εξετάζοντας την ιδέα της ψηφιοποίησης για αντικείμενα **τριών διαστάσεων**, η διαδικασία απόκτησης τρισδιάστατων δεδομένων από πραγματικά αντικείμενα αποτελεί μείζον πρόβλημα ιδιαίτερα όταν η γεωμετρική τους πολυπλοκότητα ξεπερνά τα βασικά γεωμετρικά στερεά (*σφαίρες, πυραμίδες, κύβους κ.α.*). Παλαιότερα, η επίλυση του προβλήματος αυτού ήταν δύσκολη και οι τρόποι προσέγγισης χρονοβόροι. Η ανάπτυξη ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων και ψηφιακών μετρικών διατάξεων κατάφεραν να καθιερώσουν μια συνεχώς εξελίξιμη αγορά *τρειςδιάστατων σαρωτών*.

Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν πλέον την καταγραφή τόσο της γεωμετρικής όσο και της χρωματικής πληροφορίας που φέρουν τα αντικείμενα μέσα σε ελάχιστο χρόνο. Οι αρχές λειτουργίας τους βασίζονται στην εφαρμογή γεωμετρικών αξιωμάτων και συναρτήσεων. Πρότυπα ακαδημαϊκά αλλά και εμπορικά συστήματα επιδιώκουν να δώσουν απάντηση στην τρισδιάστατη αποτύπωση, το καθένα από τη δική του σκοπιά, κάνοντας συγκεκριμένες παραδοχές. Το μεγάλο ενδιαφέρον της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας εστιάζεται στην ανάλυση των μεθόδων αποτύπωσης αλλά και στην ανάπτυξη αλγορίθμων που θα επιτρέψουν την επεξεργασία των δεδομένων με αποδοτικότερους τρόπους. Η ανάπτυξη των τρισδιάστατων σαρωτών είναι αποτέλεσμα συλλογικής δουλειάς επιστημόνων από διαφορετικά ερευνητικά πεδία, όπως είναι αυτά της όρασης υπολογιστών, των τρισδιάστατων γραφικών, της μηχανολογίας, των μετρήσεων με ηλεκτρονικά αισθητήρια, της φωτογραμμετρίας και, φυσικά, των μαθηματικών.

Βασικό ρόλο στην εξάπλωση της χρήσης των τρισδιάστατων σαρωτών παίζει η δραματική βελτίωση των ηλεκτρονικών υπολογιστών στον τομέα των τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου. Η δυνατότητα διαχείρισης πολύπλοκης τρισδιάστατης γεωμετρίας σε πλατφόρμες χαμηλού κόστους βρίσκει άμεση εφαρμογή στην απεικόνιση λεπτομερών και υψηλής ακρίβειας τρισδιάστατων μοντέλων που δημιουργούν οι σαρωτές. Απώτερος σκοπός όλων των ερευνητικών προσπαθειών είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου

αποτύπωσης σε συνδυασμό με υψηλής πιστότητας αποτελέσματα. Μέχρι τη στιγμή της συγγραφής της παρούσας εργασίας, μόνο η μέθοδος *Σχήμα-Από-Σιλουέτες* προσεγγίζει την ιδέα *σάρωσης-με-το-πάτημα ενός-πλήκτρου*. Ωστόσο τα αποτελέσματά της έχουν εφαρμογή κυρίως στο ηλεκτρονικό εμπόριο όπου μια απλά ρεαλιστική και όχι υψηλής ακρίβειας τρισδιάστατη απόδοση του αντικείμενου είναι επαρκής. **Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται γεωμετρική ακρίβεια, εφαρμόζονται τεχνικές σάρωσης με ακτίνες λέιζερ.**

Στην πραγματικότητα η διαδικασία τρισδιάστατης σάρωσης χαρακτηρίζεται μάλλον σύνθετη, και εμπλέκει μια ακολουθία διαφορετικών διαδικασιών που αναλύονται σε βάθος στις επόμενες παραγράφους. Αρχικά δίνεται ο ορισμός της *τρειςδιάστατης σάρωσης* και γίνεται ο βασικός διαχωρισμός των διαθέσιμων μεθοδολογιών και στη συνέχεια τονίζεται η ανάγκη ψηφιοποίησης και προβολής της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Στο σημείο αυτό, θα ήταν χρήσιμο να ορίσουμε ως **κινητά πολιτιστικά αντικείμενα** όλα τα αντικείμενα της πολιτιστικής κληρονομιάς των οποίων οι διαστάσεις τους κυμαίνονται από κάποια εκατοστά έως και μερικά μετρά. Ο όρος «κινητά» δεν αφορά πάντα στην ιδιότητα του αντικείμενου να δύναται να μετακινηθεί αλλά έχει να κάνει και με την κατηγοριοποίησή του βάση της εφαρμοσιμότητας που έχουν συγκεκριμένες μεθοδολογίες αποτύπωσης.

3.1.1 Οριοθέτηση και Ορισμοί τρισδιάστατης ψηφιακής σάρωσης

Η ποικιλία των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικείμενου έχει οδηγήσει στον προβληματισμό για το αν τελικά η *Τρισδιάστατη Σάρωση*, ως έννοια, ανήκει στις γεωδαιτικές μελέτες, στη φωτογραμμετρία ή/και την όραση υπολογιστών. Βλέποντας όμως το θέμα από την πλευρά του χρήστη το αποτέλεσμα είναι αυτό που μετράει ανεξάρτητα της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε. Γενικότερα, ως *τρειςδιάστατο σαρωτή (3D scanner)* θα μπορούσαμε να ορίσουμε οποιαδήποτε συσκευή δύναται να συλλέξει *τρειςδιάστατες συντεταγμένες από μία δεδομένη περιοχή πάνω στην επιφάνεια ενός αντικείμενου*, η οποία πληρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ακολουθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται σε κάποιο πρότυπο
- Πραγματοποιεί δειγματοληψία υψηλού ρυθμού (εκατοντάδες ή χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο)
- Επιταχύνει τη διαδικασία, ώστε να πραγματοποιείται σε πραγματικό (σχεδόν) χρόνο
- Δύναται ή και όχι να διακρίνει χρωματική πληροφορία της εκάστοτε επιφάνειας σε συνδυασμό με την τρισδιάστατη γεωμετρία της.

Ο τρόπος χρήσης μια τέτοιας συσκευής είναι :

- είτε σταθερός σε κάποια συγκεκριμένη θέση
- είτε πάνω σε κάποιον κλασικό, φωτογραφικού τύπου, τρίποδα

- είτε σε παρόμοιες μεταφερόμενες βάσεις
- είτε εν πτήση όταν πρόκειται για τοπογραφικές εφαρμογές.

Η σάρωση ενός αντικειμένου είναι πολλές φορές το εύκολο τμήμα μιας εργασίας ψηφιοποίησης. Η δημιουργία **πιστών τρισδιάστατων αναπαραστάσεων που αποτελούνται από ελεύθερες επιφάνειες απαιτούν συνήθως πολύ χρόνο και εργασία**. Η τρισδιάστατη σάρωση είναι ένα σημαντικό νέο εργαλείο για την τεκμηρίωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Ως λύση, δεν αποτελεί πανάκεια, όπως πολλοί υποστηρίζουν (κυρίως οι εταιρίες ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων). Χωρίς αμφιβολία οι τρισδιάστατοι σαρωτές ταιριάζουν απόλυτα σε εφαρμογές μετρήσεων ελεύθερων / «ακανόνιστων» επιφανειών και είναι προς το παρόν και η καλύτερη *διαθέσιμη* μέθοδος. Ωστόσο η αμιγής και μόνο συλλογή δεδομένων δεν είναι επαρκής. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην μετέπειτα επεξεργασία των δεδομένων. Ο χρόνος που απαιτείται για την δημιουργία ενός υψηλής πιστότητας τρισδιάστατου μοντέλου είναι πολλές φορές πολύ μεγαλύτερος από τον χρόνο σάρωσης.

3.1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται κάποια συνοπτικά και εισαγωγικά στοιχεία από την τεχνική ορολογία που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε ολόκληρη την Εργασία.

3.1.2.1 Τρισδιάστατη όραση υπολογιστών

Η δισδιάστατη όραση (π.χ. κλασική φωτογράφιση) προσπαθεί να ερμηνεύσει ένα τρισδιάστατο περιβάλλον χρησιμοποιώντας προβολές που δημιουργούνται από τα οπτικά αισθητήρια στις κάμερες (στατικές ή βίντεο). Η δισδιάστατη όραση προσφέρει περιορισμένη πληροφορία σχετικά με τις λεπτομέρειες του σχήματος ενός αντικειμένου.

Αντίθετα, η τρισδιάστατη όραση υπολογιστών ασχολείται πρωτίστως με την κατανόηση οπτικής πληροφορίας, όπως αυτή συλλέγεται από εξειδικευμένα ηλεκτρονικά οπτικά αισθητήρια. Συνεπώς, ασχολείται με την εξαγωγή, προς κτήση και κατανόηση δεδομένων από τη γεωμετρία και την υφή των επιφανειών των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε μία σκηνή. 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 για τα αντικείμενα έχουν να κάνουν με τη θέση τους στον τρισδιάστατο χώρο. Η πληροφορία αυτή έρχεται να εξαλείψει όλες τις ασάφειες που παρουσιάζουν τα δισδιάστατα συστήματα απεικόνισης.

3.1.2.2 Αναπαράσταση τρισδιάστατων επιφανειών

3.1.2.2.1 Χάρτης βάθους

Ο απλούστερος τρόπος αναπαράστασης και αποθήκευσης τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικειμένου είναι με τη χρήση *χαρτών βάθους* (depth maps). Ο χάρτης βάθους (Εικόνα 9α) είναι μια δισδιάστατη εικόνα βεληνεκούς, όπου κάθε εικονοστοιχείο της παίρνει μια χρωματική τιμή από τις διαβαθμίσεις του γκρι. Η χρωματική τιμή υποδηλώνει την απόσταση του σημείου από τον οπτικό αισθητήρα στον τρισδιάστατο χώρο. Δύο είναι οι πιο γνωστές μεθοδολογίες δημιουργίας χαρτών βάθους: με την εκπομπή σήματος (Radar) και με τριγωνοποίηση.

3.1.2.2.2 Νέφος σημείων

Ως νέφος σημείων ορίζεται ένα σύνολο σημείων που μοιράζονται το ίδιο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Κάθε σημείο φέρει πληροφορία που το τοποθετεί σε μία συγκεκριμένη θέση μέσα στον τρισδιάστατο χώρο και αντιστοιχεί σε μια θέση πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου που ψηφιοποιήθηκε. Η πληροφορία αυτή είναι τρεις διαφορετικές τιμές, μία για κάθε άξονα (x,y,z). (Εικόνα 9β)

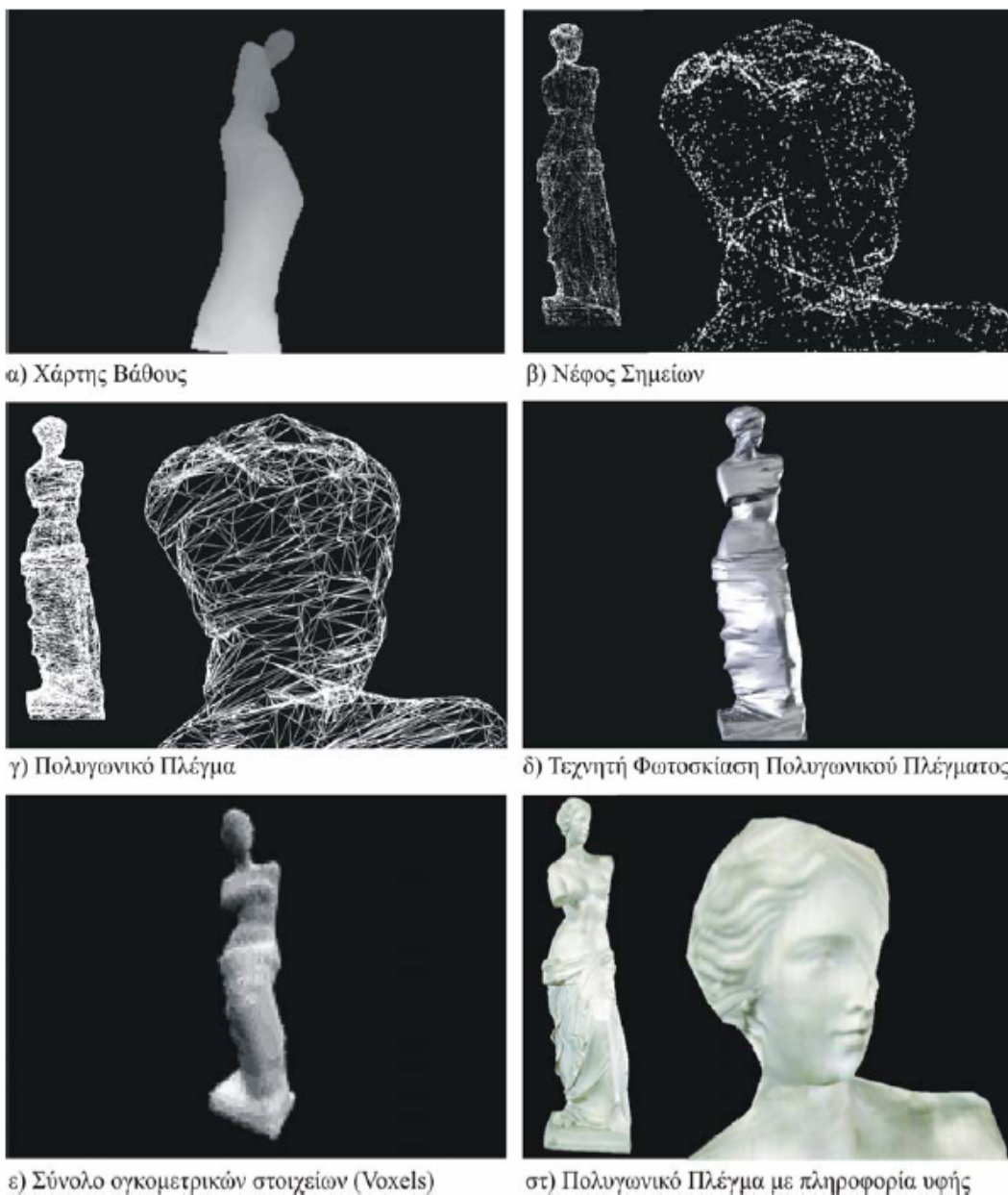
3.1.2.2.3 Πολυγωνικό – τριγωνικό πλέγμα

Η απόδοση μίας επιφάνειας από ένα πλήθος τριγώνων είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνική για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις. Κάθε τρίγωνο ορίζεται από τρεις κορυφές στον χώρο που και αυτές φέρουν πληροφορία θέσης σε κάθε άξονα (x,y,z). Από ένα νέφος σημείων ή ένα χάρτη βάθους δύναται να γίνει η εξαγωγή ενός πολυγωνικού πλέγματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9γ. Με το πολυγωνικό πλέγμα δημιουργούμε μια εικόνα με τεχνητή φωτοσκίαση που απώτερο σκοπό έχει να τονίσει τις λεπτομέρειες της επιφάνειας (Εικόνα 9δ). Το πολυγωνικό πλέγμα μπορεί να συνδεθεί με πληροφορία υψής χαρτογραφημένη πάνω σε κάθε τρίγωνο της επιφάνειας. Το πεδίο που γίνεται η χαρτογράφηση ονομάζεται U.V. Η πιο ρεαλιστική αναπαράσταση είναι αυτή που περιλαμβάνει και την πληροφορία υψής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 9στ.

3.1.2.2.4 Ογκομετρικά εικονοστοιχεία

Πολλές φορές, στη εργασία αυτή, θα γίνονται αναφορές σε εικονοστοιχεία στον τρισδιάστατο χώρο. Ένα εικονοστοιχείο (*pixel* από *Picture element*), σύμφωνα με τον αρχικό ορισμό, αναπαριστά τις χρωματικές ιδιότητες ενός σημείου σε ένα δισδιάστατο χώρο. Στις τρεις διαστάσεις μπορούμε να πούμε πως ένα σημείο αναπαριστά πλέον, άλλοτε σημειακή ή στοιχειώδη επιφάνεια και άλλοτε σημειακό ή στοιχειώδη όγκο (εξ ου και ο διαχωρισμός τους ως στοιχεία επιφάνειας ή *surfel* από *Surface Element* και στοιχεία όγκου ή *voxel* από *Volumetric pixel*). Οι δύο αυτές οντότητες εμπεριέχουν και την πληροφορία της τρίτης διάστασης. Το *voxel* αναπαρίσταται ως ένας «στοιχειώδης» κύβος στον τρισ- διάστατο χώρο (Εικόνα 9ε), ενώ το *surfel* αναπαριστά ένα «στοιχειώδες» τμήμα από το φλοιό

μας επιφάνειας. Το surfel απαντάται πολύ σπάνια στο χώρο της τρισδιάστατης αποτύπωσης.



Εικόνα 9. Μέθοδοι οπτικής αναπαράστασης τρισδιάστατων δεδομένων

3.1.2.3 Συστήματα τρισδιάστατης οπτικής αναπαράστασης

Τρισδιάστατα αντικείμενα μπορούν να προβληθούν σε κλασικές-συμβατικές οθόνες υπολογιστών δύο διαστάσεων με τη χρήση στερεοσκοπικών γυαλιών που λειτουργούν με την βοήθεια υγρών κρυστάλλων. Η μέθοδος βασίζεται στην ελεγχόμενη διακοπτόμενη πόλωση των κρυστάλλων που βρίσκονται μπροστά από κάθε μάτι. Γνωρίζοντας την

αρχική γεωμετρία δημιουργούνται δύο απόψεις με κάποιες γεωμετρικές διαφορές, οι οποίες προβάλλονται στην οθόνη διαδοχικά. Ανάλογα με τον ρυθμό ανανέωσης της εικόνας, το ανθρώπινο μάτι αναμειγνύει τις δύο εικόνες σε μια στερεοσκοπική εικόνα και δημιουργείται η αίσθηση της τρισδιάστατης όρασης. Ως εκ τούτου το αντικείμενο προβάλλεται ακριβώς σαν να βγαίνει από το επίπεδο της οθόνης. Με βάση αυτήν την τεχνική μεγαλύτερα τρισδιάστατα μοντέλα (ολόκληροι εικονικοί χώροι) μπορούν και προβάλλονται. Υπάρχουν, βέβαια, και άλλες τεχνικές προβολής τρισδιάστατων χώρων, όπως αυτή με τα *στερεογράμματα* (anaglyphs).

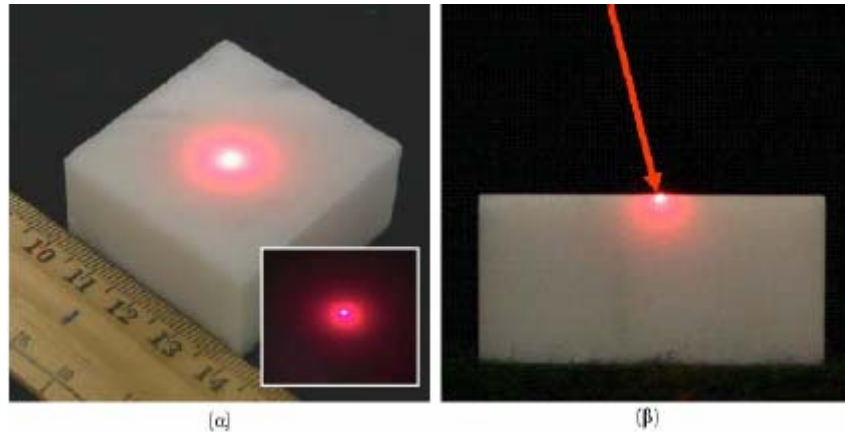
Σημαντικό στοιχείο στην οπτική αναπαράσταση τρισδιάστατων μοντέλων είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασης που προσφέρεται στον χρήστη. Με τον όρο *πραγματικό χρόνο* ορίζουμε την δυνατότητα του υπολογιστικού συστήματος να πραγματοποιεί τόσο άμεσα τις εντολές του χρήστη, ώστε το αποτέλεσμα τους να είναι σχεδόν άμεσα εμφανές. Υπάρχουν πολλά προγράμματα στο διαδίκτυο τα οποία προσφέρονται δωρεάν και επιτρέπουν τη μέτρηση των δυνατοτήτων του υπολογιστή και της κάρτα γραφικών που χρησιμοποιεί. Οι μονάδες μετρήσεις που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως το πλήθος των εικόνων ανά δευτερόλεπτο που μπορεί να παρουσιάσει η κάρτα γραφικών σε σχέση με το πλήθος των τριγώνων που εμφανίζονται σε αυτές τις εικόνες. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει το πρόβλημα προβολής πολύπλοκων τρισδιάστατων μοντέλων σε διαδραστικό περιβάλλον πραγματικού χρόνου. Αυτός είναι, άλλωστε, και ο στόχος της εικονικής πραγματικότητας. Κάποιες από τις προτεινόμενες και ευρέως χρησιμοποιημένες τεχνικές είναι η ιεραρχική οργάνωση δεδομένων (octrees), τα επίπεδα λεπτομέρειας (level-of-details), η ιεραρχική προβολή, οι επικαλυπτόμενες επιφάνειες και άλλες.

3.2 Οι ιδιαιτερότητες των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς

Η ποικιλία των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των αντικειμένων παολιτιστικού ενδιαφέροντος καθώς και η μορφολογική τους πολυπλοκότητα, αποτελούν τμήμα ενός ευρύτερου συνόλου χαρακτηριστικών που δημιουργούν προβλήματα στις διάφορες μεθόδους αποτύπωσης. Όπως αναφέρθηκε ήδη στο Κεφάλαιο 1, η διαδικασία της ψηφιακής σάρωσης πολιτιστικών αντικειμένων πρέπει, στις περισσότερες περιπτώσεις, να γίνεται με τον μέγιστο δυνατό βαθμό ακρίβειας. Στην πραγματικότητα όμως η επιτυγχανόμενη ακρίβεια της αποτύπωσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το αντικείμενο αυτό καθαυτό. Μερικά από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που συμβάλουν στον περιορισμό της επιτυγχανόμενης ακρίβειας είναι η πολυμορφία του αντικειμένου, οι αντανakλάσεις των επιφανειών του, ο ιριδισμός και η διάχυση του φωτός. Το φαινόμενο της διάχυσης απαντάται κυρίως σε μαρμάρινες επιφάνειες.

Προϋπόθεση στην τρισδιάστατη ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι το ότι η επιφάνεια του αντικειμένου είναι αδιαφανής και δε διαχέει το ανακλώμενο φως. Υλικά όμως όπως το μάρμαρο όμως απέχουν πολύ από αυτή την υπόθεση, εμφανίζοντας δύο σημαντικές οπτικές ιδιότητες. Αυτές είναι η *ημιδιαφάνεια* και η *ανομοιογενής επιφανειακή τραχύτητα*. Οι ιδιότητες αυτές αποτελούν πηγές θορύβου και επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων. Η επιφάνεια π.χ. του μαρμάρου είναι δομημένη από πυκνά συσσωρευμένους κρυστάλλους και η μεταβλητή τους πυκνότητα προκαλεί ανομοιογένεια στα υποστρώματα αλλοιώνοντας τα οπτικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου. Καθώς η ακτίνα φωτός διαπερνά το μάρμαρο η ανομοιομορφία των υποστρωμάτων έχει σαν αποτέλεσμα το διασκορπισμό της δέσμης. Ο διασκορπισμός αυτός εντοπίζεται και στο ορατό μήκος κύματος. Οι Godin et al., [5], προσέγγισαν το μέγεθος του σφάλματος που προκαλεί ο διασκορπισμός της δέσμης. Σε ένα πείραμα τους προβάλλουν μια ακτίνα λέιζερ μήκους κύματος 633nm πάνω σε ένα κομμάτι λευκού μαρμάρου τύπου *Carrara Statuario*. Στα υποστρώματα του μαρμάρου αλλά και στην επιφάνειά του εμφανίζονται κάποιοι φωτεινοί ομόκεντροι δίσκοι γύρω από το σημείο με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση φωτός (Εικόνα 10α).

Στην Εικόνα 10β η δέσμη φωτός συγκεντρώνεται σε απόσταση ενός χιλιοστού από την άκρη του μαρμάρου. Η φωτογράφιση έγινε από τέτοια οπτική γωνία, ώστε να είναι εμφανές το βάθος διείσδυσης του φωτός στα υποστρώματα.

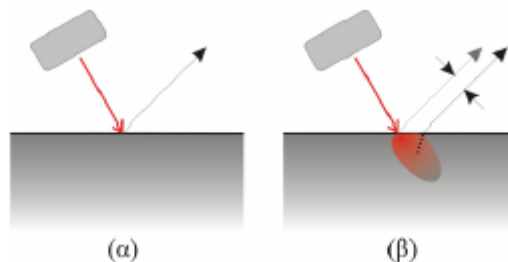


Εικόνα 10. Διάχυση φωτός σε μάρμαρο, [5]

Άλλα είδη μαρμάρων επιτρέπουν τη διάχυση του περιβάλλοντος φωτισμού στο εσωτερικό τους και εμφανίζουν ιδιαίτερα χρωματικά χαρακτηριστικά. Με την σημερινή τεχνολογία αυτά τα χαρακτηριστικά είναι αδύνατο να ψηφιοποιηθούν. Ακόμα και η απλή εξομοίωση τους απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

Κλασικό παράδειγμα ενός τέτοιου υλικού είναι ο ακτινόλιθος γνωστός και ως νεφρίτης. Ένα γλυπτό από ακτινόλιθο παρουσιάζει σημαντικό διασκορπισμό της ακτίνας στα υποστρώματα της επιφάνειάς του. Το ανακλώμενο φως προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικείμενου και τη διαπερνάει προς τα έξω με μια υπολογίσιμη απόκλιση, την οποία μπορεί να συλλάβει ο σαρωτής (Εικόνα 11).

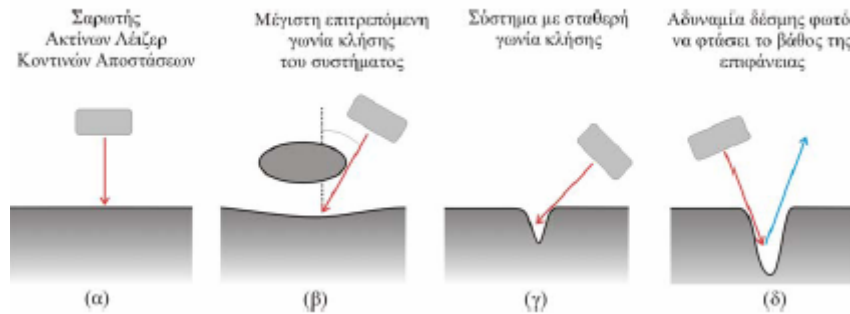
Όπως ήδη αναφέρθηκε κάτι τέτοιο επηρεάζει τη διαδικασία σάρωσης. Επίσης, η τελική ψηφιακή τρισδιάστατη απόδοση του γλυπτού θα έχει τη μορφή μιας πράσινης πετράς και όχι την πραγματική φωτοβόλα όψη που έχει ο νεφρίτης.



Εικόνα 11. Δημιουργία απόκλισης της δέσμης φωτός

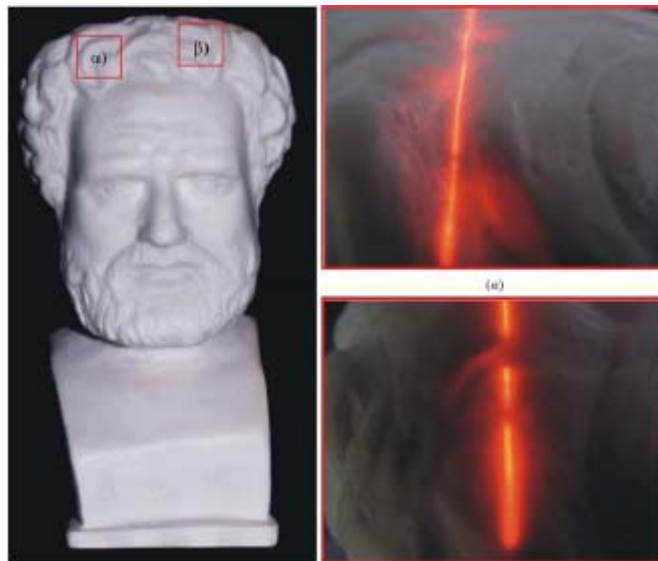
Οι δυσκολίες που παρουσιάζουν τα πολιτισμικά αντικείμενα δεν περιορίζονται μόνο σε αντικείμενα που είναι φτιαγμένα από μάρμαρο. Ένα πολύπλοκα λαξευμένο γλυπτό ελεφαντοστού με σύνθετη εσωτερική γεωμετρία θα αποτελούσε άλλη μια πρόκληση για την ψηφιοποίηση, εξαιτίας της εμφάνισης έντονων σκιάσεων που προέρχονται από το ίδιο το αντικείμενο. Η σάρωση της γεωμετρίας θα ήταν δύσκολη λόγω των περίπλοκων εσωτερικών επιφανειών. Οι στενές σχισμές είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν με μεθόδους τριγωνοποίησης. Η δυσκολία εντοπίζεται στα σημεία της επιφάνειας που οφείλουν να είναι ταυτόχρονα εμφανή προς την πηγή της δέσμης φωτός αλλά και προς τον φωτογραφικό αισθητήρα. Στην

Εικόνα 12 απεικονίζονται κάποιες δύσκολες καταστάσεις που επιβεβαιώνουν αυτούς που υποστηρίζουν ότι η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση είναι μια πραγματικά δύσκολη διαδικασία. Η επιφάνεια στην Εικόνα 12α είναι επίπεδη και επιτρέπει την ομαλή διεξαγωγή της τριγωνοποίησης σε αντίθεση με την Εικόνα 12β, όπου ο σαρωτής εκμεταλλεύεται την μέγιστη γωνία κλίσης για να φτάσει στην κάτω επιφάνεια. Όταν η γωνία κλίσης δεν το επιτρέπει (Εικόνα 12γ) τότε καθίσταται αδύνατη η σάρωση του συγκεκριμένου σημείου. Η σμίλη που χρησιμοποιεί ο γλύπτης μπορεί και φτάσει σε σημεία που η δέσμη φωτός αδυνατεί (Εικόνα 12δ).



Εικόνα 12. Σάρωση κατά την παρουσία αποφράξεων

Η διάχυση της δέσμης ανάμεσα στις επιφάνειες και στις ανακλαστικές κοιλότητες του αντικειμένου είναι αναπόφευκτο φαινόμενο (Εικόνα 13). Οι ασυνέχειες που εμφανίζει η δέσμη φωτός απαιτούν την επανάληψη της σάρωσης στην ίδια περιοχή με τοποθέτηση του σαρωτή σε διαφορετική οπτική γωνία.

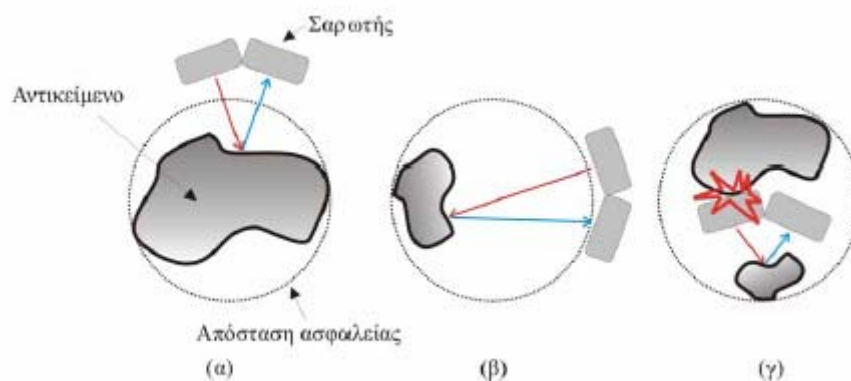


Εικόνα 13. Ανακλάσεις και ασυνέχειες της δέσμης φωτός

Η ανυπολόγιστη αξία των πολιτιστικών αντικείμενων δεν αφήνει περιθώρια φθοράς κι έτσι η επαφή του συστήματος σάρωσης με τα αντικείμενα είναι απαγορευμένη. Η ίδια γεωμετρική πολυπλοκότητα που επηρεάζει την συλλογή δεδομένων ανεβάζει και τον πήχη δυσκολίας στον χειρισμό του σαρωτή. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή της θέσης του συστήματος ως προς το αντικείμενο. Στην Εικόνα 14 απεικονίζονται κάποιες περιπτώσεις όπου ο σαρωτής δεν μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια. Η εξασφάλιση της ακεραιότητας του αντικειμένου πραγματοποιείται με τον

ορισμό μιας περιοχής την οποία δε θα πρέπει να παραβιάζει το σύστημα ψηφιοποίησης.

Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα έχουν μια συγκεκριμένη απόσταση λειτουργίας που περιορίζουν την απόσταση του σαρωτή από το αντικείμενο. Αρκετές φορές όμως, αυτή η μέθοδος αποδεικνύεται αναποτελεσματική, καθώς πολύπλοκα αντικείμενα δεν μπορούν να ψηφιοποιηθούν πλήρως με το σαρωτή μονίμως έξω από την περιοχή ασφαλείας (Εικόνα 14γ).



Εικόνα 14. Αδυναμία αποφυγής πρόσκρουσης

Τα κοσμήματα αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της πολιτιστικής κληρονομιάς και ταυτόχρονα άλλο ένα παράδειγμα όπου οι σαρωτές με ακτίνες λέιζερ αδυνατούν να παρέχουν ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, η προσπάθεια ψηφιοποίησης με σύστημα ακτίνων λέιζερ ενός ασημένιου περιδέραιου που καλύπτεται με πολύτιμους λίθους θα αποβεί μάταιη. Η μικρή σε διάχυση ανάκλαση του ασημιού σε συνδυασμό με τις εσωτερικές αντανakλάσεις των πολύτιμων λίθων θα έκαναν αδύνατη την σύλληψη της γεωμετρίας με μεθόδους τριγωνοποίησης. Ακόμα και με παθητικές μεθόδους, όπως η μέθοδος *Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως*, η ψηφιοποίηση πάλι θα ήταν ανεπιτυχής. Η ρεαλιστική απόδοση των αντανakλάσεων σε πολύτιμους λίθους, όπως τα διαμάντια, απαιτούν ειδικούς αλγόριθμους φωτορεαλισμού.

Η ψηφιοποίηση ενός γούνινου κεφαλόδεσμου είναι επίσης αδύνατη. Για άλλη μια φορά, η πολυπλοκότητα της επιφάνειας του αντικειμένου προκαλεί μεγάλη διασπορά στην δέσμη φωτός καθώς αυτή εισχωρεί μέσα στις πτυχώσεις. Η ψηφιοποίηση της επιφάνειας θα οδηγούσε σε ένα νέφος σημείων με πολύ θόρυβο. Από την άλλη, ακόμα και αν μπορούσε να πραγματοποιηθεί η αποτύπωση της επιφάνειας του συγκεκριμένου αντικειμένου, η γεωμετρική αναπαράσταση εκατομμυρίων τριχών σε πραγματικό χρόνο θα ήταν αδύνατη. Όσον αφορά στη φωτορεαλιστική απεικόνιση τέτοιων αντικειμένων απαιτούνται αλγόριθμοι καθολικού φωτισμού (*global illumination*) με υψηλό υπολογιστικό φορτίο.

Συνοψίζοντας, ένα μεγάλο πλήθος πολιτισμικών αντικειμένων εμφανίζει περίπλοκη γεωμετρία και επιφανειακές ιδιότητες που είτε δημιουργούν προβλήματα είτε καθιστούν αδύνατη την ψηφιοποίηση με τις σημερινές διαθέσιμες τεχνικές.

3.3 Παρουσίαση της τρέχουσας στάθμης της τεχνολογίας – Βασικές μεθόδους αποτύπωσης και ανακατασκευής

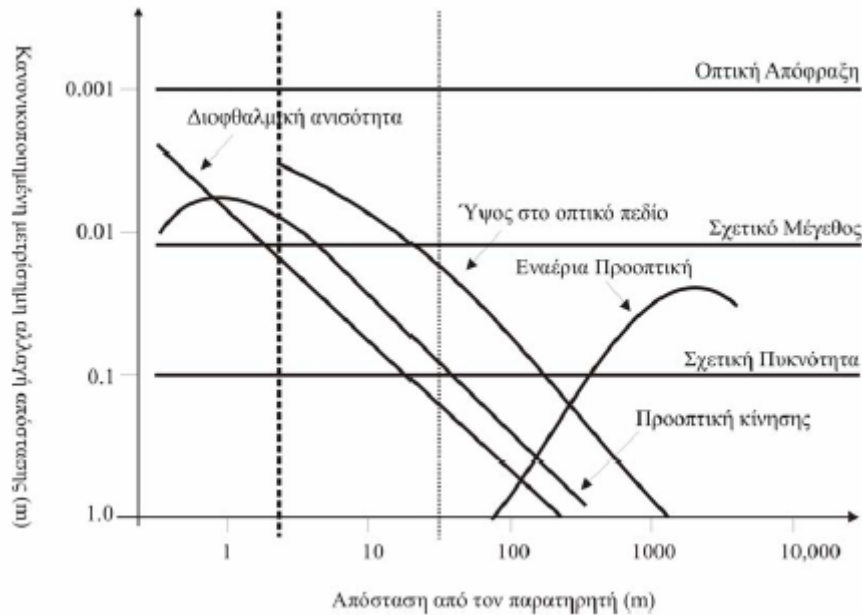
3.3.1 Εισαγωγή

Όλα τα εμπορικά, αλλά και ερευνητικά, συστήματα που συλλέγουν τρισδιάστατες συντεταγμένες από μια δεδομένη περιοχή της επιφάνειας ενός αντικειμένου με έναν συστηματικό ή αυτοματοποιημένο τρόπο θεωρούνται τρισδιάστατοι σαρωτές.

Η ψηφιοποίηση αντικειμένων με τρισδιάστατους σαρωτές είναι μια διαδικασία που πραγματοποιείται σήμερα με ένα πλήθος διαφορετικών μεθόδων.

Διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση αντικειμένων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως επιφάνειες με υψηλή ανακλαστικότητα, χρωματική ποικιλία, γεωμετρική πολυπλοκότητα κ.α. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της κάθε τεχνικής είναι το βασικότερο κριτήριο για τις εταιρίες ανάπτυξης εμπορικών τρισδιάστατων ψηφιακών σαρωτών. Ένα μεγάλο τμήμα του συνόλου των εμπορικών σαρωτών βασίζονται στην τριγωνοποίηση με ακτίνες λέιζερ και αυτό γιατί επιτυγχάνει γεωμετρικά αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας, που φτάνουν και σε επίπεδα πολύ μικρότερα του 1 mm. Εκτός από την ακρίβεια υπάρχουν και άλλα κριτήρια για την επιλογή της καταλληλότερης μεθοδολογίας. Ένα από αυτά είναι η ταχύτητα σάρωσης. Άλλες δημοφιλείς μέθοδοι είναι οι *Σχήμα-Από-Σιλουέτες*, *Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως* αλλά και χειροκίνητες μέθοδοι, όπως ρομποτικοί βραχίονες με *αισθητήρες αφής* που συνεχίζουν ακόμα και σήμερα να εξυπηρετούν τις ανάγκες κάποιων εφαρμογών. Οι εφαρμογές που σχετίζονται με την τεκμηρίωση πολιτισμικής κληρονομιάς βρίσκουν λύση κυρίως σε συστήματα με αυτές τις μεθοδολογίες και διαχωρίζονται σε αυτά των *κοντινών- και μεσαίων-αποστάσεων*. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι αυτή που ορίζει κάθε φορά τον μέγιστο δυνατό όγκο σάρωσης αλλά και τις μέγιστες αποστάσεις ανάμεσα στους αισθητήρες και στις επιφάνειες των αντικειμένων.

Καθώς ένα πλήθος εφαρμογών ανακατασκευής τρισδιάστατων μοντέλων προέρχεται από τον χώρο της όρασης υπολογιστών η μελέτη των Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το παρακάτω συγκεντρωτικό γράφημα (Εικόνα 15) που περιγράφει τους περιορισμούς που εμφανίζονται κατά την αντίληψη του βάθους καθώς αυξάνεται η απόσταση των αντικειμένων από τον παρατηρητή.



Εικόνα 15. Κανονικοποιημένη αποτελεσματικότητα διαφορετικών ενδείξεων βάθους

Το γράφημα αυτό αντικατοπτρίζει τους περιορισμούς που πρέπει να αντιμετωπίσουν οι τρισδιάστατοι σαρωτές και οι τεχνικές που περιγράφονται στην παρούσα εργασία.

Στις επόμενες παραγράφους γίνεται εκτενής ανάλυση των τεχνικών που εφαρμόζονται σε εμπορικά συστήματα. Εξετάζονται τα χαρακτηριστικά της κάθε μεθοδολογίας και αναγνωρίζονται όλα τα σημεία υπεροχής τους αλλά και οι αδυναμίες τους. Τέλος, περιγράφονται οι τεχνικές που βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο (δεν εμφανίζονται ως εμπορικά προϊόντα).

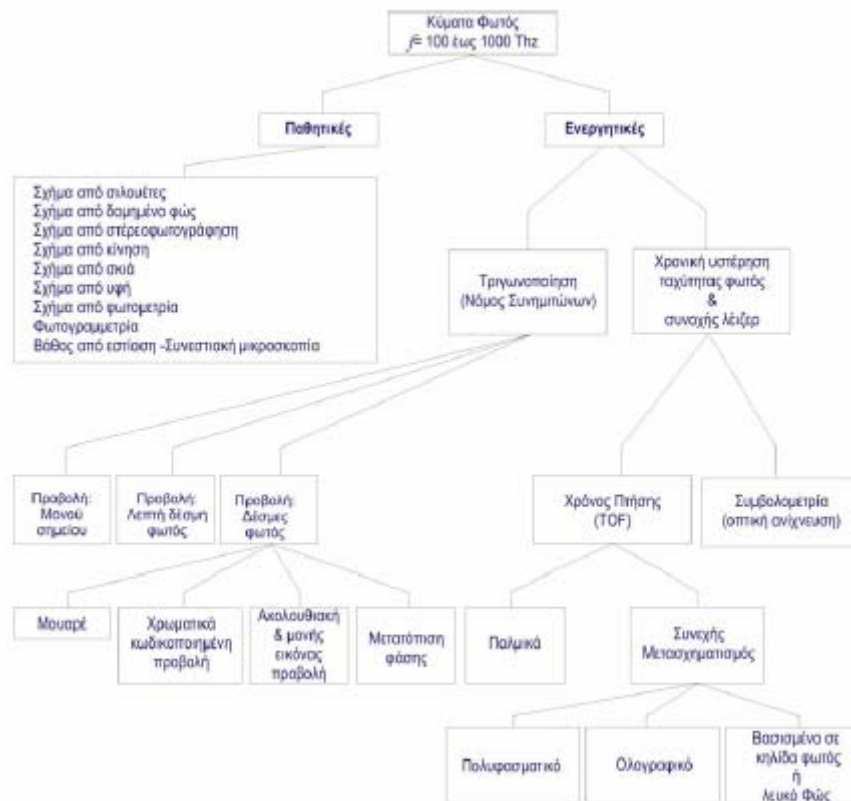
3.3.2 Μεθοδολογίες τρισδιάστατης σάρωσης

Το πλήθος των διαφορετικών μεθοδολογιών προδίδει το μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον για τον συγκεκριμένο χώρο. Από την άλλη, η διαφορετική λύση που προσφέρει η κάθε μεθοδολογία δείχνει την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Σημαντική είναι εδώ η συμβολή αλγορίθμων από τον χώρο της τρισδιάστατης όρασης των υπολογιστών.

Ο πρώτος και βασικότερος διαχωρισμός που μπορεί να γίνει στις μεθοδολογίες τρισδιάστατης ψηφιοποίησης είναι η διάκρισή τους σε:

- *παθητικές μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης*: γίνεται συνήθως χρήση του περιβαλλοντικού φωτισμού και τα μοναδικά χαρακτηριστικά που αποτυπώνονται είναι αυτά που είναι εμφανή σε ψηφιακές εικόνες.
- *ενεργητικές μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης*: τα ενεργητικά συστήματα που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων αποτυπώνουν τις παραμορφώσεις που δέχεται η δέσμη φωτός καθώς ανακλάται πάνω σε επιφάνειες. Δημιουργούν ένα πυκνό *χάρτη βάθους* ή ένα *νέφος σημείων* από όλες τις εμφανείς επιφάνειες.

Στην Εικόνα 16 παρουσιάζονται οι επικρατέστερες τεχνικές σάρωσης που έχουν εφαρμογή στην αποτύπωση κινητών πολιτιστικών αντικειμένων (αλλά και μνημείων). Οι περισσότερες από αυτές έχουν ήδη εφαρμοστεί σε διάφορα ερευνητικά έργα και μελέτες. Σε αυτό το τμήμα της Εργασίας θα ασχοληθούμε με όλες τις παθητικές μεθόδους ενώ από τις ενεργητικές μας ενδιαφέρουν μόνο οι μέθοδοι τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων και οι αισθητήρες αφής που δεν περιγράφονται στην εικόνα. Όλες οι μέθοδοι *Σχήμα-Από-Χ* επιτυγχάνουν την πρόσκτηση της τρίτης διάστασης μέσα από ένα σύνολο ψηφιακών φωτογραφιών. Το κοινό στοιχείο ανάμεσα στις δύο κατηγορίες είναι η ύπαρξη κάποιας διαδικασίας βαθμονόμησης. Η διαδικασία της βαθμονόμησης αποτελεί το κλειδί στην ορθή εξαγωγή της τρισδιάστατης γεωμετρίας και της πληροφορίας υψής, και, σε πολλές περιπτώσεις, αποτελείται από μια σειρά από μαθηματικές σχέσεις που αντιστοιχούν ένα σημείο από την δισδιάστατη φωτογραφία σε ένα σημείο στον πραγματικό χώρο, του οποίου η θέση είναι γνωστή με μεγάλη ακρίβεια. Αυτή η αντιστοίχιση εφαρμόζεται στην συνέχεια για την ανάκτηση της τρίτης διάστασης όλων των σημείων που εμφανίζονται μέσα στις φωτογραφίες.



Εικόνα 16. Βασικός διαχωρισμός τεχνικών οπτικής τρισδιάστατης σάρωσης

3.3.2.1 Αναλυτική τεχνολογική ανασκόπηση

Η διαθέσιμη τεχνολογία, σήμερα, για την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αποτελεί ένα μεγάλο θέμα. Συγκεκριμένα, στην τελευταία δεκαετία, μια μεγάλη πληθώρα από εμπορικά συστήματα έκανε την εμφάνισή της, με στόχο τη διάχυση της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε κατά την έρευνα των προηγούμενων είκοσι περίπου χρόνων. Η έρευνα όμως στο χώρο συνεχίζεται

και τόσο βελτιώσεις όσο και νέα συστήματα κάνουν την εμφάνισή τους μέρα με τη μέρα.

Είναι πρακτικά αδύνατο να καταλογογραφηθούν πλήρως όλα τα διαθέσιμα συστήματα και μέθοδοι. Στην ανασκόπηση μεθόδων που ακολουθεί γίνεται μια γενική προσέγγιση με βάση το μέγεθος των αντικειμένων προς ψηφιοποίηση από το μικροσκοπικό επίπεδο έως το επίπεδο πολύ μεγάλων αντικειμένων, και γίνεται μια εισαγωγή στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

3.3.2.1.1 Τεχνικές ψηφιοποίησης εξαιρετικά μικρών αντικειμένων

Είναι πλέον δυνατή η σύλληψη τρισδιάστατης πληροφορίας σε πάρα πολύ μικρή κλίμακα. Τεχνικές όπως η "Atomic Force Microscopy" και η "Stereo Scanning Electron Microscopy" μας επιτρέπουν να αναγνωρίσουμε και να καταγράψουμε χαρακτηριστικά σε κλίμακα μερικών δεκάδων νανομέτρων (nm). Άλλες τεχνικές, όπως η "Confocal Microscopy" και η "White Light Scanning Interferometry" παρέχουν ανάλυση της κλίμακας μερικών εκατοντάδων νανομέτρων. Το μειονέκτημα που υπάρχει στη χρήση τέτοιων μεθόδων υψηλής ακρίβειας και ανάλυσης είναι ότι αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ψηφιοποίηση πολύ μικρών επιφανειών (τυπικά μικρότερων του ενός τετραγωνικού χιλιοστού).

Το εύλογο ερώτημα στο σημείο αυτό θα ήταν εάν υπάρχει, πραγματικά, κάποια πρακτική αξία στη χρήση τέτοιων τεχνικών και εξοπλισμού για την ψηφιοποίηση πολιτιστικής κληρονομιάς. Η απάντηση μπορεί να είναι μόνον υποθετική: ίσως. Όταν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι αυτό της «απόλυτης» αποτύπωσης τότε σαφέστατα υπάρχει μια εφαρμογή. Για συγκεκριμένα πολιτιστικά αντικείμενα τα μικροσκοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά επιφανείας είναι δυνατό να είναι πολύ σημαντικά. Η πληροφορία γι' αυτά μπορεί να βοηθήσει διαδικασίες όπως έλεγχος κατάσταση και αυθεντικότητας, μέθοδος δημιουργίας, κοκ.

Από τις τεχνικές που αναφέρθηκαν, η τεχνική της Stereo Scanning Electron Microscopy είναι μάλλον περιορισμένης εφαρμογής στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς. Στην τεχνική αυτή, τα δείγματα πρέπει να εισαχθούν σε ειδικούς χώρους υπό συνθήκες κενού και απαιτείται ειδική προετοιμασία, συνήθως επικάλυψη με μέταλλο. Έτσι, η τεχνική μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις καταστρεπτικές τεχνικές και είναι, συνεπώς, ακατάλληλη για εφαρμογή στη γενική περίπτωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Υπάρχουν, βέβαια, περιπτώσεις όπως θραυσμάτων κεραμικών, απολιθωμάτων ή γυάλινων αντικειμένων, όπου θα μπορούσε να εφαρμοστεί η εν λόγω τεχνική.

Η τεχνική Confocal microscopy είναι κυρίως «βιολογική τεχνική» και δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνικές όπως φθορισμός. Δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για ημιδιάφανα αντικείμενα και επιτρέπει την καταγραφή εσωτερικής πληροφορίας. Θα μπορούσε να είναι περιορισμένης χρήσης στην παρατήρηση διάφανων αντικειμένων. Επίσης, είναι δυνατή η σκιαγράφιση επιφάνειας π.χ. για την

ψηφιοποίηση επιφανειακής υφής, έχοντας το πλεονέκτημα ότι είναι μια τεχνική που δε στηρίζεται σε επαφή με τα αντικείμενα.

Τη σκιαγράφιση επιφάνειας μπορεί επίσης να παρέχει και η τεχνική White Light Scanning Interferometry και μάλιστα με σημαντικά μικρότερο κόστος. Συστήματα όπως το Veeco RST επιτρέπουν τη μέτρηση τρισδιάστατων επιφανειών σε κλίμακα κάτω του μικρομέτρου και θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για την επισταμένη μελέτη επιφανειών. Η τεχνική είναι χωρίς επαφή και δεν απαιτείται κάποια ιδιαίτερη επιφανειακή προετοιμασία.

Η τεχνική Atomic Force Microscopy είναι η νεότερη στην κατηγορία των τεχνικών μικροσκοπικής κλίμακας και, ενώ υπάρχουν διαθέσιμα εμπορικά συστήματα, είναι ακόμη στη φάση σημαντικής ανάπτυξης. Η βασική αρχή είναι στη χρήση ενός πάρα πολύ μικρού μετρητικού συστήματος με μέγεθος που δεν ξεπερνά τα δέκα άτομα το οποίο φέρεται πάρα πολύ κοντά στην επιφάνεια προς μέτρηση χωρίς όμως να υπάρχει επαφή. Ενδο-ατομικές δυνάμεις έλκουν το σύστημα προς την επιφάνεια. Το μικροσκόπιο μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα μέτρησης στην κίνησή του κατά μήκος και πλάτος πάνω στην επιφάνεια που μετράται και να ρυθμίσει την απόστασή του από αυτήν μέσω της μέτρησης της δύναμης έλξης που ασκείται. Με τον τρόπο αυτό μετράται μια επιφάνεια μέσω της μέτρησης της ελκτικής δύναμης. Η μέθοδος μπορεί να παρέχει πολύ μεγάλη ακρίβεια (απαιτώντας, βέβαια, ιδιαίτερη επιδεξιότητα χειρισμού) που μπορεί να φτάσει κάτω του ενός νανόμετρου σε ειδικές περιπτώσεις.

Με τη χρήση τεχνικών όπως αυτών που περιγράφηκαν στις παραπάνω παραγράφους, γίνεται δυνατή η μετάβαση στην κλίμακα των 100 νανομέτρων και ακόμη πιο κάτω. Το εύλογο, βέβαια, ερώτημα θα ήταν αν υπάρχει κάτι στην κλίμακα αυτή που να είναι ενδιαφέρον. Στις κλίμακες αυτές ανακτάται η μικρο-υφή μιας επιφάνειας, ή η τραχύτητά της η οποία είναι δυνατό να έχει σημαντική συμμετοχή στη συνολική παρουσία της μορφής του αντικειμένου. Μεταβολές στην τραχύτητα της επιφάνειας θα μπορούσαν να είναι χαρακτηριστικές για την κατάσταση της επιφάνειας (π.χ. διάβρωση). Η συνολική απάντηση είναι ότι, πράγματι, στην μικρο-κλίμακα υπάρχει σημαντική πληροφορία.

Έτσι, από τις τέσσερις τεχνικές που αναφέρθηκαν, οι τεχνικές Atomic Force Microscopy και White Light Scanning Microscopy έχουν πραγματικά κάτι να συνεισφέρουν στο χώρο της τρισδιάστατης ψηφιοποίησης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Ποια είναι όμως τα μειονεκτήματα των τεχνικών αυτών;

- μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρές επιφάνειες ή μικρά δείγματα από τα πραγματικά αντικείμενα
- είναι σημαντικά σύνθετες και απαιτούν γνώσεις, εξειδίκευση και επιδεξιότητα
- ενώ ο εξοπλισμός είναι μεταφερόμενος απαιτούνται ιδιαίτερα ελεγχόμενες συνθήκες μέτρησης (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία) αν και πολλά μουσεία μπορούν να παρέχουν αυτές τις συνθήκες.

Όλα αυτά καταδεικνύουν το γεγονός ότι τέτοια συστήματα μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε μια διαδικασία ψηφιοποίησης ιδιαίτερα σε συνθήκες όπου η μικρο-δομή της επιφάνειας αντικειμένων έχει σημαντική πληροφορία να δώσει τόσο για τη σωστή απεικόνιση όσο και τον έλεγχο της κατάστασής του.

3.3.2.1.2 Τεχνικές ψηφιοποίησης μικρών αντικειμένων

Με τον όρο «μικρά αντικείμενα» εννοούνται εδώ αντικείμενα διάστασης έως 100x100 χιλιοστών (10x10 εκατοστά). Στην κατηγορία αυτή οι αδιαμφισβήτητα προτιμητέες τεχνικές είναι αυτές που βασίζονται σε συστήματα τριγωνοποίησης ακτίνων laser. Υπάρχει σήμερα πληθώρα τέτοιων εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων, και είναι μια απολύτως βατή διαδικασία για ένα εξειδικευμένο εργαστήριο που σχετίζεται με το χώρο της τρισδιάστατης όρασης να κατασκευάσει μια τέτοια συσκευή. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι σχετικά απλή: μια σημειακή πηγή laser σημαδεύει την επιφάνεια προς μέτρηση και ανιχνεύεται από έναν οπτικό αισθητήρα. Καθώς το laser μετακινείται πάνω στην επιφάνεια, συναντά διαφορετικά ύψη. Αυτά τα μεταβαλλόμενα ύψη αλλάζουν την ανάκλαση του laser στον οπτικό αισθητήρα. Αν και το σύστημα αυτό μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά, τα περισσότερα συστήματα βασίζονται σε εμπειρική βαθμονόμηση με χρήση προτυποποιημένων διαβαθμίσεων ύψους για την αναγνώριση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής στο επιφανειακό ύψος και της θέσης της ακτίνας. Με δεδομένο ότι η προς μέτρηση περιοχή περιορίζεται σε 100x100mm τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν μια ακρίβεια μέτρησης της τάξης μερικών μικρομέτρων. Παρόλα αυτά, εάν η επιφάνεια του αντικειμένου είναι μεγαλύτερη, τότε η ακρίβεια μέτρησης μειώνεται, και μάλιστα πολλές φορές σημαντικά.

Τέτοια συστήματα είναι χρήσιμα για τη μέτρηση αντικειμένων όπως νομίσματα και μετάλλια, εγχάρακτες ή ανάγλυφες ταμπέλες και μικρά αντικείμενα χρυσοχοΐας. Είναι συνήθως φορητά, σχετικώς φθηνά και εμπορικά διαθέσιμα.

3.3.2.1.3 Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεσαίου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή απαντώνται τα πιο ενδιαφέροντα πολιτιστικά αντικείμενα, και όπου διατίθενται οι περισσότερες τεχνικές ψηφιοποίησης. Τα αντικείμενα είναι διαστάσεων άνω των 10 εκατοστών και μπορεί να φτάνουν έως και 1 με 2 μέτρα. Εδώ μπορεί να περιληφθούν ακόμη και αγάλματα φυσικού μεγέθους.

Τα πλέον χρησιμοποιούμενα συστήματα στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιούν τεχνικές «δομημένου φωτισμού». Η λειτουργίας τους βασίζεται σε μια επέκταση της αρχής της τριγωνοποίησης. Η διαφορά είναι ότι η σημειακή πηγή έχει πλέον αντικατασταθεί από ένα δισδιάστατο μοτίβο φωτός το οποίο προβάλλεται στην προς μέτρηση επιφάνεια. Διάφορες είναι οι μέθοδοι παραγωγής αυτού του μοτίβου φωτός, άλλοτε με τη συμβολή φωτός από πηγή laser και άλλοτε με απλή προβολή του μοτίβου με φωτογραφική

μέθοδο. Συνήθως γίνεται χρήση ενός μοτίβου, το οποίο μετακινείται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου για να επιτευχθεί η συνολική μέτρησή του.

Υπάρχουν όμως και τεχνικές που χρησιμοποιούν πολλαπλά μοτίβα καθώς και τεχνικές Moiré. Το σημαντικό, όμως, σημείο εδώ είναι ότι με οποιονδήποτε τρόπο και εάν παράγονται τα μοτίβα φωτός η διαδικασία ανίχνευσης και ανάλυσής τους είναι η ίδια.

Ένα σύνηθες μοτίβο δεν αποτελείται από δύο απλές καταστάσεις τύπου on/off αλλά, τις περισσότερες φορές, από ημιτονοειδείς μεταβάσεις. Το σημαντικό εδώ είναι ότι καθίσταται δυνατός ο καθορισμός της θέσης όπου παρατηρούνται τα μέγιστα των μοτίβων οδηγώντας σε βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης, παρέχοντας τη δυνατότητα εντοπισμού σε τμήμα μικρότερο ενός κροσσού συμβολής του μοτίβου. Εμπορικά, τα συστήματα αυτά είναι ικανά να επιτύχουν ακρίβεια μέτρησης περί το 1/100 των διαστημάτων μεταξύ των κροσσών του μοτίβου. Έτσι εάν το διάκενο αυτό είναι για παράδειγμα 1 cm τότε η αναμενόμενη ακρίβεια μέτρησης είναι της τάξης του 0,1 mm. Τα συστήματα αυτά βασίζονται συνήθως σε μία από δύο βασικές αρχές λειτουργίας: είτε με χρήση μετασχηματισμού Fourier, είτε με χρονική μετατόπιση φάσης. Κάθε προσέγγιση έχει τα πλεονεκτήματα και τους υποστηρικτές της. Τα περισσότερα εμπορικά συστήματα αυτής της κατηγορίας βασίζονται στη χρονική μετατόπιση φάσης, καθώς η τεχνική αυτή έχει αναλυθεί σημαντικά σε ερευνητικό επίπεδο και είναι σε μερικές περιπτώσεις ευκολότερη στην εφαρμογή της έναντι της άλλης μεθόδου.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των τεχνικών στην κατηγορία αυτή είναι ότι σε γενικές γραμμές η ακρίβειά τους είναι κλιμακούμενη. Αυτό σημαίνει ότι τείνουν να μετρούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μικρά από ότι τα μεγάλα αντικείμενα. Για τα περισσότερα συστήματα το χαρακτηριστικό αυτό είναι συνυφασμένο με τον τρόπο που σχεδιάστηκαν. Περιορισμοί στην ακρίβειά τους πηγάζουν από το γεγονός ότι μια ψηφιακή εικόνα του μοτίβου φωτός έχει περιορισμένο εύρος ζώνης. Το εύρος αυτό ορίζεται από την ανάλυση που παρέχει το οπτικό αισθητήριο που χρησιμοποιεί το εκάστοτε σύστημα και το βάθος χρώματος με το οποίο ψηφιοποιείται η εικόνα. Βασικά, όσο μεγαλύτερο το πλήθος των εικονοστοιχείων στον οπτικό αισθητήρα τόσο καλύτερη η ανάλυση και τόσο μικρότερο μπορεί να είναι το διάκενο μεταξύ των κροσσών του μοτίβου για δεδομένο μέγεθος αντικειμένων. Καθώς η ακρίβεια των συστημάτων είναι στενά δεμένη με το μέγεθος των κροσσών του μοτίβου, μικρότεροι κροσσοί οδηγούν σε μεγαλύτερη ακρίβεια. επίσης καθώς το βάθος χρώματος ψηφιοποίησης μεγαλώνει γίνεται όλο και μεγαλύτερη η ικανότητα διαχωρισμού σημείων εντός του κροσσού μοτίβου οδηγώντας σε περαιτέρω αύξηση της ακρίβειας.

Πολλά από τα συστήματα της κατηγορίας εφαρμόζουν την τεχνική τμηματικής ψηφιοποίησης για μεγάλες επιφάνειες (για μεγαλύτερη ακρίβεια) και στη συνέχεια χρησιμοποιούν λογισμικά για συνένωση των τμηματικών σαρώσεων. Φυσικά και εδώ υπάρχουν όρια και η διαδικασία απαιτεί περισσότερο χρόνο ψηφιοποίησης.

Άλλοι σημαντικοί περιορισμοί αυτών καθώς και κάθε οπτικού συστήματος που βασίζεται σε διασκορπισμό φωτός από μια επιφάνεια είναι:

- Συνήθως αποτυγχάνουν στη μέτρηση σκούρων ή μαύρων αντικειμένων. Η απολύτως συμβατή προς αυτά επιφάνεια μέτρησης είναι μια ομαλή λευκή επιφάνεια χωρίς αντανakλάσεις. Έτσι καθίστανται καλή επιλογή για τα περισσότερα από τα έργα γλυπτικής.
- Τις περισσότερες φορές, τα γυαλιστερά αντικείμενα με ανακλαστικές επιφάνειες αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Σήμερα, βέβαια, υπάρχουν ειδικές τεχνικές που αντιμετωπίζουν και το πρόβλημα αυτό. Στη γενικό όμως περίπτωση, δεν είναι δυνατή η μέτρηση αντικειμένων με υψηλή ανακλαστικότητα ή διάφανων αντικειμένων.
- Η ύπαρξη μοτίβων ή σημαδιών στην επιφάνεια όπως για παράδειγμα ζωγραφική πάνω σε κεραμικά μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στο σύστημα οδηγώντας σε καταστάσεις ασάφειας εντοπισμού των προβαλλόμενων μοτίβων.
- Επιφάνειες με μεγάλη γκάμα καμπυλοτήτων μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα. Πολύ απότομες ακμές μπορεί επίσης να εισάγουν δυσκολίες.
- Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων είναι ότι παράγουν αυτό που καλείται «νέφος σημείων» και όχι ολοκληρωμένες επιφάνειες.

Στα παραγόμενα δεδομένα δεν υπάρχει κάποιου είδους πληροφορία αποκλειστικής σύνδεσης μεταξύ των σημείων, η οποία πρέπει να οριστεί στη συνέχεια.

Στην κατηγορία αυτή μπορούν να ενσωματωθούν και άλλες τεχνικές, μία εκ των οποίων γνωρίζει σημαντική άνθηση τα τελευταία χρόνια και δεν είναι άλλη από την ολογραφία με χρήση υπολογιστών. Η ολογραφία είναι ήδη ώριμη (φτάνει τα 50 περίπου χρόνια), αλλά δεν έχει ακόμη καταφέρει να αποδώσει τους καρπούς της τουλάχιστον σε εμπορικό επίπεδο. Έτσι η ολογραφία παραμένει ακόμη σε επίπεδο ερευνητικής ή πολύ ειδικής χρήσης. Παρουσιάζεται ως μια πολύ ακριβή, τεχνικά πολύπλοκη μέθοδος με μη σημαντικά αποτελέσματα για τον κόσμο του πολιτισμού, λίγο-πολύ ως ένα αξιοπερίεργο. Αυτό όμως αρχίζει να αλλάζει. Μερικά από τα προβλήματα που σχετίζονται με την ολογραφία είναι η απαίτηση για χρήση υγρών χημικών για την έκθεση των εικόνων και οι σημαντικοί περιορισμοί στη δυνατότητα απεικόνισης. Η ολογραφία με χρήση υπολογιστών δίνει μια παράπλευρη λύση σε όλα αυτά τα προβλήματα.

Αλλά ας πάρουμε τα πράγματα από την αρχή: ο λόγος για τον οποίο βλέπουμε αντικείμενα είναι γιατί το φως ανακλάται πάνω τους. Το φως έχει τρεις σημαντικές ιδιότητες: ένταση, συχνότητα και φάση. Μια ασπρόμαυρη εικόνα αναπαριστά μόνο την ένταση. Μια έγχρωμη εικόνα αναπαριστά τις δύο πρώτες ιδιότητες, ένταση και συχνότητα. Μόνο το ολόγραμμα μπορεί να συλλάβει και να αναπαραστήσει και τις τρεις ιδιότητες. Το φως που προέρχεται από διαφορετικά σημεία του αντικειμένου έχει διανύσει διαφορετικό μήκος αποστάσεων και έχει, συνεπώς, διαφορετική φάση. Έτσι, η πληροφορία της τρισδιάστατης δομής του αντικειμένου βρίσκεται στη φάση. Με έλεγχο της φάσης του φωτός που προσπίπτει στο αντικείμενο μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι όλη η πληροφορία φάσης στο ολόγραμμα προέρχεται από το αντικείμενο, που σημαίνει ότι θα έχουμε καταγράψει τη

συνολική πληροφορία τρισδιάστατης μορφής του αντικειμένου. Κατά την απεικόνιση, το ολόγραμμα εμφανίζει παράλλαξη, δηλαδή βλέπουμε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο και εάν μετακινήσουμε τη θέση όρασής του φέρνουμε άλλα τμήματα της επιφάνειάς του στο οπτικό μας πεδίο. Ακριβώς όπως θα γινόταν εάν το αντικείμενο είχε φυσική παρουσία. Δύο είναι οι προσεγγίσεις στην ολογραφία με υπολογιστές:

- η ψηφιακή ολογραφία και
- η τεχνητά δημιουργημένη ολογραφία (μέσω υπολογιστή)

Και οι δύο έχουν σημαντικές προοπτικές στη σύλληψη και απεικόνιση τρισδιάστατων πολιτιστικών αντικειμένων.

Ψηφιακή ολογραφία (digital holography) είναι η διαδικασία της καταγραφής ολογράμματος με οπτικά αισθητήρια και η αποθήκευσή του σε υπολογιστή.

Στη διαδικασία δεν εμπλέκεται πλέον κάποιο υγρό χημικό. Η προοπτική της μεθόδου είναι πολύ μεγάλη. Επειδή η εικόνα μπορεί να αποκατασταθεί μέσω λογισμικού είναι δυνατή η εξαγωγή του τρισδιάστατου σχήματος με μαθηματικές μεθόδους. Τα ψηφιακά ολογράμματα είναι δυνατό να απεικονιστούν με δύο τρόπους:

- Ως πραγματικά ολογράμματα με όλες τις ιδιότητες παράλλαξης των τυπικών ολογραμμάτων, μέσω της «εγγραφής» των δεδομένων των ολογραμμάτων σε μια συσκευή που ονομάζεται χωρικός διαμορφωτής φωτός (spatial light modulator) και με τον φωτισμό τους είτε με φως από laser είτε με φως από σημειακή πηγή λευκού φωτός.
- Μέσω του υπολογισμού της κυματομορφής από το ολόγραμμα εντός του υπολογιστή και στη συνέχεια υπολογισμού της εικονικής αναπαράστασής του σε οθόνη υπολογιστή με τυπικές μεθόδους απεικόνισης τρισδιάστατων γραφικών.

Πέραν του σημαντικού πλεονεκτήματος της μαθηματικής αναπαράστασης των δεδομένων ενός ψηφιακού ολογράμματος, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής του και η δυνατότητα αντιγραφής και αναπαραγωγής του.

Από τη στιγμή που ένα ολόγραμμα κατασκευάζεται έχει πλέον τη μορφή ψηφιακών δεδομένων. Στη γενική περίπτωση είναι δυνατή η μετάδοσή του ή ακόμη και η επεξεργασία του (π.χ. κλιμάκωση). Μπορούμε να δανειστούμε ένα αντίστοιχο παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων από το χώρο της ψηφιακής μουσικής. Από τη στιγμή που έχουμε τη μουσική σε ψηφιακή μορφή είναι δυνατή η επεξεργασία της, η αλλαγή της μορφής δεδομένων, η αποστολή της μέσω π.χ. e-mail, η εγγραφή της σε CD, η μεταφόρτωση μέσω διαδικτύου, η μετάδοση μέσω ψηφιακού ραδιοφώνου, κ.ο.κ. Παρόμοια ευελιξία παρέχεται και από το ψηφιακό ολόγραμμα.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των ψηφιακών ολογραμμάτων είναι ότι βασίζεται στη χρήση φωτός laser, το οποίο αποτελεί πρότυπο. Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που αποθηκευθεί ένα ψηφιακό ολόγραμμα πολιτιστικού αντικειμένου σήμερα και η διαδικασία επαναληφθεί αργότερα, είναι δυνατή η απόλυτη σύγκριση μεταξύ των ολογραμμάτων. Το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου laser HeNe δεν πρόκειται να μεταβληθεί με το πέρασμα

του χρόνου (παρέχοντας με τον τρόπο αυτό μέθοδο συγκριτικής μελέτης αντικειμένων στο πέρασμα του χρόνου).

Τα τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα (με χρήση υπολογιστών) (Computer generated holograms) είναι στην ουσία η άλλη όψη του ίδιου νομίσματος. Για τη δημιουργία τους γίνεται σύλληψη τρισδιάστατων δεδομένων και στη συνέχεια ακολουθεί προσομοίωση της διαδικασίας δημιουργίας ολογράμματος εντός ενός υπολογιστή. Έχοντας υπολογίσει πώς θα είναι το ολόγραμμα, η διαδικασία προχωρά στην τελική κατασκευή του ολογράμματος. Πρόσφατες πρόοδοι στην τελευταία αυτή διαδικασία, ειδικότερα στη λιθογραφία ηλεκτρονίων, δίνουν πλέον αυτή τη δυνατότητα και σε αρκετά μεγάλη κλίμακα – έως και αρκετά μέτρα. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε το ολόγραμμα ενός αντικειμένου που δεν έχει, με την τυπική έννοια, ολογραφηθεί.

Η ποιότητα αποκατάστασης είναι εξαιρετική καθώς τα τεχνητά δημιουργημένα ολογράμματα μπορούν να έχουν πλήρη πληροφορία χρώματος. Υπάρχουν, βέβαια, μερικά αλλά στην πλειοψηφία τους είναι ειδικές εφαρμογές και ειδικευμένες τεχνικές υλοποιήσεις. Η συγκεκριμένη επιστήμη είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης. Οι οπτικοί αισθητήρες (CCD) δεν είναι ακόμη ικανοποιητικά μεγάλης ανάλυσης για την πραγματική σύλληψη του τεράστιου όγκου οπτικών δεδομένων που απαιτούνται. Αυτό, βέβαια, πρόκειται να αλλάξει. Όλη η εμπορική πίεση στην περαιτέρω ανάπτυξη με χρήση πυριτίου (silicon κατά τα γνωστά) οδηγεί σε όλο και μεγαλύτερης κλίμακας σμίκρυνση των ηλεκτρονικών υλικών. Και όχι μόνο για παρόμοιες εφαρμογές αλλά σε όλη την κλίμακα των βιομηχανικών κατασκευών. Προφανώς και η συγκεκριμένη εφαρμογή θα έχει σημαντικά οφέλη από την ανάπτυξη αυτή.

Εάν εξετάσουμε τη μέθοδο σε μεγάλο βάθος χρόνου μπορούμε να πούμε ότι *η ολογραφία τεχνητά δημιουργημένων ολογραμμάτων είναι αδιαμφισβήτητη η απόλυτη λύση στην ψηφιοποίηση, αποθήκευση και απεικόνιση τρισδιάστατων πολιτιστικών αντικειμένων.*

Τέλος, μία ακόμη τεχνική που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για τα αντικείμενα της κλίμακας που μελετούμε στη συγκεκριμένη παράγραφο είναι η τομογραφία. Τομογραφία είναι η διαδικασία συλλογής τρισδιάστατων ογκομετρικών δεδομένων από σειρά δισδιάστατων εικόνων τομών. Η μέθοδος βρίσκει σήμερα μεγαλύτερη εφαρμογή στην ιατρική και την αεροδιαστημική.

Είναι ικανή για υψηλή ακρίβεια, ειδικά για μικρά αντικείμενα. Το βασικό πλεονέκτημά της έγκειται στην ικανότητα σύλληψης και αναδημιουργίας εσωτερικής πληροφορίας. Η πλέον διαδεδομένη μορφή της εκφράζεται με τη χρήση ακτίνων X, όπου γίνεται χρήση ενός πομπού ακτίνων X χαμηλής ενέργειας. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν επίσης και μέθοδοι οπτικής και ακουστικής τομογραφίας, αλλά είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο εξέλιξης σε σχέση με την τομογραφία ακτίνων X.

Η τομογραφία όταν εφαρμόζεται σε ανθρώπους βασίζεται στο ότι το σώμα των ανθρώπων παρουσιάζει διαφοροποίηση ως προς το υλικό, π.χ. κόκκαλα, μύες, υγρά, αέρια, κλπ. Καθένα από τα υλικά αυτά απορροφά μέρος των ακτίνων X σε διαφορετικό ποσοστό, και, συνεπώς, καθώς οι ακτίνες διατρέχουν το σώμα προκύπτει εικόνα χαρακτηριστική της διαδρομής που διανύθηκε και των υλικών που συναντήθηκαν. Για το λόγο αυτό η τομογραφία ακτίνων X ανθρώπινου σώματος θεωρείται πλούσια σε πληροφορία. Γενικά, όμως, δεν μπορεί να λεχθεί το ίδιο και για τα πολιτιστικά αντικείμενα. υπάρχουν εξαιρέσεις, αλλά παίρνοντας για παράδειγμα τα αγάλματα, υπάρχει πολύ μικρή διαφοροποίηση στα εσωτερικά υλικά και, έτσι, η τομογραφία μπορεί να συλλάβει μικρά ποσοστά πληροφορίας. Φυσικά υπάρχουν και εξαιρέσεις, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές ανοίγματος σαρκοφάγων.

3.3.2.1.4 Τεχνικές ψηφιοποίησης αντικειμένων μεγάλου μεγέθους

Στην κατηγορία αυτή αναφερόμαστε σε αντικείμενα μεγαλύτερα από 2 μέτρα (μπορεί να φτάνουν τα 100 μέτρα). Ενώ υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη μέτρηση μεσαίων αντικειμένων στην εν λόγω κλίμακα, υπάρχει γενικά μια έλλειψη μεθόδων στην κατηγορία αυτή. Στο τέλος της κλίμακας το πρόβλημα ανάγεται σε τεχνικές ψηφιοποίησης χώρων.

Εδώ υπάρχουν δύο βασικές οικογένειες μεθόδων:

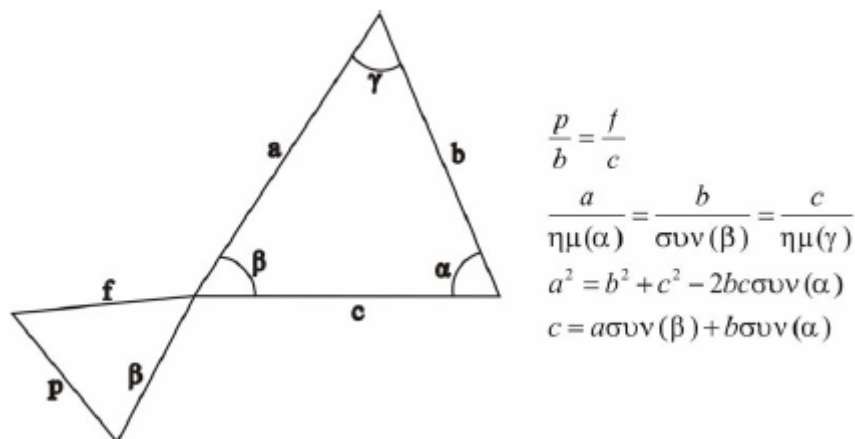
- Στην πρώτη οικογένεια, οι μέθοδοι βασίζονται στην ιδέα του «οπτικού radar». Στην απλούστερη περίπτωση μια πηγή εκπέμπει ακτίνες laser οι οποίες είναι διαμορφωμένες είτε κατά πλάτος είτε κατά συχνότητα. Η ακτίνα ανακλάται από το στόχο προς μέτρηση και ανιχνεύεται από το σύστημα μέτρησης. Με εξέταση της κατάστασης διαμόρφωσης της ακτίνας που ανιχνεύεται είναι δυνατός ο υπολογισμός του χρόνου που χρειάστηκε για να διανυθεί η αντίστοιχη απόσταση της ακτίνας από τον πομπό στο αντικείμενο και πίσω στο δέκτη. Γνωρίζοντας την ταχύτητα του φωτός στον αέρα είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόστασης που διανύθηκε. Τα συστήματα αυτά είναι γνωστά ως συστήματα «χρόνου πτήσης» (“time of flight”). Στην κατηγορία αυτή υπάρχουν διαθέσιμες εμπορικές συσκευές με δυνατότητα μέτρησης πολλαπλών σημείων και ακολουθιακής σύνθεσης μιας ολοκληρωμένης τρισδιάστατης σκηνής. Οι καλύτερες τεχνικές έχουν ακρίβεια περί τα 5 χιλιοστά για αποστάσεις λειτουργίας περί τα 30 μέτρα και άνω. Το προφανές μειονέκτημα είναι ότι πρόκειται για σύστημα που βασίζεται σε σημεία, δηλαδή αποτελούν μια μεγέθυνση των συστημάτων τριγωνοποίησης και συνεπώς απαιτείται σημαντικός χρόνος για τη συλλογή του συνόλου των απαιτούμενων δεδομένων.
- Στη δεύτερη οικογένεια μέτρησης μεγάλων αντικειμένων ανήκουν τεχνικές *φωτογραμμετρίας*. Η βασικότερη των τεχνικών αυτών είναι η γνωστή «καθοδηγούμενη στερεο-φωτογραμμετρία». Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται σημεία αναφοράς, τα οποία ορίζονται στην επιφάνεια των προς μέτρηση αντικειμένων και λαμβάνεται τουλάχιστον ένα ζεύγος φωτογραφιών από διαφορετικές γωνίες. Μέσω της ταύτισης των σημείων αναφοράς, είτε αυτόματα είτε όχι, καθίσταται δυνατή η ανάκτηση πληροφορίας τρισδιάστατης γεωμετρίας με τη μέτρηση απόστασης από το

επίπεδο λήψης των φωτογραφιών. Η μέθοδος δίνει, προφανώς, καλύτερα αποτελέσματα όταν στα αντικείμενα ή, γενικά, στη σκηνή υπάρχουν επίπεδες επιφάνειες με λίγα σημεία αναφοράς. Είναι, γενικότερα, μέθοδος που ενδείκνυται περισσότερο για την ψηφιοποίηση μνημείων ή χώρων.

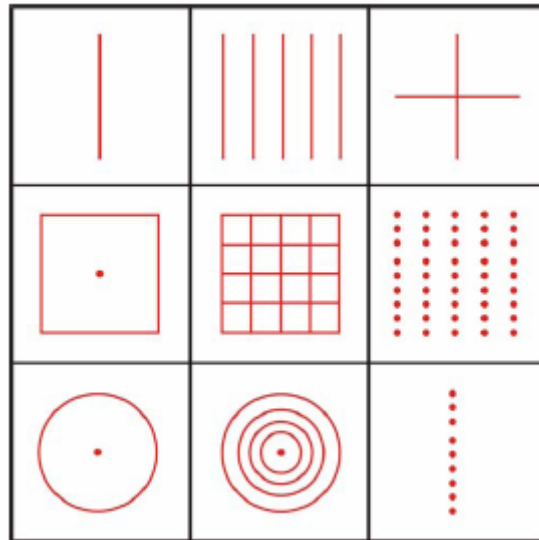
3.4 Σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριγώνων αποτελούν την βάση για πολλές τεχνικές μετρήσεων. Από τις βασικές μετρήσεις γεωδαισίας που πραγματοποιούνταν στην αρχαία Ελλάδα μέχρι και σήμερα με τους τρισδιάστατους σαρωτές λέιζερ, η χρήση των τριγώνων είναι θεμελιώδης. Ο Θαλής (6ος π.χ. αιώνας) διακρίθηκε για την ανακάλυψη πέντε γεωμετρικών θεωρημάτων. Δύο από αυτά εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα αφού αποτελούν την λύση στο πρόβλημα της τριγωνοποίησης. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται το *θεώρημα των αντίθετων γωνιών σε δύο τεμνόμενες ευθείες* και ο *νόμος των συνημίτονων*.

Οι πηγές ακτίνων λέιζερ έχουν μεγάλη εφαρμογή στη τρισδιάστατη σάρωση. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά μια δέσμης φωτός λέιζερ είναι η έντονη φωτεινότητα που την καθιστά αντιληπτή από οπτικούς αισθητήρες. Σε γενικές γραμμές, το φως που παράγουν οι πηγές λέιζερ είναι μονοχρωματικό, κατευθυντικό (σε αρκετά υψηλό βαθμό) και σε φάση. Η ιδιότητα της δέσμης να βρίσκεται σε φάση επιτρέπει στην ακτίνα λέιζερ να μένει εστιασμένη όταν προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια αντικείμενου. Τα συστήματα που βασίζονται στην εκπομπή ακτίνων λέιζερ χρησιμοποιούν διαφορετικά μοτίβα φωτός. Στην Εικόνα 18 παρουσιάζονται κάποια από τα πλέον κλασικά μοτίβα προβολής που απαντώνται σε εμπορικά αλλά και ερευνητικά συστήματα.



Εικόνα 17. Όμοια τρίγωνα και νόμος συνημίτονων



Εικόνα 18. Διάφοροι τύποι μοτίβων προβολής ακτίνων λέιζερ

Οι σαρωτές αντικειμένων που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως σε αποστάσεις μικρότερες των δέκα μέτρων και θα μπορούσαμε να τους κατατάξουμε σε κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούν. Έτσι σε σαρωτές με έναν αισθητήρα εικόνας υπάρχει μια πηγή που προβάλλει την ακτίνα λέιζερ σε μια συγκεκριμένη και μεταβαλλόμενη προς την επιφάνεια του αντικείμενου γωνία. Ένας αισθητήρας εικόνας *CCD* ή *CMOS* βρίσκεται στην άλλη άκρη της βάσης του συστήματος και αναλαμβάνει τον εντοπισμό του σημείου ή της περιοχής που περιγράφει η ακτίνα λέιζερ καθώς ανακλάται στην επιφάνεια του αντικείμενου. Η προβολή της ακτίνας μπορεί να σχηματίζει απλά ένα φωτεινό σημείο, μια γραμμή, ένα μοτίβο από ρίγες ή ακόμα και ένα στατικό τυχαίο πλέγμα (Εικόνα 18). Η τρισδιάστατη θέση της επιφάνειας του αντικείμενου που αντανακλά την ακτίνα μπορεί να βρεθεί από το ιδεατό τρίγωνο που δημιουργείται. Η ακρίβεια μέτρησης βάθους μειώνεται ανάλογα με την απόσταση ανάμεσα στο σαρωτή και το αντικείμενο.

Για πρακτικούς λόγους, η απόσταση ανάμεσα στους οπτικούς αισθητήρες και στην πηγή της ακτίνας λέιζερ δεν μπορεί να μεταβάλλεται ανεξέλεγκτα.

Η χρήση δύο οπτικών αισθητήρων αποτελεί μια παραλλαγή της αρχικής ιδέας τριγωνοποίησης. Οι αισθητήρες βρίσκονται στα δύο άκρα της βάσης του σαρωτή. Το σημείο αντανάκλασης της ακτίνας λέιζερ γίνεται αντιληπτό και από τους δύο αισθητήρες. Η γεωμετρική λύση είναι ίδια με αυτήν του ενός αισθητήρα άρα και τα αποτελέσματα έχουν την ίδια ακρίβεια. Ο δεύτερος αισθητήρας χρησιμοποιείται για την γρηγορότερη σάρωση αφού η πολυμορφία της επιφάνειας των αντικειμένων προκαλεί συχνά την αδυναμία του ενός αισθητήρα να φτάσει σε κάποια σημεία που την ίδια στιγμή μπορεί να είναι εμφανή στο δεύτερο αισθητήρα λόγω της διαφορετικής του θέσης και γωνίας.

Η οπτική τριγωνοποίηση είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται για περισσότερο από είκοσι χρόνια για την μέτρηση αποστάσεων. Τα τελευταία χρόνια όμως η ανάπτυξη γεωμετρικά σταθερών αισθητήρων και διόδων

φωτός βελτίωσε κατά πολύ την ακρίβεια και την ταχύτητα της εν λόγω τεχνικής. Η ποικιλία στους σαρωτές τριγωνοποίησης βασίζεται κυρίως στη

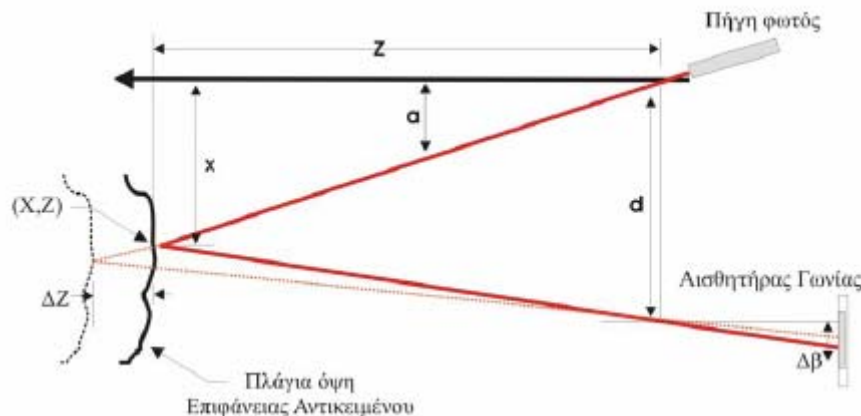
- *δομή του φωτισμού* (απλό σημείο, ακτίνα λέιζερ, πολλαπλός πίνακας σημείων ή πολλαπλές δέσμες ακτίνων),

- *μορφή του αισθητήρα* (γραμμικός πίνακας ή πλέγμα CCD ή CMOS)

- *μέθοδο σάρωσης* (μετακίνηση του αντικειμένου μπροστά από την πηγή φωτός ή μετακίνηση του ίδιου του συστήματος γύρω από το αντικείμενο).

Στην Εικόνα 19 επεξηγείται το πρόβλημα της τριγωνοποίησης σε δύο διαστάσεις. Η θέση του κέντρου του παλμού της δέσμης φωτός που αντανακλάται στην επιφάνεια αποτυπώνεται πάνω στον αισθητήρα εικόνας. Ο σαρωτής με την σειρά του υπολογίζει τη νοητή γραμμή που τέμνει τη δέσμη σε ένα ακριβώς σημείο και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάκτηση του βάθους. Το τρισδιάστατο σχήμα του αντικειμένου προκύπτει από την μετακίνηση και περιστροφή του αντικείμενου μπροστά από την σταθερή ακτίνα που προβάλλει ο σαρωτής.

Υπάρχει επίσης και η παραλλαγή της μεθόδου όπου η σάρωση του αντικείμενου πραγματοποιείται με την ακτίνα λέιζερ να μετακινείται γύρω από το αντικείμενο. Η ακρίβεια της οπτικής τριγωνοποίησης βασίζεται στην ικανότητα εντοπισμού του κέντρου του παλμού της δέσμης σε κάθε χρονική στιγμή. Σε συστήματα οπτικής τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων, όπου το βάθος υπολογίζεται από έναν και μόνο παλμό φωτός, παράγεται ένα καθορισμένο εύρος σφαλμάτων. Τα σφάλματα αυτά εμφανίζονται λόγω της αντανάκλασης της δέσμης στην επιφάνεια του αντικείμενου αλλά και εξαιτίας των χαρακτηριστικών της ίδιας της επιφάνειας.



Εικόνα 19. Η αρχή της τριγωνοποίησης

Η βασική γεωμετρική αρχή των συστημάτων τριγωνοποίησης περιγράφεται στο Εικόνα 19. Μπορείτε να διακρίνετε το συσχετισμό ανάμεσα στο σχήμα αυτό και στο σχήμα που περιγράφει τον νόμο των συνημίτονων (Εικόνα 17).

Γνωρίζοντας τις δύο γωνίες (α και $\Delta\beta$) ενός τριγώνου που είναι πάντα σχετικές με τη βάση του (d) τότε όλα τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις του τριγώνου μπορούν να οριστούν πλήρως. Σε κάθε αλλαγή της απόστασης ΔZ , μπορεί να υπολογιστεί η γωνία $\Delta\beta$ με το θεώρημα των αντίθετων γωνιών, θεωρώντας ότι το α είναι πάντα σταθερό. Ο αισθητήρας γωνίας είναι σταθερός. Για τον υπολογισμό της θέσης της επιφάνειας του αντικείμενου απαιτείται η σάρωση της κάθε δισδιάστατης εικόνας που αποτυπώνει ο

οπτικός αισθητήρας, ώστε να βρεθεί το σημείο με την μέγιστη συγκέντρωση φωτός. Η διάταξη που παρουσιάζει το Εικόνα 19 είναι γνωστή ως *σύστημα μονού σημείου ακτίνας λείζερ*.

Στην Εικόνα 20 η ακτίνα φωτός αντανακλάται από έναν καθρέφτη και προβάλλεται στη συνέχεια μέσω αυτού πάνω στην επιφάνεια του αντικείμενου.

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από ένα φακό και ένα αισθητήριο το οποίο αποτυπώνει ψηφιακά την θέση της δέσμης φωτός πάνω στο αντικείμενο. Με απλή τριγωνομετρία, οι συντεταγμένες (x , z) του φωτιζόμενου σημείου μπορούν να υπολογιστούν. Οι υπολογισμοί γίνονται με τους εξής μαθηματικούς τύπους:

$$z = \frac{df_o}{p + f_o \tan(\theta)} \text{ και } x = z \tan(\theta)$$

όπου p είναι η θέση του σημείου του αντικείμενου, όπως παρουσιάζεται πάνω στον αισθητήρα, θ είναι η γωνία απόκλισης της ακτίνας λείζερ, ενώ d είναι η απόσταση ανάμεσα στον φακό και την πηγή της ακτίνας. f_o είναι η απόσταση ανάμεσα στον αισθητήρα και το φακό.

Οι περιορισμοί της μεθόδου τριγωνοποίησης μπορούν να αποδειχθούν αν προσπαθήσουμε να υπολογίσουμε την απόκλιση σφάλματος στον άξονα z , ορίζοντας το σ_z ως μια συνάρτηση του p . Ο νόμος διάδοσης των σφαλμάτων είναι:

$$\sigma_z \approx \frac{z^2}{f_o d} \sigma_p$$

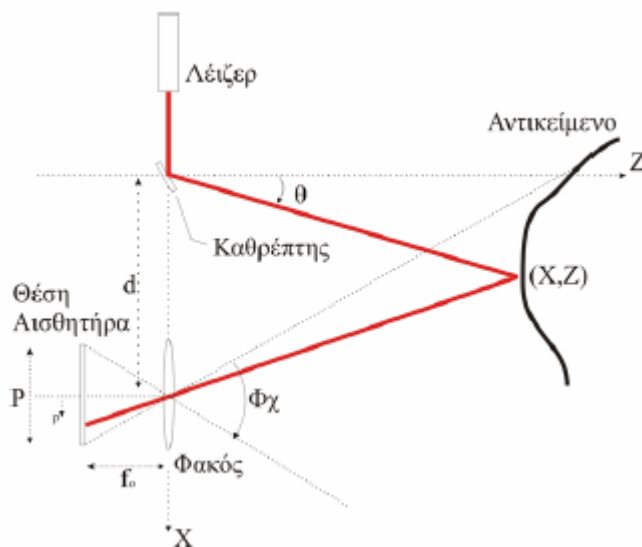
όπου σ_p είναι η τυπική απόκλιση σφαλμάτων για κάθε μέτρηση του σημείου p .

Ως εκ τούτου, η τυπική απόκλιση εκφράζει την απροσδιοριστία του z που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την βάση της κάμερας και την εστιακή απόσταση του φακού. Το μέγεθος της παραμέτρου d περιορίζεται κυρίως από:

- τα κατασκευαστικά στοιχεία των οπτικών τμημάτων του συστήματος (η σταθερότητα του όλου συστήματος μειώνεται όσο το d αυξάνεται)
- τις σκιές που δημιουργούνται (προβλήματα *αυτό-απόφραξης* με την αύξηση του d)
- Το πεδίο όρασης Φ_χ δίνεται από τον τύπο

$$\Phi_\chi = 2 \tan^{-1} \left(\frac{P}{2f_o} \right)$$

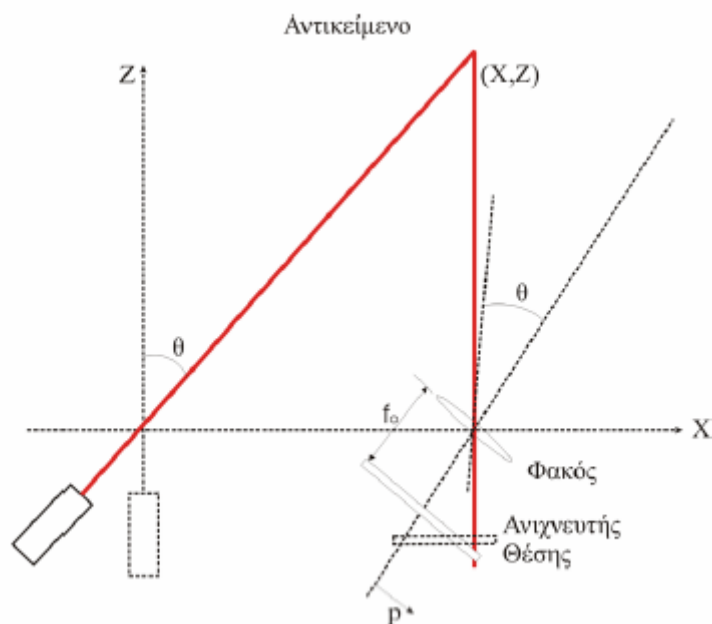
όπου P είναι το μήκος της απόστασης θέσης του αισθητήρα.



Εικόνα 20. Συμβατική προσέγγιση σάρωσης

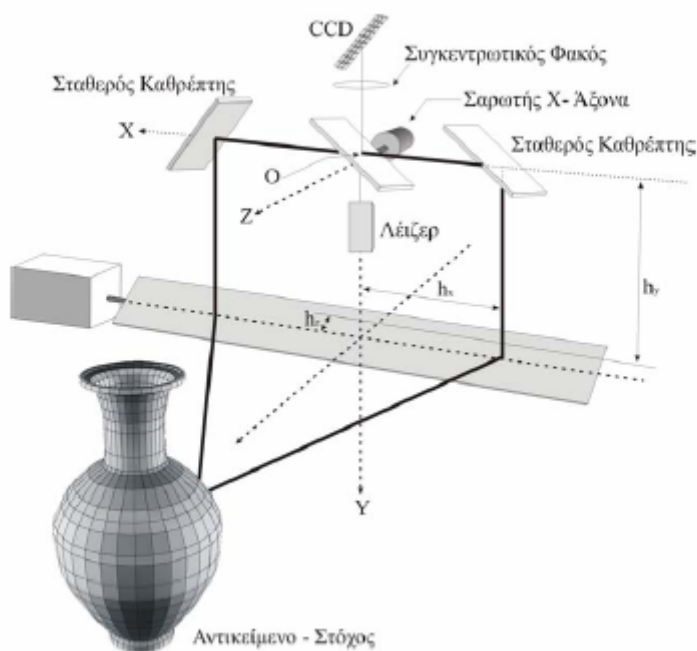
Συνεπώς, σε μια τυπική κατασκευή ενός συστήματος σάρωσης υπάρχει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην εστιακή απόσταση, στην απροσδιοριστία μέτρησης της τρίτης διάστασης και των σκιών που μπορεί να δημιουργηθούν. Ένας τρισδιάστατος σαρωτής που βασίζεται στην τριγωνοποίηση εμφανίζει συνήθως μια τυπική απόκλιση (σ_z) της τάξης των 50 – 150 μm .

Ο Rioux παρουσίασε μια καινοτόμο προσέγγιση στην σάρωση με τριγωνοποίηση. Προτείνει ένα συγχρονισμένο σύστημα που μπορεί να σαρώσει σε πολύ μεγάλες εστιακές αποστάσεις με πολύ μικρές γωνίες τριγωνοποίησης χωρίς να τίθεται θέμα συμβιβασμού στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με μικρές γωνίες τριγωνοποίησης επιτυγχάνεται, επίσης, μείωση στην εμφάνιση πιθανών σκιών. Ο απώτερος σκοπός δεν είναι άλλος από τον συγχρονισμό της προβολής της ακτίνας λέιζερ και του εντοπισμού της. Όπως περιγράφεται στην Εικόνα 20, το οπτικό πεδίο του ανιχνευτή θέσης ακολουθεί το σημείο καθώς σαρώνει τη σκηνή. Η εστιακή απόσταση του φακού σχετίζεται με το επιθυμητό βάθος πεδίου, ή την περιοχή μέτρησης και όχι με το οπτικό πεδίο. Η ανάπτυξη σαρωτών αυτόματου συγχρονισμού έχει αποφέρει σημαντικές μειώσεις στις διαστάσεις της οπτικής κεφαλής των συστημάτων.



Εικόνα 21. Απλοποιημένο διάγραμμα σαρωτή με ένα άξονα σάρωσης

Όπως προαναφέρθηκε, για μια πλήρη τρισδιάστατη αποτύπωση ενός αντικειμένου απαιτείται είτε η μετακίνηση του σαρωτή γύρω από το αντικείμενο είτε κάποια άλλη μέθοδος. Η μηχανική μετατόπιση βασισμένη σε γαλβανόμετρα είναι μια μέθοδος που επιτρέπει τη μετατόπιση της δέσμης φωτός πάνω σε επιφάνειες. Η βασική οργάνωση των οπτικών τμημάτων ενός τέτοιου συστήματος περιγράφεται στην Εικόνα 22. Οι καθρέφτες περιστρέφονται γύρω από το κέντρο ενός νοητού άξονα με τη χρήση γαλβανόμετρων. Ο άξονας X (μεγάλη ταχύτητα σάρωσης) χρησιμοποιείται για τη γραμμική σάρωση, ενώ ο άξονας Y (μικρή ταχύτητα σάρωσης) ανακλά κάθετα την ακτίνα, ώστε να δημιουργήσει την εικόνα που καταγράφεται από ένα CCD.



Εικόνα 22. Σάρωση διπλών αξόνων

Το τρισδιάστατο μοντέλο της επιφάνειας του αντικειμένου προκύπτει από μια ακολουθία διαδικασιών. Αυτές είναι οι εξής:

- εκπομπή της δέσμης φωτός (ακτίνα λέιζερ)
- συλλογή της δέσμης καθώς διασκορπίζεται στην σκηνή (μαζί με όλες τις μεταβολές που δέχεται εξαιτίας της ανάκλασης πάνω στις επιφάνειες του αντικειμένου) σε συγχρονισμό με τους καθρέφτες προβολής.
- συγκέντρωση της δέσμης στο γραμμικό ανιχνευτή θέσης γνωστό και ως CCD.

Πιο συγκεκριμένα, από τη διαδικασία πρόσκτησης των εικόνων εξάγονται τρεις διαφορετικές πληροφορίες σε κάθε βήμα της διαδικασίας δειγματοληψίας:

- δύο γωνιακές θέσεις των καθρεφτών και,
- θέση του στίγματος της ακτίνας λέιζερ πάνω στον ανιχνευτή θέσης

Οι εξισώσεις που παράγονται από την βαθμονόμηση του συστήματος χρησιμοποιούνται για την χαρτογράφηση των γωνιακών θέσεων και του στίγματος της ακτίνας φωτός πάνω σε ένα κλασικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (x,y,z) .

Σε πολλές εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων πολιτισμικής κληρονομιάς, εκτός από τη γεωμετρία, η απόκτηση πληροφορίας υψής είναι απαραίτητη, καθώς προσφέρει μεγάλο ρεαλισμό, ιδιαίτερα όταν τα αντικείμενα φέρουν κάποιας μορφής διακόσμηση. *Με την χαρτογράφηση της πληροφορίας υψής πάνω στην γεωμετρία επιτυγχάνεται μια φωτορεαλιστική απόδοση του αντικειμένου.* Μερικοί σαρωτές μπορούν και καταγράφουν την ένταση του επιστρεφόμενου σήματος προς τον οπτικό αισθητήρα. Αυτή η πληροφορία, όμως, δεν είναι αρκετή για την ρεαλιστική απόδοση της υψής. Οι περισσότεροι εμπορικοί σαρωτές τριγωνοποίησης έχουν βελτιστοποιηθεί για την αναγνώριση της ακτίνας λέιζερ και του σημείου που καταδεικνύει και όχι για την αποτύπωση της πληροφορία υψής στο συγκεκριμένο σημείο. Υπάρχουν χρήστες που απαιτούν την ύπαρξη υψηλής ποιότητας φωτογραφικών μηχανών μέσα στο ίδιο σύστημα σάρωσης. Η λύση αυτή είναι όμως δαπανηρή και κάποιοι εκ των χρηστών δεν είναι έτοιμοι να ανταποκριθούν στο κόστος μιας τέτοιας επιπρόσθετης λειτουργίας. Μια τυπική λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, που ακολουθείται από αρκετές εταιρείες, είναι η τοποθέτηση εξωτερικής ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής πάνω στο σαρωτή με χρήση κάποιου συστήματος στήριξης και προσαρμογής. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η γνώση της σχετικής απόστασης σαρωτή και ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση τους. Η βαθμονόμηση και των δύο θα επιτρέψει την χαρτογράφηση (UV mapping) των δισδιάστατων εικόνων πάνω στην επιφάνεια του πολυγωνικού πλέγματος ή του νέφους σημείων.

Οι προδιαγραφές των εμπορικών σαρωτών, όπως δίνονται από τις κατασκευάστριες εταιρείες, πρέπει πάντα να τίθενται υπό αμφισβήτηση. Οι πιθανές αποστάσεις κάλυψης σχετίζονται με την ανακλαστικότητα του ίδιου του αντικειμένου αλλά και την διαύγεια της ατμόσφαιρας, την οποιαδήποτε άλλη επιπρόσθετη ακτινοβολία που μπορεί να προκαλείται από τεχνητή

ακτινοβολία και άλλες πηγές παρεμβολής. Οι σαρωτές ανίχνευσης σήματος που βασίζονται σε αισθητήρες CCD για τριγωνοποίηση δεν είναι τόσο ευαίσθητοι όσο αυτοί των τεχνικών *χρόνου πτήσης σήματος* (time of flight) και *μέτρησης διαφοράς φάσης* που χρησιμοποιούνται κυρίως για αποτυπώσεις ακίνητων αντικειμένων και σκηνών. Κάποιες φορές τα συστήματα αυτά απαιτούν συνθήκες νυχτερινού φωτισμού για καλύτερη λειτουργία.

3.4.1 Η ακρίβεια των γεωμετρικών αποτελεσμάτων

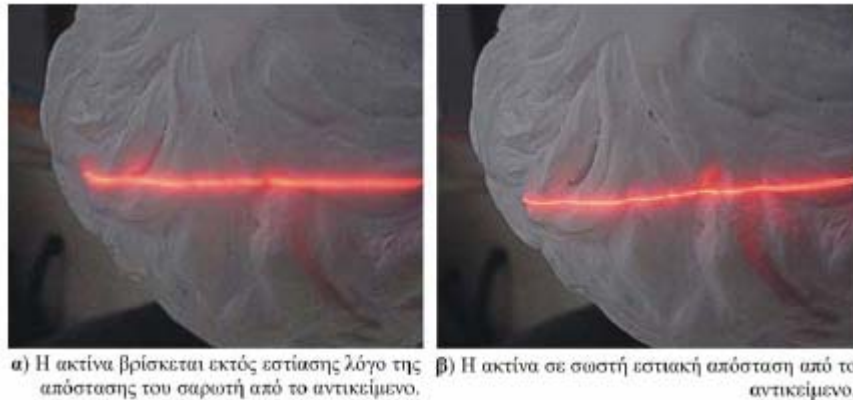
3.4.1.1 Η διαδικασία της βαθμονόμησης

Η διαδικασία βαθμονόμησης του ψηφιακού οπτικού συστήματος που χρησιμοποιεί ένας σαρωτής λέιζερ κοντινών αποστάσεων είναι βασικός παράγοντας της ορθής λειτουργίας του. Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι συνήθως τυποποιημένη και περιλαμβάνει την αναγνώριση των *εσωτερικών* και *εξωτερικών* χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος με την βοήθεια ενός πραγματικού αντικείμενου που τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά είναι γνωστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα χαρακτηριστικά αυτά βοηθούν στην εύρεση εκείνου του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την εστιακή απόσταση, τις παραμορφώσεις που εισάγει ο φακός στην εικόνα, καθώς και άλλες παραμέτρους που έχουν εφαρμογή στη σάρωση. Μετά τη σάρωση του γνωστού αντικείμενου η ακρίβεια και οι ανοχές μέτρησης του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν. Αυτή η διαδικασία αποτελεί και τη φάση επαλήθευσης και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων. Η ακρίβεια του συστήματος μπορεί να υπολογισθεί μέσω του γνωστού αντικείμενου βαθμονόμησης το οποίο αποτυπώνεται από διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς.

Ένας γενικός κανόνας που ακολουθείται στη συγκεκριμένη διαδικασία είναι πως τα χαρακτηριστικά του αντικείμενου βαθμονόμησης πρέπει να είναι γνωστά με ακρίβεια δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που αποτυπώνει το ψηφιακό οπτικό σύστημα του σαρωτή.

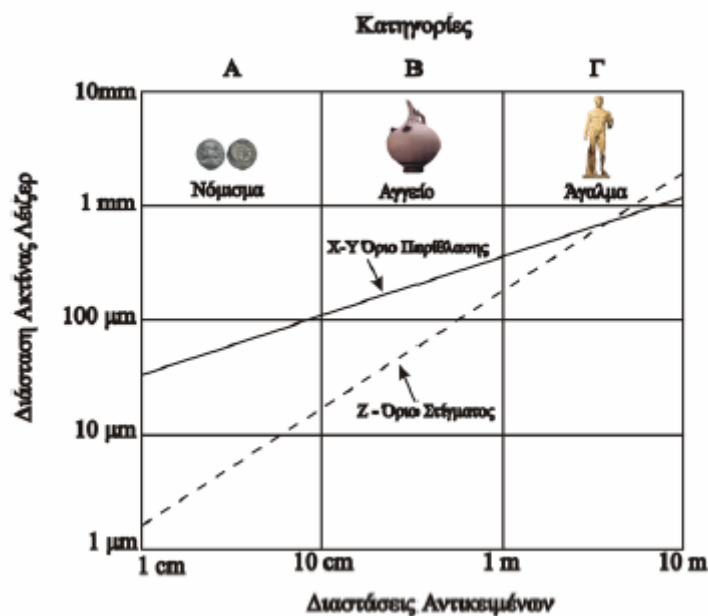
3.4.1.2 Ανάλυση του σαρωτή

Η τελική ανάλυση ενός αντικείμενου είναι θεωρητικά μια συνάρτηση του μεγέθους των γωνιακών μεταβολών που μπορεί να αντληφθεί το σύστημα καθώς η ακτίνα λέιζερ μετακινείται πάνω στις επιφάνειες. Μια πιο πρακτικής αξίας επεξήγηση της ανάλυσης σχετίζεται με το μέγεθος του στίγματος της ακτίνας λέιζερ που αντανάκλαται. Αν η υψηλή ανάλυση είναι βασική προϋπόθεση σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης, τότε θα πρέπει με μεγάλη προσοχή να ελεγχθεί η βέλτιστη ικανότητα εστίασης της ακτίνας πάνω στο αντικείμενο είτε χειροκίνητα είτε μέσω κάποιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας που φέρει ο σαρωτής, έτσι, ώστε η αποτύπωση της γεωμετρίας του αντικείμενου να γίνει με την υψηλότερη δυνατή ανάλυση. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από διαδικασία ψηφιοποίησης στο επάνω τμήμα μιας προτομής. Η ρύθμιση της εστίασης γίνεται χειροκίνητα. Εμφανέστατη είναι η διαφορά έντασης της δέσμης καθώς ο σαρωτής πλησιάζει προς το σημείο βέλτιστης εστίασης.



Εικόνα 23. Χειροκίνητος έλεγχος βέλτιστης εστίασης της ακτίνας πάνω σε αντικείμενο

Η ανάλυση της οπτικής τριγωνοποίησης περιορίζεται από την περίθλαση της ακτίνας. Ακόμα και σε βέλτιστες περιπτώσεις εκπομπής, η δέσμη φωτός δεν διατηρεί τον απόλυτη ευθυγράμμιση με τον στόχο της. Στην πραγματικότητα, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα λέιζερ τόσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση που δημιουργείται εξαιτίας της περίθλασης. Η περίθλαση της δέσμης επιβάλλει έναν περιορισμό στην ισχύ της ακτίνας λέιζερ. Το γράφημα στην Εικόνα 23 περιγράφει το βαθμό διάθλασης της ακτίνας καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος των αντικειμένων. Ο διαχωρισμός των αντικειμένων έγινε με βάση τις διαστάσεις τους σε τρεις βασικές κατηγορίες. Ο περιορισμός αυτός έχει να κάνει με τα όρια ανάκτησης της δέσμης από τους αισθητήρες καθώς η δέσμη κινείται κατά μήκος των αξόνων x και y . Στην περίπτωση του άξονα z θα περίμενε κανείς μια συνεχόμενη βελτίωση καθώς η ισχύς της ακτίνας αυξάνεται και πλησιάζει την επιφάνεια του αντικειμένου. Δυστυχώς όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει.



Εικόνα 24. Φυσικά όρια τρισδιάστατων οπτικών μετρήσεων που βασίζονται σε προβολή δέσμης φωτός – λέιζερ

Κοινό χαρακτηριστικό των σαρωτών κοντινών αποστάσεων αποτελεί το γεγονός ότι μεμονωμένα χαρακτηριστικά των αντικειμένων δεν μπορούν να αναγνωριστούν άμεσα. Οι μετρήσεις των αποστάσεων βάθους πολλές φορές αποκτούνται με βάση ένα τυπικό νοητό πλέγμα (π.χ. πλέγμα αισθητήρα CCD),

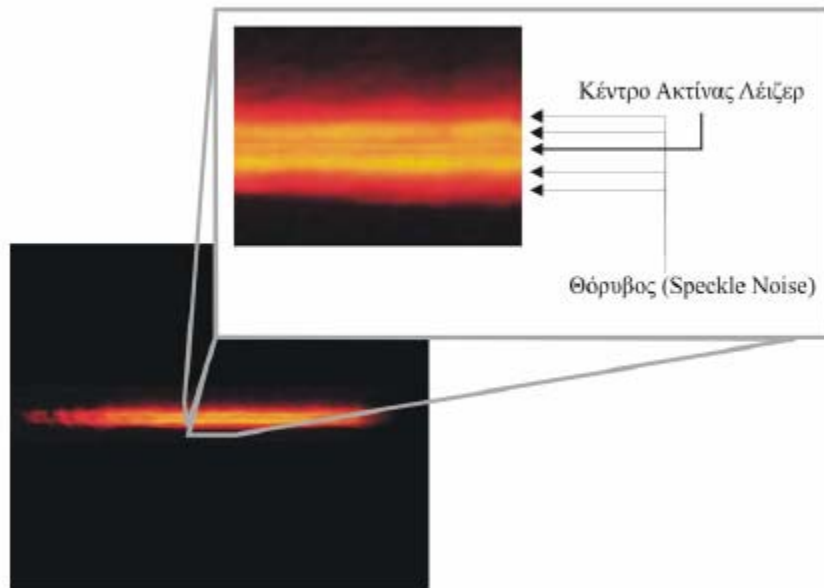
το οποίο δεν μπορεί να εξασφαλίσει ότι κάθε δοθέν σημείο πάνω στο αντικείμενο συμπίπτει με ένα και μόνο ένα συγκεκριμένο σημείο πάνω στο πλέγμα. Οι μετρήσεις *σημείο-προς-σημείο* βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε παρεμβολή (interpolation). Αυτός ο περιορισμός είναι αποτέλεσμα της προκαθορισμένης χωρικής ανάλυσης του αισθητήρα εικόνας. Σε άλλες περιπτώσεις, όπως θα δούμε και παρακάτω (*Σχήμα-Από-Δομημένο-Φως*), η ίδια η τεχνική εισάγει μια κατά προσέγγιση εκτίμηση (averaging).

3.4.1.3 Ο θόρυβος της δέσμης φωτός

Σε συστήματα τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων, η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό από την ορθή ερμηνεία της θέσης της ακτίνας λέιζερ. Η δέσμη φωτός δημιουργεί ένα *Gaussian* προφίλ πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, η χωρική κατανομή της δέσμης φωτός σε ένα σημείο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση καταστροφικών παρεμβολών που περιορίζουν τη δυνατότητα ανάκτησης της δέσμης από τους οπτικούς αισθητήρες. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως *speckle effect* και εμφανίζεται με την μορφή τυχαίας διάχυσης της δέσμης. Υπεύθυνη για το θόρυβο είναι μεταξύ άλλων η επιφάνεια του αντικειμένου και, κυρίως, η τραχύτητα της. Ο θόρυβος αυτός (*speckle noise*) ο οποίος εμφανίζεται στη δέσμη του φωτός μεταφέρεται και στα τελικά δεδομένα (Εικόνα 24).

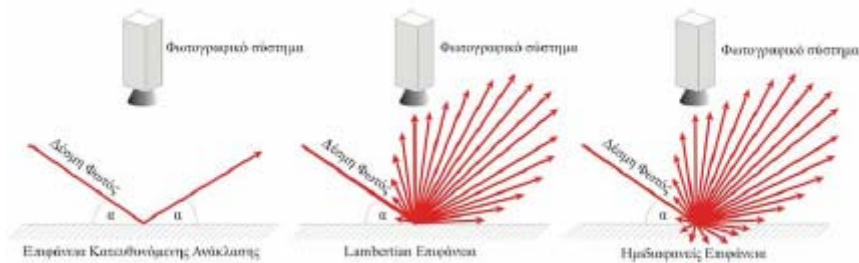
Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις συνέπειες του θορύβου στον καθορισμό αποστάσεων με τριγωνοποίηση και έχουν καταλήξει στο αξίωμα ύπαρξης ενός θεμελιώδους ορίου που αποτελεί και το φράγμα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ο θόρυβος δύναται να μειωθεί με την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών. Οι γραμμικές τεχνικές φιλτραρίσματος που βασίζονται σε χρονικούς τελεστές και βρίσκουν εφαρμογή στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας δεν αποδίδουν στην συγκεκριμένη περίπτωση και δεν μπορούν να μειώσουν τέτοιου είδους θόρυβο. Η διόρθωση γίνεται με τεχνικές φιλτραρίσματος στο πεδίο της εικόνας. Τα φίλτρα αυτά είναι γνωστά από τους χώρους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και ως *χωρικά φίλτρα*. Μια κλασική μέθοδος για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος ορθής ερμηνείας της θέσης, αποτελεί η εύρεση του κέντρου του μονοδιάστατου παλμού της δέσμης. Τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής είναι σωστά μόνο όταν η επιφάνεια σάρωσης είναι επίπεδη.

Καταλήγουμε λοιπόν στον κανόνα ότι «*τα οπτικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενός αντικειμένου επηρεάζουν τις επιδόσεις του σαρωτή λέιζερ*».



Εικόνα 25. Θορυβώδες Gaussian προφίλ δέσμης φωτός (speckle noise)

Ο βέλτιστος τύπος επιφάνειας για ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι αυτός που φέρει χαρακτηριστικά Lambert και ταυτόχρονα έχει υψηλό δείκτη ανάκλασης. Στην Εικόνα 26 περιγράφεται ο τρόπος που συμπεριφέρονται οι δέσμες φωτός καθώς ανακλώνται σε μια επιφάνεια κατευθυνόμενης ανάκλασης (specular) (Εικόνα 26α), σε μια Lambertian επιφάνεια (Εικόνα 26β) και μια ημιδιαφανή επιφάνεια (π.χ. μάρμαρο) (Εικόνα 26γ).



Εικόνα 26. Συμπεριφορά ανάκλασης φωτός πάνω σε επιφάνειες

Σε μια ημιδιαφανή επιφάνεια το φως διεισδύει μέσα στα υποστρώματα του αντικειμένου σε βάθος ανάλογο της ισχύος του. Επιπρόσθετα, τα φως διαχέεται μέσα στα υποστρώματα του αντικείμενου και δημιουργεί διασκορπισμό. Στην ημιδιαφανή επιφάνεια το οπτικό σύστημα του σαρωτή συλλέγει πλήθος από ανακλάσεις φωτός που περιέχουν κορυφές. Αν η ένταση της δέσμης μειωθεί, ο θόρυβος γίνεται ακόμα πιο εμφανής και αυτό μειώνει περισσότερο την ποιότητα ανακατασκευής του τρισδιάστατου μοντέλου.

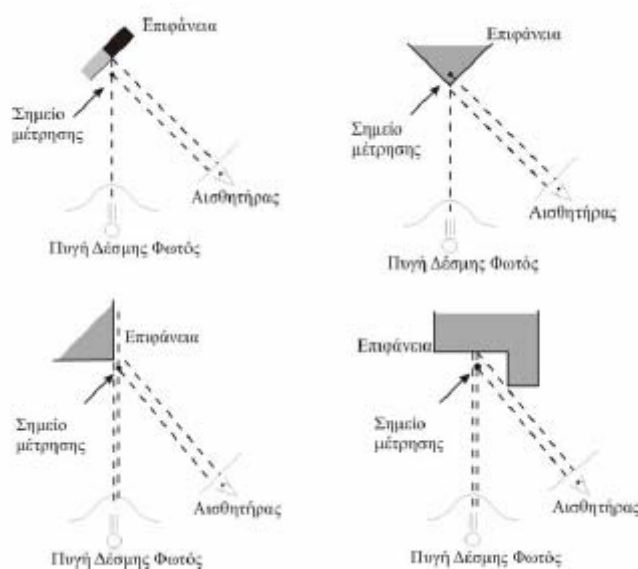
Γενικά, θόρυβος στα δεδομένα εμφανίζεται όταν:

- η ανακλαστικότητα της επιφάνειας ποικίλει και μεταβάλλεται
- η γεωμετρία της επιφάνειας παρεκκλίνει έντονα από επίπεδο σε επίπεδο
- η πορεία της δέσμης φωτός μέχρι τον αισθητήρα παρεμποδίζεται
- η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί θόρυβο στην δέσμη φωτός

Στην Εικόνα 27 εικονίζονται κάποια κλασικά παραδείγματα όπου εμφανίζονται λάθη στον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στην επιφάνεια του αντικειμένου και στην πηγή της δέσμης φωτός.

Στην Εικόνα 27 θεωρούμε ότι ο αισθητήρας δέχεται μονοδιάστατες ορθογραφικές προβολές. Στην Εικόνα 27α φαίνεται πως εξαιτίας της ανάκλασης δημιουργείται ένα σημείο, το οποίο δεν ανήκει πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Στις Εικόνα 27β και Εικόνα 27γ παρουσιάζονται δύο παραδείγματα όπου οι σχηματικές διαφοροποιήσεις της επιφάνειας του αντικειμένου προκαλούν εσφαλμένες μετρήσεις. Στην Εικόνα 27δ παρουσιάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο η γεωμετρία του αντικειμένου εμποδίζει τον αισθητήρα του σαρωτή να φτάσει στην επιφάνεια του αντικειμένου όπου ανακλάται η δέσμη.

Το γεωμετρικό σφάλμα που εμφανίζεται στις δύο τελευταίες περιπτώσεις είναι παρεμφερές.



Εικόνα 27. Λάθη κατά τη διαδικασία τριγωνοποίησης

Ανακεφαλαιώνοντας, ο θόρυβος στην δέσμη φωτός είναι η κύρια πηγή σφαλμάτων και εμφανίζεται εξαιτίας των αντανάκλασεων της δέσμης από επιφάνειες που αποδεικνύονται τραχιές για το μήκος κύματος της δέσμης. Η τραχύτητα της επιφάνειας του αντικειμένου εισάγει τυχαίες αποκλίσεις στις διαδρομές της οπτικής πορείας (τροχιάς). Οι αποκλίσεις αυτές προκαλούν τυχαία σχήματα παραμόρφωσης στην τελική γεωμετρία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο παλμός της δέσμης φωτός που αποτυπώνεται στην εικόνα και χρησιμοποιείται αργότερα από τον σαρωτή για την ανάκτηση της τρίτης διάστασης (βάθος) εμπεριέχει το θόρυβο, ο οποίος επηρεάζει την αναγνώριση του κέντρου της δέσμης. Κάτι τέτοιο αποφέρει σφάλματα ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια είναι επίπεδη. Συνολικά μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρεις διαφορετικές πηγές θορύβου που επηρεάζουν την αποτύπωση με ακτίνες λέιζερ. Αυτές οι πηγές είναι:

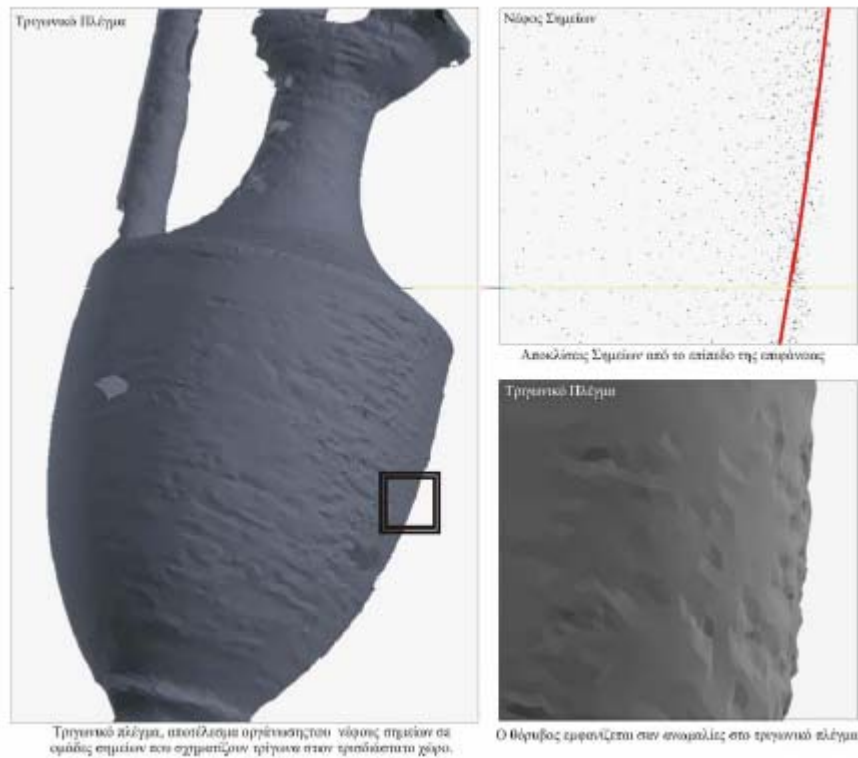
- ο ηλεκτρικός θόρυβος
- ο θόρυβος κβαντισμού
- ο θόρυβος από τη διάχυση της δέσμης φωτός

Οι δύο πρώτες πηγές θορύβου σχετίζονται με τον αισθητήρα αποτύπωσης της εικόνας που χρησιμοποιείται. Σε περιπτώσεις όπου είναι χαμηλή η ισχύς της δέσμης φωτός, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio) είναι μικρός, και έτσι, οι δύο αυτές πηγές θορύβου επηρεάζουν στο μέγιστο τα αποτελέσματα αποτύπωσης. Τέλος, ο θόρυβος από διάχυση της δέσμης σχετίζεται απόλυτα με την ίδια την φύση της ακτίνας λέιζερ.

3.4.1.4 Γεωμετρική ακρίβεια και μετάδοση του θορύβου

Η γεωμετρική ακρίβεια δεν είναι πάντα η κυρίαρχη απαίτηση στην τεκμηρίωση των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Μια μικρή απόκλιση μερικών χιλιοστών σε ένα σημείο της επιφάνειας που αποτελεί τμήμα ενός συνηθισμένου γεωμετρικού σχήματος δεν είναι κατ' ανάγκην μεγάλο πρόβλημα. Σε περιπτώσεις όπου η αποτύπωση πολύπλοκων επιφανειών είναι αναγκαία, τότε τα νέφη σημείων περιέχουν, συνήθως, θόρυβο. Ο θόρυβος παρουσιάζεται στο νέφος υπό την μορφή σημείων που ενώ θα έπρεπε να βρίσκονται πάνω στο ίδιο νοητό επίπεδο, αυτά αποκλίνουν προς τυχαίες διευθύνσεις γύρω από αυτό. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί δυσκολίες κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων αφού επιβάλουν την χρήση φίλτρων ομαλοποίησης (smoothing) και απλοποίησης (simplification). Στόχος των φίλτρων είναι να αφαιρέσουν το θόρυβο, να μειώσουν τον όγκο των δεδομένων, αλλά, ταυτόχρονα, να διατηρήσουν άθικτα τα περιθώρια των επιφανειών και τον όγκο του αντικειμένου.

Στην Εικόνα 28 παρουσιάζεται το τριγωνικό πλέγμα που δημιουργήθηκε από το μετασχηματισμό ενός νέφους σημείων. Το πολυγωνικό πλέγμα αναπαριστά τμήμα μιας οινόχους που ψηφιοποιήθηκε με σαρωτή λέιζερ⁹. Το βάθος πολλών σημείων υπολογίστηκε εσφαλμένα λόγω της ανακλαστικής επιφάνειας του αντικειμένου, της χρωματικής ποικιλίας που περιέχει η διακόσμηση του και του θορύβου από τη διάχυση της δέσμης.



Εικόνα 28. Θόρυβος σε νέφος σημείων και η μεταφορά του στο πολυγωνικό πλέγμα

Οι επιδόσεις του συγκεκριμένου συστήματος με βαθμονόμηση μεγαλύτερης ακρίβειας και μεταβλητή ρύθμιση της έντασης της δέσμης φωτός μπορούν να είναι καλύτερα αλλά στο συγκεκριμένο παράδειγμα εσκεμμένα οι ρυθμίσεις προκάλεσαν υψηλό θόρυβο, ώστε να γίνεται αισθητό το φαινόμενο της απόκλισης σημείων. Στην ίδια εικόνα προβάλλεται επίσης και τμήμα από το νέφος σημείων. Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά το νοητό επίπεδο της επιφάνειας της οινοχόης από την συγκεκριμένη οπτική γωνία. Τα σημεία που βρίσκονται έξω από αυτό το νοητό επίπεδο εμπεριέχουν θόρυβο. Κύρια πηγή θορύβου είναι η χρωματική πληροφορία της επιφάνειας του αντικειμένου η οποία επηρεάζει τις μετρήσεις του συστήματος που στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν βαθμονομημένο για την γεωμετρική αποτύπωση αντικειμένων που η επιφάνεια τους δεν φέρει χρωματικές μεταβολές. Χωρίς την χρήση αλγορίθμων ομαλοποίησης ο θόρυβος αυτός εμφανίζεται εντονότατα και στο τριγωνικό πλέγμα (αφού αυτό προήλθε από μετασχηματισμό του νέφους σημείων). Ανάλογα με το μετασχηματισμό που εφαρμόζεται ο θόρυβος γίνεται λιγότερο ή περισσότερο αισθητός. Πολλές φορές εμφανίζεται και με την μορφή γεωμετρικών ασυνεχειών στο πλέγμα.

3.5 Μέθοδοι Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς

3.5.1 Τρισδιάστατη Εκτύπωση

Τα διαθέσιμα είδη τρισδιάστατων εκτυπωτών χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους εκτυπωτές εναπόθεσης ύλης και τους εκτυπωτές λιθογραφίας.

3.5.1.1 Τρισδιάστατοι εκτυπωτές εναπόθεσης ύλης

Η λειτουργία των εκτυπωτών αυτού του είδους μπορεί να χαρακτηριστεί παρόμοια με αυτή των εκτυπωτών χάρτου εκτόξευσης μελάνης. Μια ειδική κεφαλή, η οποία μετακινείται ελεύθερα στο επίπεδο εκτύπωσης, αποθέτει τόσο το ειδικό υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το μοντέλο, όσο και το υλικό υποστήριξης, πάνω στο οποίο θα τοποθετηθεί η επόμενη στρώση. Όταν η διαδικασία εναπόθεσης ενός στρώματος τελειώσει, το δάπεδο της εκτύπωσης βυθίζεται ελάχιστα και ξεκινά η εναπόθεση νέου. Αυτή η διαδικασία εναπόθεσης στρωμάτων συνεχίζεται μέχρι να σχηματιστεί το επιθυμητό τρισδιάστατο μοντέλο. Αφού τελειώσει η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, το αντικείμενο καθαρίζεται από το υλικό υποστήριξης και είναι έτοιμο για χρήση.



Εικόνα 29. Συσκευή εκτύπωσης με εναπόθεση υλικού (δεξιά) και δείγμα εκτύπωσης (αριστερά)

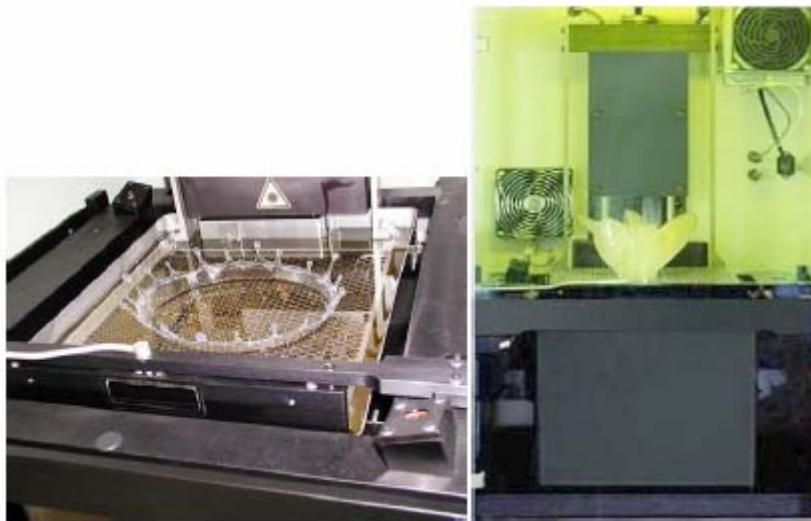
3.5.1.2 Τρισδιάστατοι εκτυπωτές λιθογραφίας

Η αρχή λειτουργίας των συσκευών στέρεο-λιθογραφίας βασίζεται στο φαινόμενο του φωτοπολυμερισμού, κατά το οποίο, όταν ένα φωτοπολυμερές υγρό εκτεθεί σε υπεριώδες φως τότε αυτό στερεοποιείται. Η λιθογραφική συσκευή τρισδιάστατης εκτύπωσης λειτουργεί ως εξής: Μια δεξαμενή γεμάτη με διάφανο φωτοπολυμερές υγρό περιέχει βυθισμένη, ελάχιστα πιο κάτω από την επιφάνεια του υγρού, μια πλατφόρμα ελεγχόμενη από τον Η/Υ, η οποία μπορεί να μετακινείται πάνω και κάτω με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Επίσης ο Η/Υ κατευθύνει με πολύ μεγάλη ακρίβεια μια ισχυρή υπεριώδη ακτίνα λέιζερ, η οποία στερεοποιεί την επιφάνεια του φωτοπολυμερές υγρού σύμφωνα με μια τομή του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου. Όταν το λέιζερ τελειώσει με τη στερεοποίηση μιας οριζόντιας τομής του τρισδιάστατου μοντέλου, τότε η πλατφόρμα κατεβαίνει για δέκατα του χιλιοστού, έτσι ώστε η στερεοποιημένη επιφάνεια να βρεθεί ελάχιστα πιο κάτω από την επιφάνεια του υγρού, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη συσκευή να προβεί στη στερεοποίηση της υπερκείμενης τομής. Για κάθε χιλιοστό του παραγόμενου αντικειμένου, αυτή

η διαδικασία επαναλαμβάνεται 5 με 10 φορές, καθιστώντας έτσι το τελικό αποτέλεσμα ιδιαίτερα λεπτομερές και την όλη διαδικασία αρκετά χρονοβόρα. Αφού η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης τελειώσει, το υλοποιημένο τρισδιάστατο μοντέλο αναδύεται από τον πυθμένα της δεξαμενής και ξεπλένεται με ένα διαλυτικό από το πολυμερές υγρό. Στη συνέχεια, αφού το αντικείμενο στραγγίσει, τοποθετείται σε ένα φούρνο υπεριώδους ακτινοβολίας για την περαιτέρω σκλήρυνσή του.

Το τελικό προϊόν της στερεολιθογραφίας είναι ένα στερεό και ανθεκτικό ημιδιαφανές πλαστικό αντικείμενο, το οποίο δε διαφέρει σχεδόν καθόλου από το τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο. Η στερεολιθογραφία θεωρείται η ακριβέστερη μέθοδος υλοποίησης τρισδιάστατων αντικειμένων, ωστόσο αποτελεί και την ακριβότερη, αφού το κόστος μιας τέτοιας μηχανής ξεπερνά κατά πολύ τα 200.000€, ενώ αντίστοιχα ακριβή είναι και η πρώτη ύλη κατασκευής των μοντέλων, με τιμή γύρω στα 200€ για κάθε λίτρο φωτοπολυμερούς. Λόγω του υψηλού τους κόστους, οι συσκευές αυτού του τύπου απευθύνονται σε μεγάλες εταιρίες, οι οποίες τις χρησιμοποιούν για εφαρμογές έρευνας και ανάπτυξης πρωτότυπων προϊόντων. Η πιο οικονομική λύση σποραδικής εκμετάλλευσης της τεχνολογίας αυτής είναι μέσω εταιριών παροχής τέτοιου είδους υπηρεσιών.

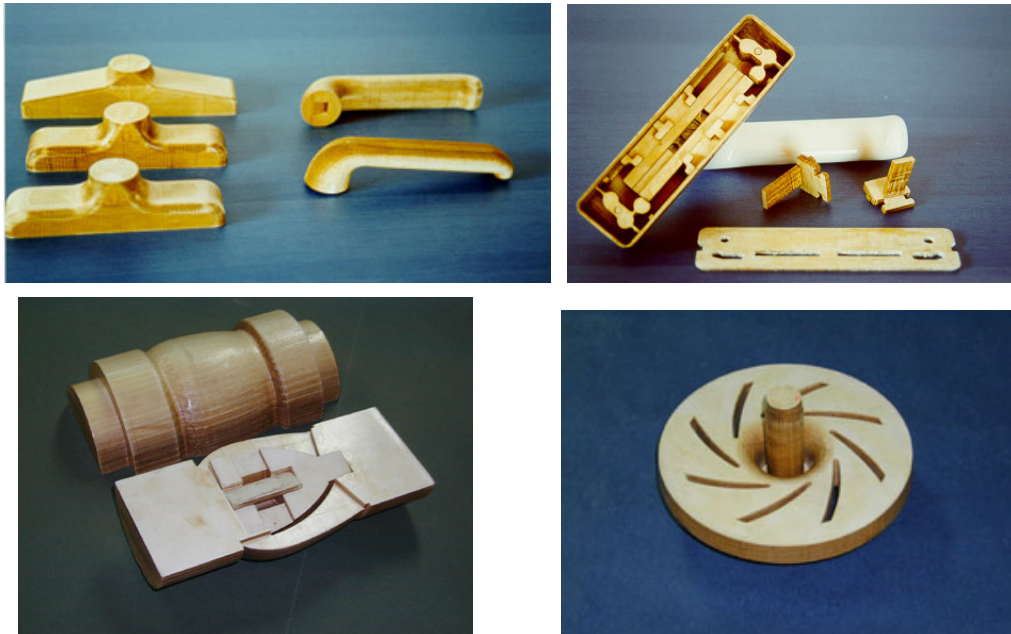
Ενδεικτικά αναφέρουμε πως το κοστολόγιο τέτοιων υπηρεσιών κυμαίνεται γύρω στα 50€ ανά ώρα εκτύπωσης, το οποίο μεταφράζεται σε 30 με 60 στρώματα στερεοποιημένου πολυμερούς.



Εικόνα 30. Συσκευές στερεολιθογραφίας με δείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

3.5.2 Μέθοδος LOM (Laminated Object Manufacturing)

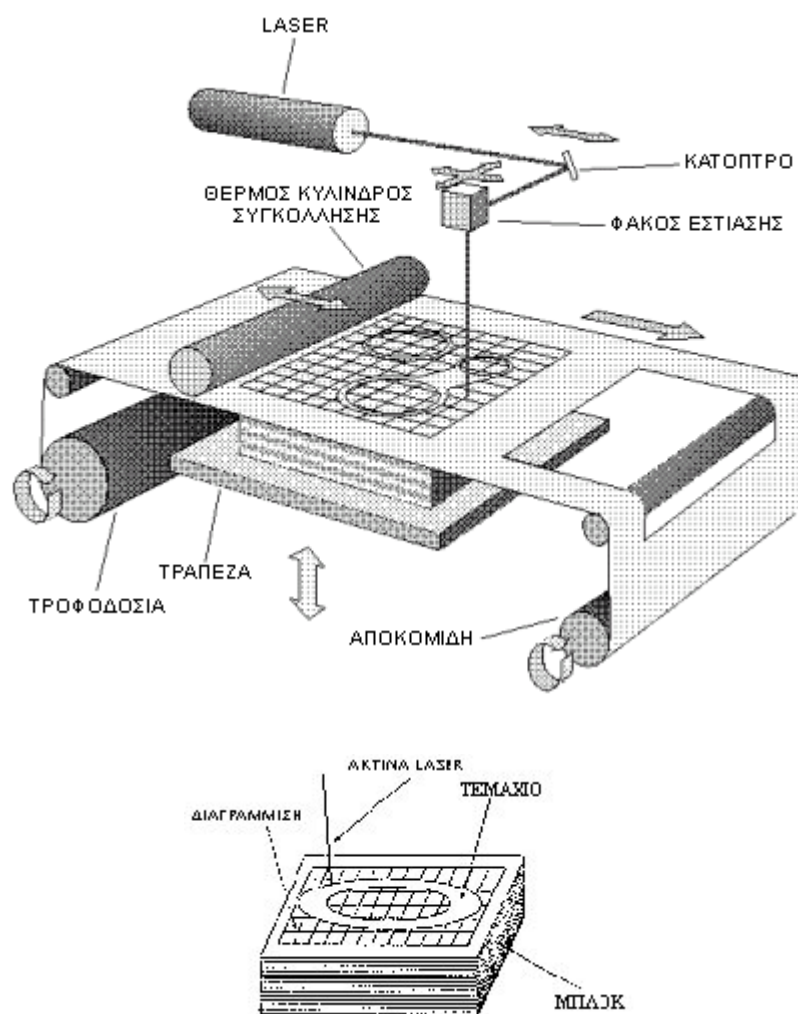
Η μέθοδος LOM (Laminated Object Manufacturing) χρησιμοποιεί στερεάς μορφής πρώτη ύλη - φύλλα χαρτιού επικαλυμμένα με θερμοσυντηκόμενη συγκολλητική ύλη (υπάρχει η δυνατότητα χρήσης και φύλλων πλαστικών ή σύνθετων υλικών) ενώ το τελικό πρωτότυπο προσομοιάζει με ξύλινο.



Πρωτότυπα τεχνολογίας LOM

Τα βασικά μέρη της διάταξης LOM αποτελούν:

- Η/Υ υπεύθυνος για τη λειτουργία της μηχανής και την επεξεργασία δεδομένων - απόδοση μορφής στρώσεων του υπό κατασκευή αντικειμένου,
- Κατακόρυφα κινούμενη τράπεζα (κατά τον Z-άξονα) επάνω στην οποία κτίζεται το πρωτότυπο,
- Θερμός κύλινδρος για την συγκόλληση των φύλλων της πρώτης ύλης μεταξύ τους,
- Σύστημα τροφοδοσίας και αποκομιδής του φύλλου της πρώτης ύλης (χαρτιού)
- Μονάδα laser CO₂
- CNC διάταξη κατεύθυνσης του ίχνους της δέσμης laser κατά το επίπεδο των στρώσεων (X-Y plotter), με σύστημα κατόπτρων - φακού, για την απόδοση των μορφών των επιπέδων τομών του κατασκευαζόμενου αντικειμένου



Διάταξη LOM

Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας LOM 1015 του Εργαστηρίου ΤΚΠ του ΕΜΠ είναι :

Τύπος	Helisys LOM 1015
Μέγιστο Μέγεθος Πρωτοτύπου	Μηκ.*Πλ.*Υψ.: 380mm*250mm*350mm
Ακρίβεια αντικειμένου	± 0.254mm (X-Y-Z)
Laser	25 Watt CO ₂
Διάμετρος ακτίνας Laser	0.254 -0.381 mm
Είδος πρώτης ύλης	Χαρτί
Πάχος φύλλων υλικού	0.1067 & 0.2023 mm
Λειτουργικό Σύστημα	Win NT 3.51
Λογισμικό	LOM Slice v.1.42

3.5.3 Τρισδιάστατη Σμίλευση

Ένας δεύτερος χαρακτηρισμός της τρισδιάστατης σμίλευσης είναι αυτός της «ρομποτικής γλυπτικής». Ο χαρακτηρισμός αυτός οφείλεται στον τρόπο υλοποίησης του τρισδιάστατου μοντέλου, το οποίο δημιουργείται από έναν ενιαίο όγκο ακατέργαστης πρώτης ύλης που μορφοποιείται από μηχανές ελεγχόμενες από Η/Υ. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή εδώ και πολλά χρόνια στη βαριά βιομηχανία ως CNC (*Computer Numerical Control – Αριθμητικός Έλεγχος με Η/Υ*) και αποτελεί την αυτοματοποίηση των παραδοσιακών εργαλειομηχανών.

Οι συσκευές τρισδιάστατης σμίλευσης αποτελούνται από ένα ηλεκτρικό τρυπάνι/τόρνο, το οποίο έχει προσαρμοστεί πάνω σε ένα ειδικό ηλεκτρομηχανικό σύστημα μετακίνησης ελεγχόμενο από Η/Υ. Ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων μετακίνησης (βαθμοί ελευθερίας) του τρυπανιού, είναι εφικτό να σμιλευτούν από απλά σχέδια δύο διαστάσεων μέχρι πολύπλοκα τρισδιάστατα γλυπτά. Επίσης το μέγεθος του παραγόμενου αντικειμένου καθορίζεται από το μήκος των αξόνων μετακίνησης της κεφαλής, το οποίο ανάλογα με τη συσκευή μπορεί να κυμαίνεται από λίγα εκατοστά μέχρι και 4 με 5 μέτρα. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας της κεφαλής σμίλευσης όπως και το εύρος μετακίνησής της, παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στις δυνατότητες σμίλευσης μιας τέτοιας μηχανής, όσο και στο κόστος απόκτησης της, το οποίο μπορεί να κυμαίνεται από λίγες χιλιάδες μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιάδες €.

Οι πιο οικονομικές μηχανές τρισδιάστατης σμίλευσης είναι αυτές που συνδυάζονται με μηχανισμούς μετακίνησης της κεφαλής σε τρεις άξονες ελευθερίας. Το εργαλείο σμίλευσης στις μηχανές αυτές, είναι σε θέση να μετακινηθεί και στους τρεις άξονες του χώρου (X,Y,Z) χωρίς όμως να μπορεί να αλλάξει προσανατολισμό, καθιστώντας έτσι την απόδοση ανάγλυφου εφικτή μόνο σε μια πλευρά του αντικειμένου. Για την πολύπλευρη απόδοση ανάγλυφου και κατασκευή πιο πολύπλοκων αντικειμένων, υπάρχουν οι πολύ ακριβότερες μηχανές σμίλευσης 5 βαθμών ελευθερίας. Η κεφαλή σμίλευσης των συσκευών αυτών, εκτός της ελεύθερης μετακίνησής της στους τρεις άξονες του χώρου, μπορεί να περιστρέφεται σε άλλους 2 άξονες (πάνω κάτω και δεξιά αριστερά). Η ελευθερία κινήσεων που προσφέρουν στο εργαλείο σμίλευσης οι συσκευές μετακίνησης πέντε βαθμών ελευθερίας, καθιστά εφικτή την πρόσβαση σε περιοχές που οι αντίστοιχες μηχανές τριών βαθμών ήταν αδύνατο να φτάσουν, επιτρέποντας έτσι την σμίλευση αρκετά πιο πολύπλοκων γεωμετρικών σχημάτων. Με την τρισδιάστατη σμίλευση είναι εφικτή η κατασκευή αντικειμένων από υλικά ποικίλης σκληρότητας και χαρακτηριστικών. Τα πιο κοινά από αυτά είναι η πολυουρεθάνη, η πολυστερίνη (φελιζόλ), το πλαστικό, το ξύλο, το αλουμίνιο, το μάρμαρο και άλλα. Ωστόσο όσο αυξάνεται η σκληρότητα του υλικού τόσο αυξάνεται και ο χρόνος διεκπεραίωσης της διαδικασίας σμίλευσης, όπως επίσης και η φθορά του εργαλείου σμίλευσης (τρυπανιού). Στην περίπτωση μαζικής παραγωγής με τη μέθοδο αυτή, η φθορά του εργαλείου σμίλευσης έχει ως επακόλουθο τη μικροσκοπική διαφοροποίηση μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου προϊόντος και στις περιπτώσεις αυτές η αλλαγή του συνιστάται σε τακτά χρονικά διαστήματα.



Εικόνα 31. Μηχανές τρισδιάστατης σμίλευσης ελεγχόμενες από Η/Υ

Πίνακας 3. Συσκευές υλοποίησης τρισδιάστατης ψηφιακής γεωμετρίας

Τύπος	Υλικό	Διαστάσεις εκτύπωσης (cm)	Κόστος	Χρήση
Εναπόθεσης υλικού	Γύψος Αμυλόκολλα Πλαστικό	20X20X25 - 50X60X40	26.000 € - 130.000 €	Για κατασκευή καλουπιών και πρωτότυπων.
Στερεο-λιθογραφίας	Φωτοπολυμερές πλαστικό	25X25X25 - 50X60X50	>200.000 €	Για κατασκευή καλουπιών και πρωτότυπων.
Τρισδιάστατης σμίλευσης	Αφρώδη υλικά, πλαστικά, ξύλο, μέταλλο, πέτρα	50X15X50 - 500X400X500	Από 6.000 – 15.000 για συσκευές σμίλευσης περιορισμένου βάθους και πολυπλοκότητας. >100.000 € για συσκευές πλήρη τρισδιάστατης σμίλευσης	Για κατασκευή καλουπιών και πρωτότυπων. Βιομηχανική παραγωγή τελικού προϊόντος



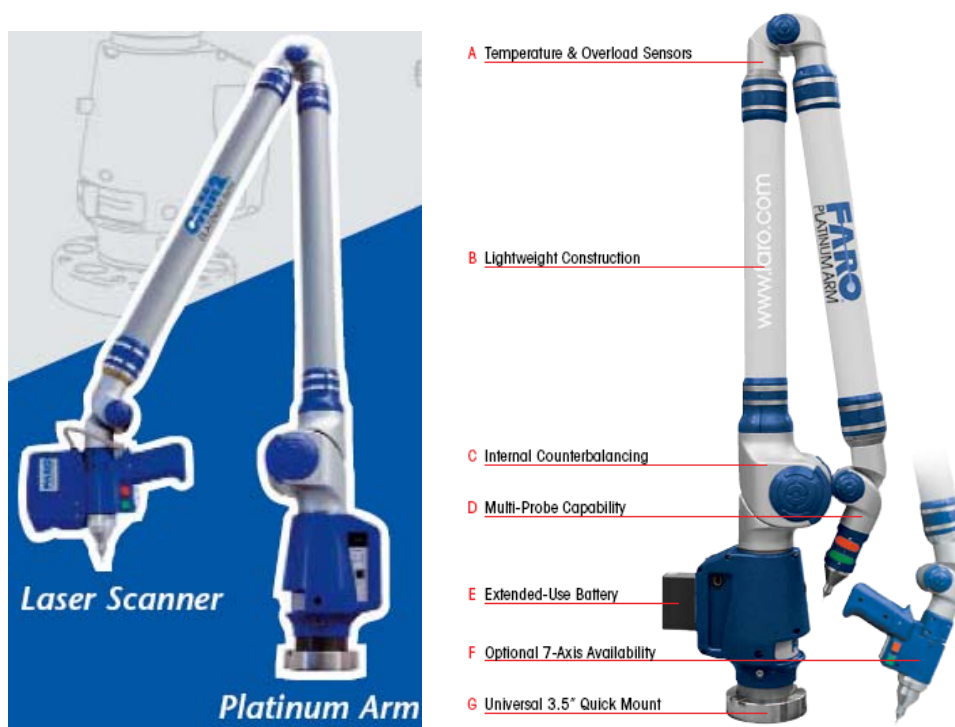
Κεφάλαιο 4 - Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς στο Εργαστήριο ΤΚΠ-Ε&ΑΣ του Τομέα ΜΚ&ΑΕ

4.1 Παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού

4.1.1 Τρισδιάστατος Σαρωτής FARO

Για την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μηχανή μέτρησης συντεταγμένων (CMM) **FARO PLATINUM ARM Model Po83D** η οποία είναι ένας χειροκίνητος φορητός μετρητικός βραχίονας κατασκευασμένος από την εταιρία FARO Technologies Inc. Το συγκεκριμένο μηχανήμα έχει 7 βαθμούς ελευθερίας και ακτίνα μέτρησης 1,2 μέτρα. Η ακρίβεια του συστήματος είναι πιστοποιημένη σύμφωνα με το πρότυπο ANSI B89 (2 Sigma Single Point Accuracy) $\pm 0.030\text{mm}$. Εκτός από την ακίδα επαφής διαθέτει και λέιζερ κάμερα προσαρτημένη στην απόληξη του βραχίονα για εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων χωρίς επαφή όπως ο ποιοτικός/ μετροτεχνικός έλεγχος, ο αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός (reverse engineering), η τρισδιάστατη μοντελοποίηση (3-D modelling) και η αντιπαραβολή νέφους σημείων με ονομαστική γεωμετρία μοντέλου CAD.

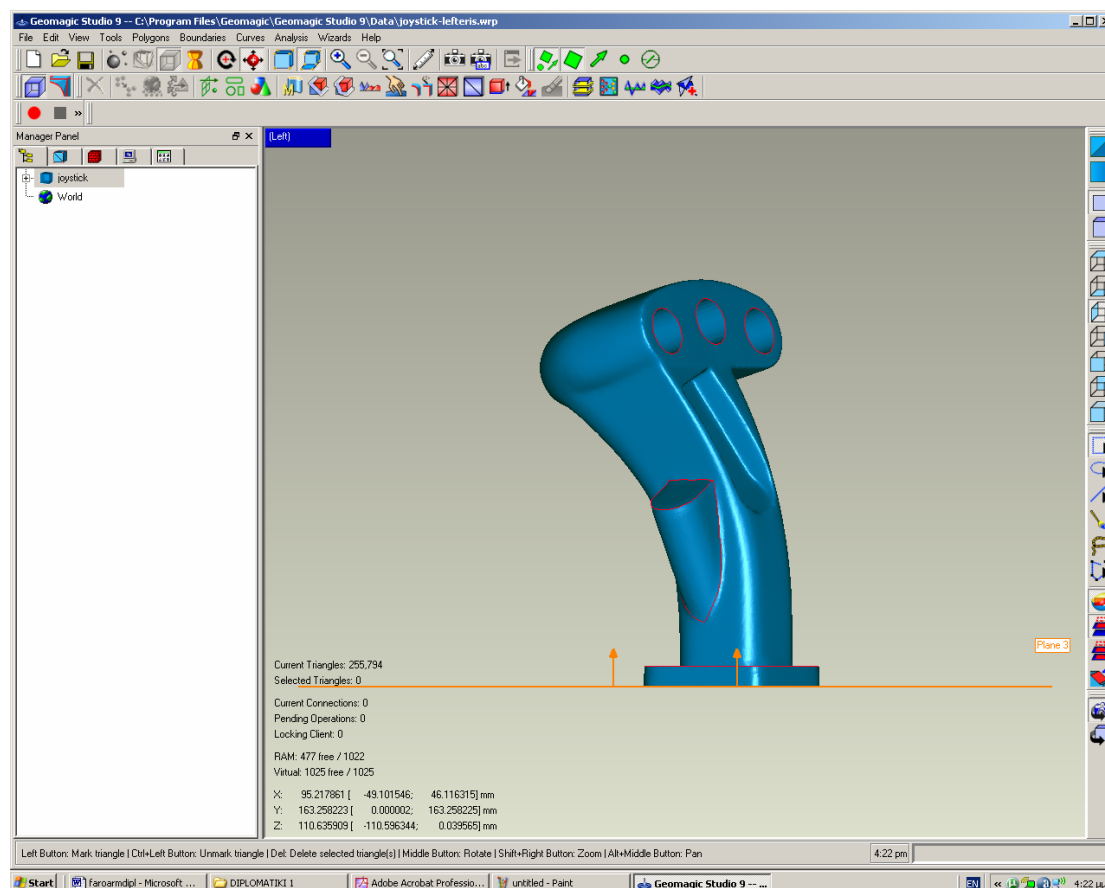
Συνδέσαμε το Faro Arm μέσω θύρας USB με έναν Η/Υ ο οποίος είχε εγκατεστημένο το σχετικό λογισμικό για τη διεκπεραίωση της εργασίας.



Εικόνα 32: Βραχίονας FARO PLATINUM ARM Model Po83D

4.1.2 Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης Geomagic Studio

Το σύστημα αυτό υποστηρίζεται από το λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης και συλλογής νέφους σημείων στερεών αντικειμένων **Geomagic Studio v.9** καθώς και μετατροπής πολύπλοκων πολυγωνικών αντικειμένων σε ακριβή NURBS μοντέλα συμβατά με τα CAD/ CAM / CAE συστήματα.

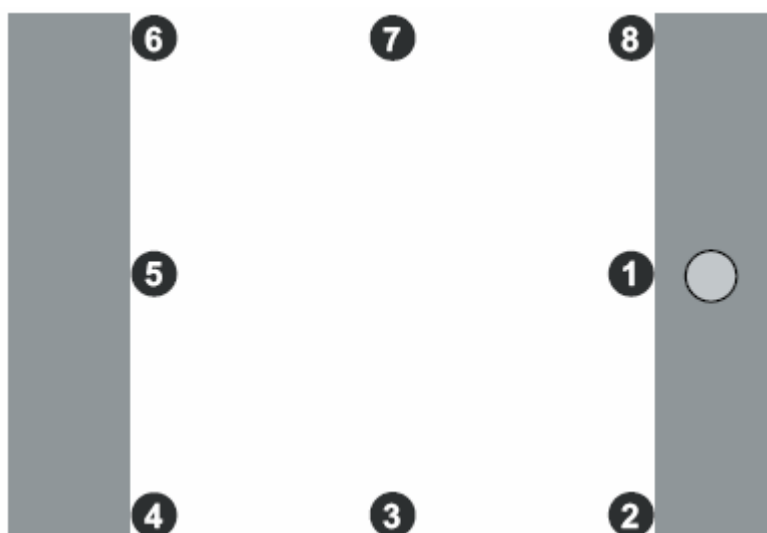


Εικόνα 33: Ενδεικτική Οθόνη του λογισμικού Geomagic Studio 9

4.2 Παρουσίαση της διαδικασίας και της εκτέλεσης των ψηφιακών αποτυπώσεων

4.2.1 Καθορισμός και Βαθμονόμηση (Calibration) εργαλείων

1. Για να καλιμπράρουμε την ακίδα επαφής, ακουμπάμε την ακίδα στην λευκή επιφάνεια στη θέση 1 όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και μετά πατάμε το κουμπί FRONT και ακολούθως επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία σε όλες τις θέσεις της επιφανείας που φαίνονται στο σχήμα.



2. Απομακρύνουμε την ακίδα επαφής από την επιφάνεια και πατάμε το κουμπί BACK.

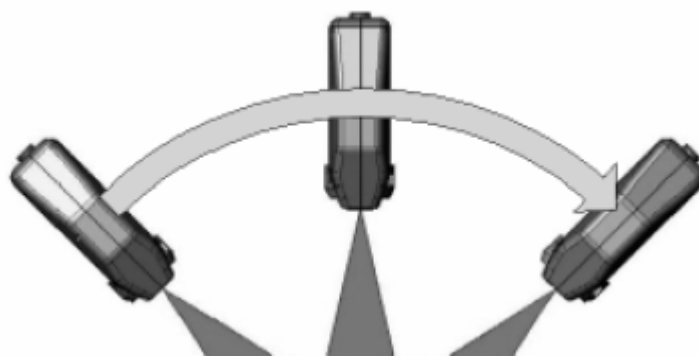
3. Αν στο παράθυρο που εμφανίζεται η ένδειξη failure (αποτυχία), κάνουμε κλικ στο κουμπί retry και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία του πρώτου βήματος. Αν όμως εμφανίζεται η ένδειξη success (επιτυχία) τότε κάνουμε κλικ στο κουμπί OK για να συνεχίσουμε.

4. Ακολούθως θα ψηφιοποιήσουμε την άσπρη επιφάνεια με την Laser Camera. Σημαδεύουμε με την ακτίνα laser το κέντρο της άσπρης επιφάνειας.

5. Μετακινούμε την camera πάνω-κάτω μέχρι να έχουμε ένδειξη ότι βρισκόμαστε στο μέσο του εύρους της (δηλαδή να είναι αναμμένα 2 πράσινα λαμπάκια)

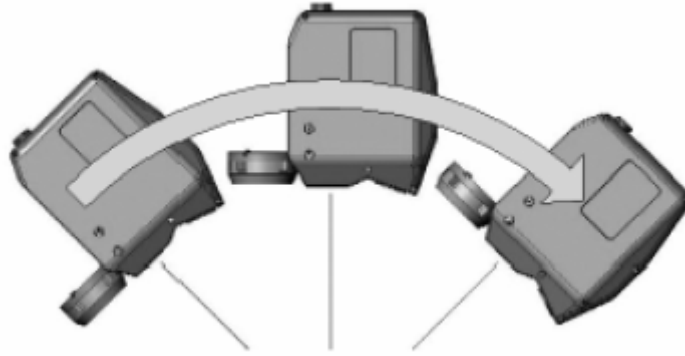


6. Ακολούθως πατάμε το κουμπί FRONT και κινούμε την κάμερα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα επικεντρώνοντας στο κέντρο της επιφάνειας.



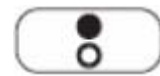
7. Πατάμε το κουμπί BACK.

8. Περιστρέφουμε την κάμερα 90 μοίρες και επαναλαμβάνουμε τα βήματα 4 και 7.

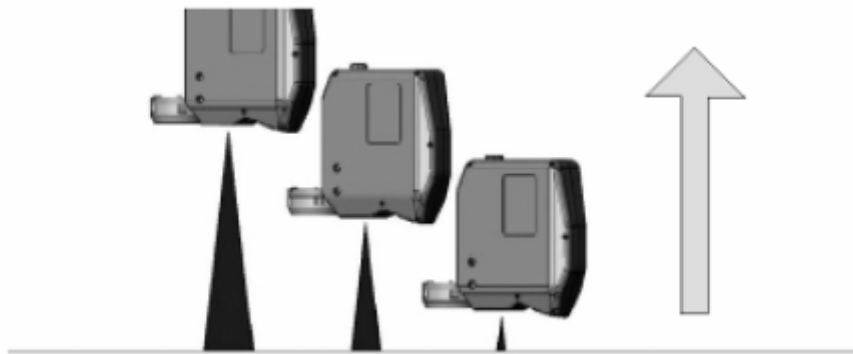


9. Εν συνεχεία θα ψηφιοποιήσουμε την λευκή επιφάνεια με την λέιζερ κάμερα. Στοχεύουμε την ακτίνα λέιζερ στο μέσο της λευκής επιφάνειας όπως κάναμε και παραπάνω.

10. Κινούμε την κάμερα μέχρι να βρεθεί η κάμερα στο κοντινό εύρος της.



11. Πιέζουμε το κουμπί FRONT και κινούμε την κάμερα μακρινό εύρος της έχοντας πάντα στο νου μας η ακτίνα να στοχεύει στο κέντρο της λευκής επιφάνειας.



12. Πατάμε το κουμπί BACK.

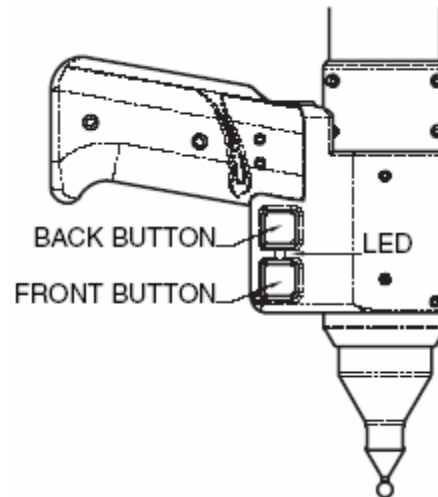
- Αν η κάμερα περνάει το τεστ τότε το Calibration Status γράφει Passed και την συγκεκριμένη ημέρα και ώρα, κάνουμε κλικ στο OK. Για να δούμε περισσότερες λεπτομέρειες κάνουμε κλικ στο View Log. Η διαδικασία καλιμπραρίσματος έχει ολοκληρωθεί.
- Αν η κάμερα δεν περνάει το τεστ τότε το Calibration Status γράφει Failed κάνουμε κλικ στο Retry και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το βήμα 1.

4.2.2 Διαδικασία σάρωσης αντικειμένου

Αρχικά τοποθετήσαμε το αντικείμενο μας σε σταθερή τράπεζα προκειμένου να αποφευχθούν οι δονήσεις και προκληθεί θόρυβος ο οποίος δεν είναι εύκολο να αφαιρεθεί.

Μέσα από το λογισμικό μας ανατρέξαμε στο Faro-Plug-in το οποίο και χρησιμοποιήσαμε για να σαρώσουμε τις ζητούμενες επιφάνειες.

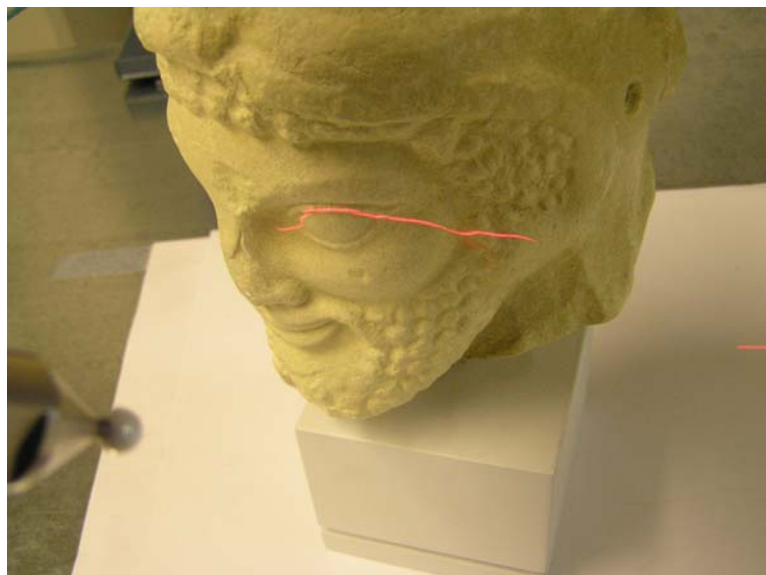
Ακολουθώντας πατώντας το πράσινο κουμπί FRONT BUTTON ξεκινήσαμε την διαδικασία σάρωσης του αντικειμένου. Κινώντας την ακτίνα λέιζερ πάνω στο αντικείμενο σαρώσαμε όλες τις επιφάνειες του αντικειμένου ενώ πατώντας το κόκκινο κουμπί BACK BUTTON σταματούσαμε προσωρινά τη σάρωση του αντικειμένου προκειμένου να μετακινούμε το αντικείμενο έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη γωνία λήψης.



Εικόνα 34: Η λέιζερ κάμερα του Faro Arm



Εικόνα 35 : Σάρωση Κυκλαδικου ειδωλίου



Εικόνα 36: Σάρωση Κεφαλής Ηρακλή



Εικόνα 37 : Σάρωση Πολίτικης Λύρας

4.2.3 Κατηγορίες Δεδομένων

Οι κατηγορίες δεδομένων που ελήφθησαν κατά τη σάρωση είναι δύο:

- Raw Data
- Ordered Data

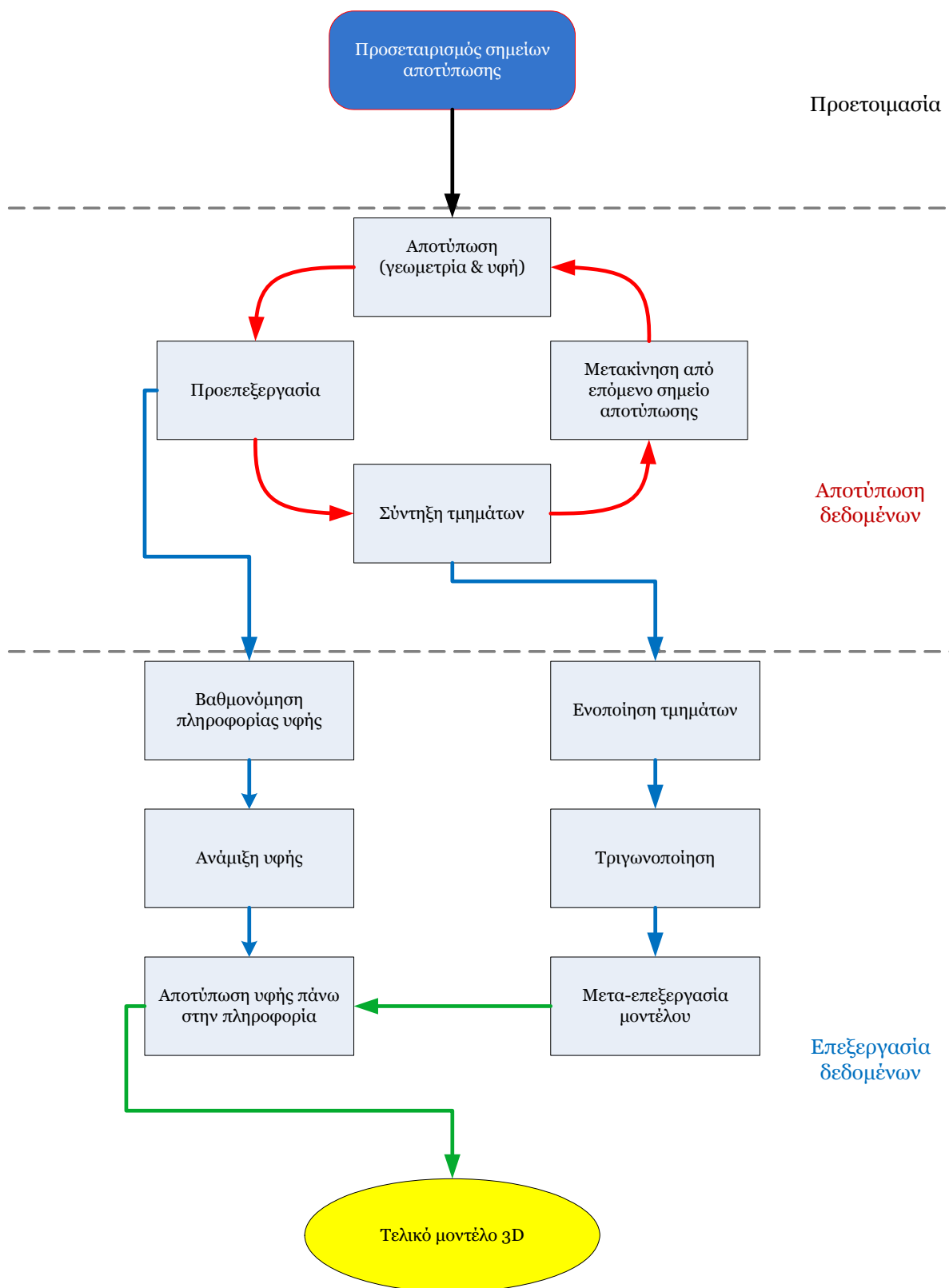
Με την πρώτη κατηγορία δεδομένων σαρώσαμε το ειδώλιο ενώ με τα δεύτερη κατηγορία δεδομένων σαρώσαμε την κεφαλή του Ηρακλή και την πολιτική λύρα, αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν για πειραματισμούς τα αποτελέσματα των οποίων παραθέτονται ακολούθως.

4.2.4 Διαδικασία ψηφιακής αποτύπωσης και δημιουργίας ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD

Η συλλογή τρισδιάστατων δεδομένων με κάποιο σύστημα σάρωσης είναι μόνο η αρχή μιας ιδιαίτερα σύνθετης διαδικασίας. Τα βήματα που ακολουθούνται, αποσκοπούν στην αποτελεσματική χρήση των δεδομένων που παρέχουν οι σαρωτές.

Στην Εικόνα 38 περιγράφεται η σειρά εργασιών από τη στιγμή της αποτύπωσης των δεδομένων έως και της τελικής οπτικής αναπαράστασης του τρισδιάστατου μοντέλου. Η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων διαχωρίζεται σε πέντε βασικά βήματα :

- προ-επεξεργασία
- ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων
- μετατροπή σε πολυγωνικό πλέγμα
- μετά-επεξεργασία
- επεξεργασία υφής



Εικόνα 38. Γενικό διάγραμμα ροής των διαδικασιών δημιουργίας 3D μοντέλου.

Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια ανάλυση όλης της διαδικασίας παραγωγής τρισδιάστατων μοντέλων με τη χρήση τρισδιάστατων σαρωτών. Αναλύονται τα ειδικά προβλήματα που παρουσιάζονται σε ψηφιοποιήσεις αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς καθώς και οι δυσκολίες της συλλογής δεδομένων. Ο διαχωρισμός που γίνεται στις διαδικασίες αλλά και η περιγραφή τους μπορεί να μην συμβαδίζει με όλες τις διαθέσιμες μεθόδους ψηφιοποίησης. Ως εκ τούτου τα βήματα της διαδικασίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ως ένα γενικευμένο διάγραμμα ροής εργασιών που μεταβάλλεται ανάλογα με την υιοθετημένη μεθοδολογία αποτύπωσης.

Συνολικά, τα βήματα μιας διαδικασίας ψηφιοποίησης είναι τα εξής:

- Σύλλογή γεωμετρικών δεδομένων
- Προ-επεξεργασία γεωμετρικής πληροφορίας
- Φιλτράρισμα του θορύβου στο νέφους σημείων
- Ομαδοποίηση και οργάνωση των δεδομένων
- Ευθυγράμμιση και ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων
- Δημιουργία πολυγωνικού πλέγματος (meshing)
- Απλοποίηση του πολυγωνικού πλέγματος
- Απαλοιφή γεωμετρικών ασυνεχειών
- Δημιουργία υφής

Τα βήματα αυτά αναπτύσσονται στο Μέρος αυτό της Εργασίας και στις παραγράφους που ακολουθούν.

Σύλλογή γεωμετρικών δεδομένων

Το πρώτο βήμα, είναι η συλλογή των γεωμετρικών δεδομένων ενός αντικειμένου με κάποιον σαρωτή. Ο τρόπος εκτέλεσης της συγκεκριμένης διαδικασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του σαρωτή αλλά και τις τεχνικές του προδιαγραφές (π.χ. ταχύτητα αποτύπωσης, φορητότητα, κ.α.).

Οποιαδήποτε και αν είναι, όμως, η μέθοδος σάρωσης που θα εφαρμοσθεί η διαδικασία καταλήγει σε μια σειρά από τμηματικές σαρώσεις. Οι πολλαπλές σαρώσεις οφείλονται στο γεγονός ότι τα περισσότερα συστήματα σάρωσης απαιτούν την αποτύπωση δεδομένων από διαφορετικές γωνίες, έτσι, ώστε να καλύψουν όλες τις επιφάνειες του αντικειμένου.

Συνηθισμένο φαινόμενο είναι η χρήση ενός *περιστρεφόμενου τραπεζιού*, το οποίο συνεργάζεται με το λογισμικό του σαρωτή και του επιτρέπει να γνωρίζει τις θέσεις των τμηματικών σαρώσεων. Σε κάποιες περιπτώσεις το λογισμικό του σαρωτή χειρίζεται και ένα σύνολο από φωτιστικά σώματα που σκοπό έχουν να δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες φωτισμού για την καλύτερη αποτύπωση των δεδομένων επιφανειακής υφής του αντικειμένου.

Τις περισσότερες φορές μια σάρωση περιέχει κενά λόγω αδυναμίας άμεσης οπτικής επαφής του οπτικού συστήματος του σαρωτή με συγκεκριμένες περιοχές της επιφάνειας του αντικειμένου. Συχνά όμως εμφανίζονται και τμήματα σαρώσεων με διαφορετική πυκνότητα δεδομένων. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη αλλαγής των ρυθμίσεων του σαρωτή, ώστε να αποδίδει

καλύτερα σε περιπτώσεις όπου επιβάλλεται η μεταβολή απόστασης του από το αντικείμενο. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο συνηθισμένο σε σαρωτές μεγάλου βεληνεκούς που χρησιμοποιούνται κατά κόρο στην αποτύπωση χώρων και κτηρίων. Ως εκ τούτου το πλήθος των τμηματικών σαρώσεων καθορίζει την ολοκληρωμένη και ομοιογενή αποτύπωση των δεδομένων. Ο αυτόματος καθορισμός των καλύτερων οπτικών γωνιών για ψηφιοποίηση είναι επίσης ένα δύσκολο πρόβλημα. Η απλούστερη προσέγγιση στην επίλυση αυτού του προβλήματος είναι η χειροκίνητη επιλογή οπτικών γωνιών. Η ψηφιοποίηση θα πρέπει να πραγματοποιείται έχοντας πάντα υπόψη την ελαχιστοποίηση των διαφορετικών σαρώσεων αλλά και την εξασφάλιση ύπαρξης ενός μεγάλου ποσοστού επικαλυπτόμενων σημείων ανάμεσα στις διαφορετικές σαρώσεις.

Πολλοί είναι οι λόγοι που οδηγούν στην πραγματοποίηση σάρωσης με μέγιστη δυνατή ακρίβεια στην περίπτωση εργασιών σάρωσης πολιτιστικών αντικειμένων. Ένας από αυτούς βασίζεται στην αισιόδοξη ιδέα απόκτησης καλύτερων αποτελεσμάτων από τα ίδια δεδομένα. Η αισιόδοξια κρύβεται στο γεγονός ότι καθώς στο μέλλον θα αναπτυχθούν καλύτεροι αλγόριθμοι επεξεργασίας δεν θα απαιτηθεί η επανάληψη της διαδικασίας σάρωσης.

Προ-επεξεργασία γεωμετρικής πληροφορίας

Η διαδικασία της προ-επεξεργασίας πραγματοποιείται αμέσως μετά την αποτύπωση των δεδομένων γεωμετρίας και περιλαμβάνει ένα σύνολο από μερικώς ασυσχέτιστες εργασίες. Είναι μια διαδικασία συναντούμε συχνά στα εμπορικά συστήματα ως ενσωματωμένη μέσα στη διαδικασία δημιουργίας πολυγωνικών πλεγμάτων. Ο υπολογισμός των *πινάκων καθέτων διανυσμάτων* είναι μια από αυτές, κατά την οποία χρησιμοποιείται η γεωμετρική πληροφορία της σάρωσης για να αναγνωριστεί η φορά των διανυσμάτων αυτών για κάθε σημείο. Αυτή είναι πολύ σημαντική πληροφορία, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για την ορθή οπτική αναπαράσταση του αντικειμένου, την ενοποίηση τμημάτων αλλά και την τμηματοποίηση των δεδομένων.

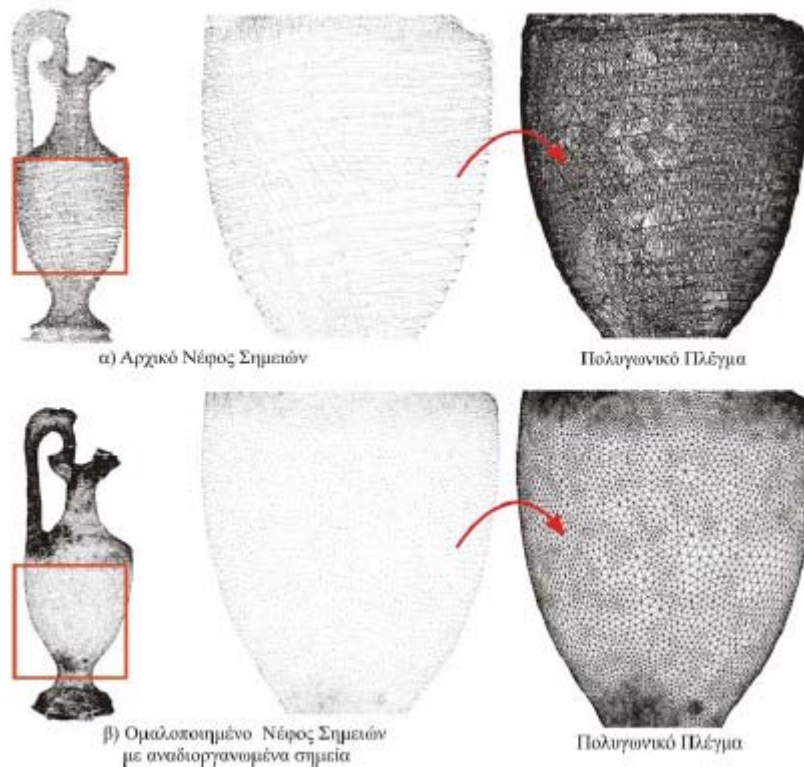
Φιλτράρισμα του θορύβου στο νέφους σημείων

Τα δεδομένα που αποκτώνται από τους τρισδιάστατους σαρωτές περιέχουν, συνήθως, σφάλματα εξαιτίας της ύπαρξης θορύβου. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τα σφάλματα αυτά. Ο θόρυβος εμφανίζεται με τη μορφή τυχαίων σημείων γύρω από την πραγματική επιφάνεια του αντικειμένου. Μια μέθοδος που επιτρέπει την απαλοιφή του θορύβου είναι ο υπολογισμός του μέσου όρου θέσης των σημείων ανάμεσα σε επικαλυπτόμενες σαρώσεις. Άλλη μια τεχνική βασίζεται στην υπό-δειγματοληψία των σημείων του νέφους που πραγματοποιείται βάσει μιας εκτίμησης της επιφάνειας του αντικειμένου. Ένα πλήθος αλγορίθμων που προέρχονται από το χώρο της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας ομαλοποιούν τα δεδομένα του νέφους σε δύο διαστάσεις. Οι απλοί γραμμικοί αλγόριθμοι (π.χ. Gaussian smoothing) έχουν το μειονέκτημα να μην μπορούν να

ξεχωρίσουν το θόρυβο από τα υψηλής συχνότητας δεδομένα. Έτσι καταλήγουν να ομαλοποιούν τις άκρες και τις λεπτομέρειες των αντικειμένων.

Γενικότερα οι μη-γραμμικοί αλγόριθμοι είναι καταλληλότεροι για αφαίρεση του θορύβου.

Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ομαλοποίησης νέφους σημείων για ένα σχετικά απλό αντικείμενο πολιτιστικής κληρονομιάς.



Εικόνα 39. Ομαλοποίηση νέφους σημείων

Ομαδοποίηση και οργάνωση των δεδομένων

Η διαχείριση του μεγάλου όγκου δεδομένων που παράγουν οι σαρωτές είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα κατά την διάρκεια της επεξεργασίας. Το μέγεθος των δεδομένων οδηγεί τα υπολογιστικά συστήματα στα όρια λειτουργίας τους, ιδιαίτερα όταν απαιτείται αλληλεπίδραση με τον χρήστη σε πραγματικό χρόνο. Η διαδικασία της ομαδοποίησης των δεδομένων αποτελεί μια λύση στο πρόβλημα. Ειδικές δομές δεδομένων (οκταδικά και δυαδικά δέντρα) οργανώνουν με τέτοιο τρόπο τα δεδομένα, ώστε η προσπέλαση τους να γίνεται έξυπνα και γρήγορα ανάλογα με την οπτική γωνία υπό την οποία εμφανίζεται το αντικείμενο. Οι δομές αυτές επιτρέπουν τη μερική εμφάνιση των δεδομένων και προσφέρουν την δυνατότητα επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο χωρίς την ανάγκη ταυτόχρονης προσπέλασης όλου του όγκου πληροφορίας.

Ευθυγράμμιση και ενοποίηση των τμηματικών σαρώσεων

Οι τμηματικές σαρώσεις πρέπει να ευθυγραμμισθούν μεταξύ τους έτσι ώστε να μπορεί να σχηματιστεί η πλήρης γεωμετρική απόδοση του αντικειμένου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να είναι εξ' ολοκλήρου

αυτοματοποιημένη εάν είναι γνωστή στο λογισμικό η θέση του σαρώτη σε κάθε τμηματική σάρωση. Όταν κάτι τέτοιο δεν ισχύει, η διαδικασία πρέπει να γίνει, αρχικά τουλάχιστον, χειροκίνητα. Ο χρήστης τοποθετεί με τη βοήθεια του λογισμικού τα τμήματα σε κάποιες θέσεις, οι οποίες θα βελτιωθούν στη συνέχεια αυτόματα από το ίδιο το λογισμικό. Ο χρήστης συνήθως ορίζει κάποια κοινά σημεία πάνω στις τμηματικές σαρώσεις, τα οποία θα χρησιμοποιήσει το λογισμικό για να τις ευθυγραμμίσει. Πάντως, τα περισσότερα συστήματα, σήμερα, βασίζονται στην ανθρώπινη παρέμβαση. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί εύχρηστα διαδραστικά εργαλεία που υποβοηθούν με τη δυνατότητα άμεσης επιλογής χαρακτηριστικών ανάμεσα στις τμηματικές σαρώσεις. Το λογισμικό βασίζεται στα σημεία που θα του δώσει ο χρήστης για να δημιουργήσει τους κατάλληλους χωρικούς μετασχηματισμούς που θα αποφέρουν την ευθυγράμμιση των τμημάτων. Η χειροκίνητη ευθυγράμμιση απαιτεί αρκετό χρόνο, ίσως τον περισσότερο από όλα τα υπόλοιπα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων. Η αυτοματοποιημένη εξακρίβωση των χαρακτηριστικών ανάμεσα στις τμηματικές σαρώσεις είναι μια επιθυμητή αλλά ταυτόχρονα δύσκολη διαδικασία. Αποτελεί, άλλωστε, ενεργό χώρο μελέτης και έρευνας.

Όταν το πλήθος των τμηματικών σαρώσεων αγγίζει τις αρκετές δεκάδες τότε η ευθυγράμμιση θα πρέπει να γίνεται σε επίπεδο ομάδων. Οι ομάδες ορίζονται συνήθως από το χρήστη. Γενικά, η ευθυγράμμιση τμηματικών σαρώσεων πραγματοποιείται ευκολότερα σε κλειστά αντικείμενα (π.χ. ένα βάζο) από ότι σε ανοικτά (π.χ. μια μαρμάρινη ανάγλυφη διακόσμηση).

Ο αλγόριθμος επαναληπτικής προσέγγισης σημείου (ICP) 21 έχει γίνει από όλους αποδεκτή ως η πιο χρήσιμη μέθοδος για ενοποίηση δεδομένων από διαφορετικά νέφη σημείων. Ο αλγόριθμος πραγματοποιείται σε δύο διακριτά βήματα: κατά το πρώτο βήμα πραγματοποιείται η αναγνώριση αντίστοιχων σημείων, ενώ κατά το δεύτερο γίνεται εκτίμηση του χωρικού μετασχηματισμού που θα ελαχιστοποιήσει την απόσταση ανάμεσα τους. Η εκτέλεση των δύο αυτών βημάτων επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό συνταίριασμα. Ο αλγόριθμος δεν έχει υψηλές απαιτήσεις υπολογιστής ισχύος και αποφέρει αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας. Βασικό του μειονέκτημα είναι η αστάθεια που παρουσιάζει σε ομαλές επιφάνειες.

Άλλες μέθοδοι ευθυγράμμισης βασίζονται σε κάποια ειδικά αντικείμενα έλεγχου (π.χ. σφαίρες, κυλίνδρους και επίπεδα). Τα αντικείμενα έλεγχου τοποθετούνται γύρω από το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση. Τα αντικείμενα έλεγχου ψηφιοποιούνται μαζί με το αντικείμενο και μπορούν να αναγνωριστούν αυτόματα από το λογισμικό, το οποίο, αναγνωρίζοντας τη θέση τους, ευθυγραμμίζει τις τμηματικές σαρώσεις. Το μειονέκτημα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πως σε κάθε σάρωση θα πρέπει να εμφανίζονται τουλάχιστον τρία από τα αντικείμενα έλεγχου.

Μετά την ευθυγράμμιση των τμηματικών σαρώσεων, σειρά έχει η συγχώνευση και ενοποίησή τους (Εικόνα 40). Είναι η πλέον απαιτητική διαδικασία σε επίπεδο πόρων για ένα υπολογιστικό σύστημα. Πολλές φορές οι

ίδιες οι εταιρείες ανάπτυξης του λογισμικού προτείνουν τον έλεγχο των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων, αφού ο όγκος των δεδομένων υπερβαίνει κατά πολύ την χωρητικότητα της μνήμης ενός απλού υπολογιστή.

Κατά τη διαδικασία ενοποίησης, το λογισμικό αναλαμβάνει να αφαιρέσει τα πλεονάζοντα σημεία που έχουν παραχθεί στα επικαλυπτόμενα τμήματα των σαρώσεων.

Η ενοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικά επίπεδα:

- Σε επίπεδο σημείων, αμέσως μετά την ευθυγράμμιση των τμημάτων: το λογισμικό εξετάζει εάν κάποιο σημείο μιας σάρωσης εμφανίζεται και σε κάποια άλλη σάρωση, και δεν το λαμβάνει στο εξής υπόψιν
 - Σε επίπεδο περιοχής-αντικειμένου: καθώς τα δεδομένα μοντελοποιούνται, τα τμήματα που αναγνωρίζονται ως κοινά συγχωνεύονται
 - Άμεση αναγνώριση: η αναγνώριση των σημείων γίνεται άμεσα πάνω σε ένα νέφος σημείων που αποτελείται από όλες τις τμηματικές σαρώσεις.
- Η μοντελοποίηση πάνω στο τρισδιάστατο νέφος σημείων είναι δύσκολη και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ



Εικόνα 40. Ενοποίηση τμηματικών σαρώσεων

Δημιουργία πολυγωνικού πλέγματος (meshing)

Η διαδικασία αυτή αποτελεί τον πιο αντιπροσωπευτικό και ευρέως διαδεδομένο αλγόριθμο οπτικής αναπαράστασης τρισδιάστατων επιφανειών. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι *τριγωνοποίησης* που έχουν ως κοινό στόχο τη μετατροπή ενός νέφους σημείων σε μια συνεχόμενη επιφάνεια από τρίγωνα (γνωστή και ως πολυγωνικό πλέγμα). Το πολυγωνικό πλέγμα αποτελεί μια πιο «διαισθητική» απόδοση του αντικειμένου, ιδιαίτερα όταν εφαρμοστεί πάνω του η πληροφορία υψής. Σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης πολυγωνικών πλεγμάτων είναι η σημαντική μείωση του όγκου δεδομένων που απαιτείται για την περιγραφή τρισδιάστατης γεωμετρίας. Το πολυγωνικό πλέγμα επιτρέπει τη διαδραστική μελέτη του τρισδιάστατου αντικείμενου για εξαγωγή διαστάσεων, ορθογραφικών φωτογραφιών, κ.α. Ορισμένοι αλγόριθμοι, υπολογίζουν το πλέγμα προοδευτικά, βασιζόμενοι στην πληροφορία που παρέχουν τα γειτονικά σημεία του νέφους. Άλλοι, πιο πολύπλοκοι, αποφασίζουν και για την ανάλυση του πλέγματος σε κάθε

περιοχή ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των επιφανειών που δημιουργούν (καμπύλες και επίπεδα).

Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι ο θόρυβος που έχει καταφέρει να διαφύγει από το αρχικό φιλτράρισμα του νέφους εμφανίζεται πιο έντονος στις επιφάνειες του τριγωνικού πλέγματος.

Απλοποίηση του πολυγωνικού πλέγματος

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η μείωση της γεωμετρικής πληροφορίας είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική διαχείριση των τρισδιάστατων μοντέλων. Η απλοποίηση της γεωμετρίας πραγματοποιείται σε περιοχές της επιφάνειας του αντικειμένου που δεν παρουσιάζουν έντονες μεταβολές. Ένας ρυθμός δειγματοληψίας της τάξης των 0,22 χιλιοστών για μια επίπεδη επιφάνεια, αποδεικνύεται μάλλον άστοχος, αφού κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, η ίδια επιφάνεια θα μπορούσε να περιγραφεί από ελάχιστα σημεία. Οι σύγχρονοι αλγόριθμοι απλοποίησης γεωμετρίας αναγνωρίζουν αυτόματα τα τμήματα ενός τρισδιάστατου μοντέλου που μπορούν να υποστούν απλοποίηση χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα του. Ειδικές δομές δεδομένων διαχωρίζουν τη γεωμετρία του μοντέλου σε τμήματα. Ο διαχωρισμός γίνεται με κριτήριο την πολυμορφία της επιφάνειας ανάλογα με την περιοχή. Η οργάνωση των δεδομένων κατά αυτό τον τρόπο συνεισφέρει στην αφαίρεση πληροφορίας ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περιοχής.

Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της ομάδας που εργάστηκε στην ψηφιοποίηση του Δαβίδ22 (Digital Michelangelo Project). Η ερευνητική ομάδα ανέπτυξε έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην τεχνική της εικονικής μνήμης και καταφέρνει να επεξεργαστεί και να απλοποιήσει μοντέλα με εντυπωσιακά αποτελέσματα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το αρχικό μοντέλο του Δαβίδ έφερε 2 δισεκατομμύρια τρίγωνα, τα οποία μειώθηκαν σε μόλις 56 εκατομμύρια. Σε κάποιες περιπτώσεις η απλοποίηση μπορεί να θεωρηθεί απλά μια προσπάθεια συμβιβασμού ανάμεσα στην ποιότητα του τρισδιάστατου μοντέλου και του όγκου δεδομένων που το περιγράφει. Με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου απλοποίησης η απώλεια πληροφορίας είναι, προφανώς, αναπόφευκτη.

Ενδιάμεσα στάδια διαδικασιών παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 41). Χαρακτηριστικό φαινόμενο είναι η εμφάνιση κενών (ασυνέχειες στο πολυγωνικό πλέγμα) στις απλοποιημένες εκδόσεις της γεωμετρίας. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στον αλγόριθμο (Δ) όπου τα κενά εμφανίζονται πολύ νωρίς (πολύ πιο πριν από τις άλλες μεθόδους).

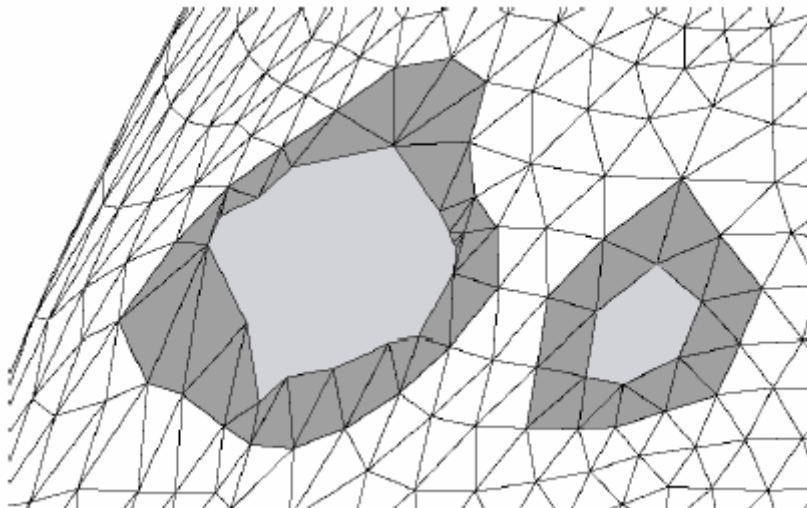
Κάποια βασικά χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια αξιολόγησης ενός αλγορίθμου απλοποίησης γεωμετρίας είναι τα παρακάτω:

- Αποτελεσματικότητα: η ικανότητα του αλγορίθμου να απλοποιεί με γρήγορους ρυθμούς σύνθετα μοντέλα

- Ποιότητα: οι προσεγγίσεις που προκύπτουν από τον αλγόριθμο διατηρούν την υψηλότερη δυνατή πιστότητα των λεπτομερειών του αρχικού μοντέλου
- Γενικότητα: η αναμενόμενη παρόμοια συμπεριφορά του αλγορίθμου κάτω από οποιεσδήποτε πιθανές μορφές επιφάνειας

Απαλοιφή γεωμετρικών ασυνεχειών

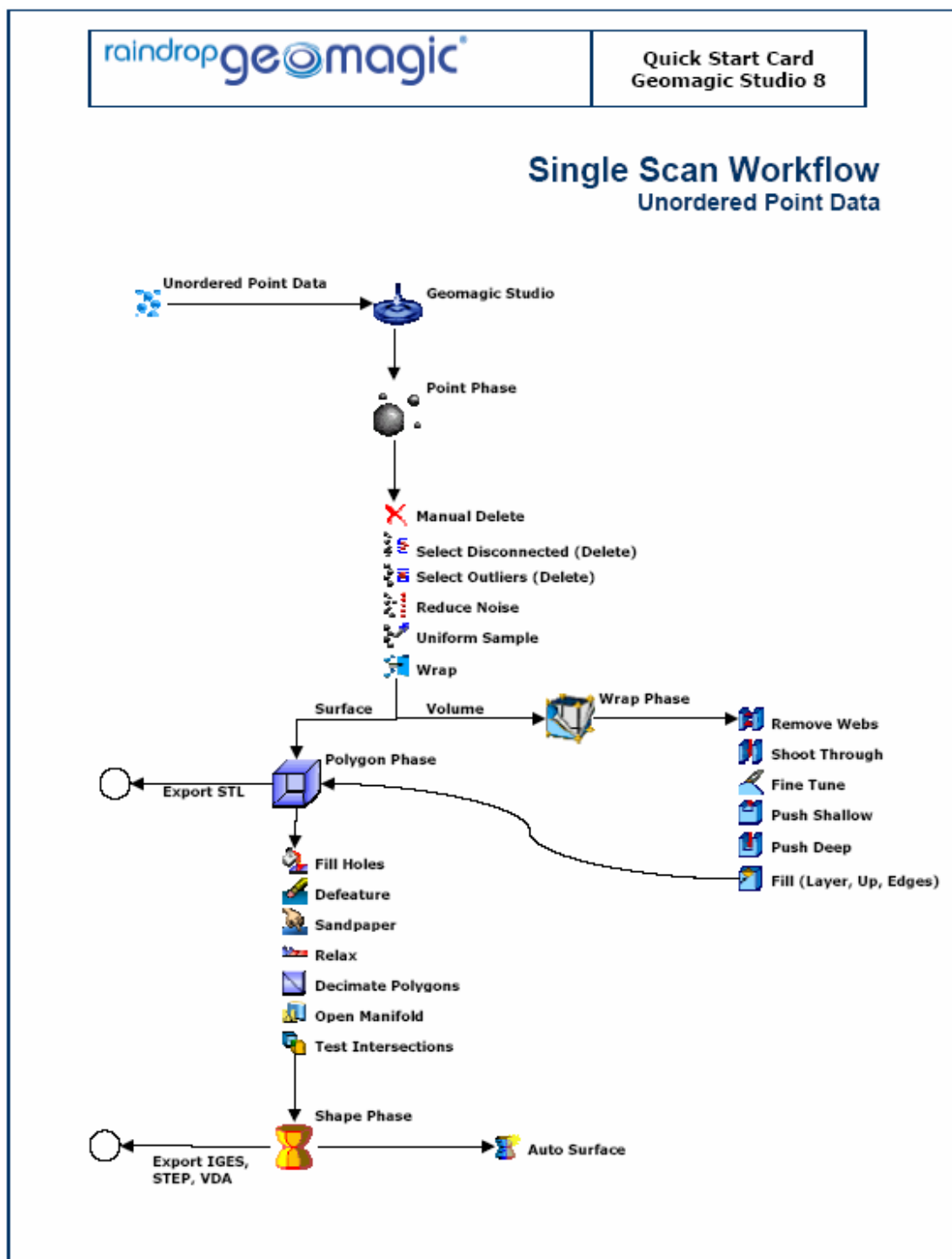
Σε ομαλές ή επίπεδες επιφάνειες η συμπλήρωση των κενών μπορεί να πραγματοποιηθεί με μια απλή διαδικασία *παρεμβολής* (interpolation). Στην βιβλιογραφία ανφέρεται μια περιγραφή διαδικασίας για την αυτόματη αναγνώριση γεωμετρικών ασυνεχειών και της απαλοιφής τους. Τα κενά αναγνωρίζονται αναλύοντας το τριγωνικό πλέγμα σε κυκλική φορά, ενώ, ταυτόχρονα, πραγματοποιείται αναζήτηση για μη κοινές πλευρές. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δε δύναται να αναγνωρίσει τα σημεία της επιφάνειας όπου πραγματικά υπάρχει ασυνέχεια. Επίσης δεν αντιλαμβάνεται τις περιοχές που πάσχουν από υπό-δειγματοληψία (αραιά τοποθετημένα τρίγωνα). Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η συμμετοχή του χρήστη. Μόλις αναγνωριστεί το κενό δημιουργούνται τα ενδιάμεσα σημεία βάσει των γειτονικών τους. Τα τρίγωνα που εμφανίζονται χρωματισμένα με γκρι σκούρο χρώμα στην Εικόνα 41 αποτελούν τα *συμφραζόμενα παρεμβολής*, πάνω στα οποία βασίζεται ο αλγόριθμος για να γεμίσει το κενό.

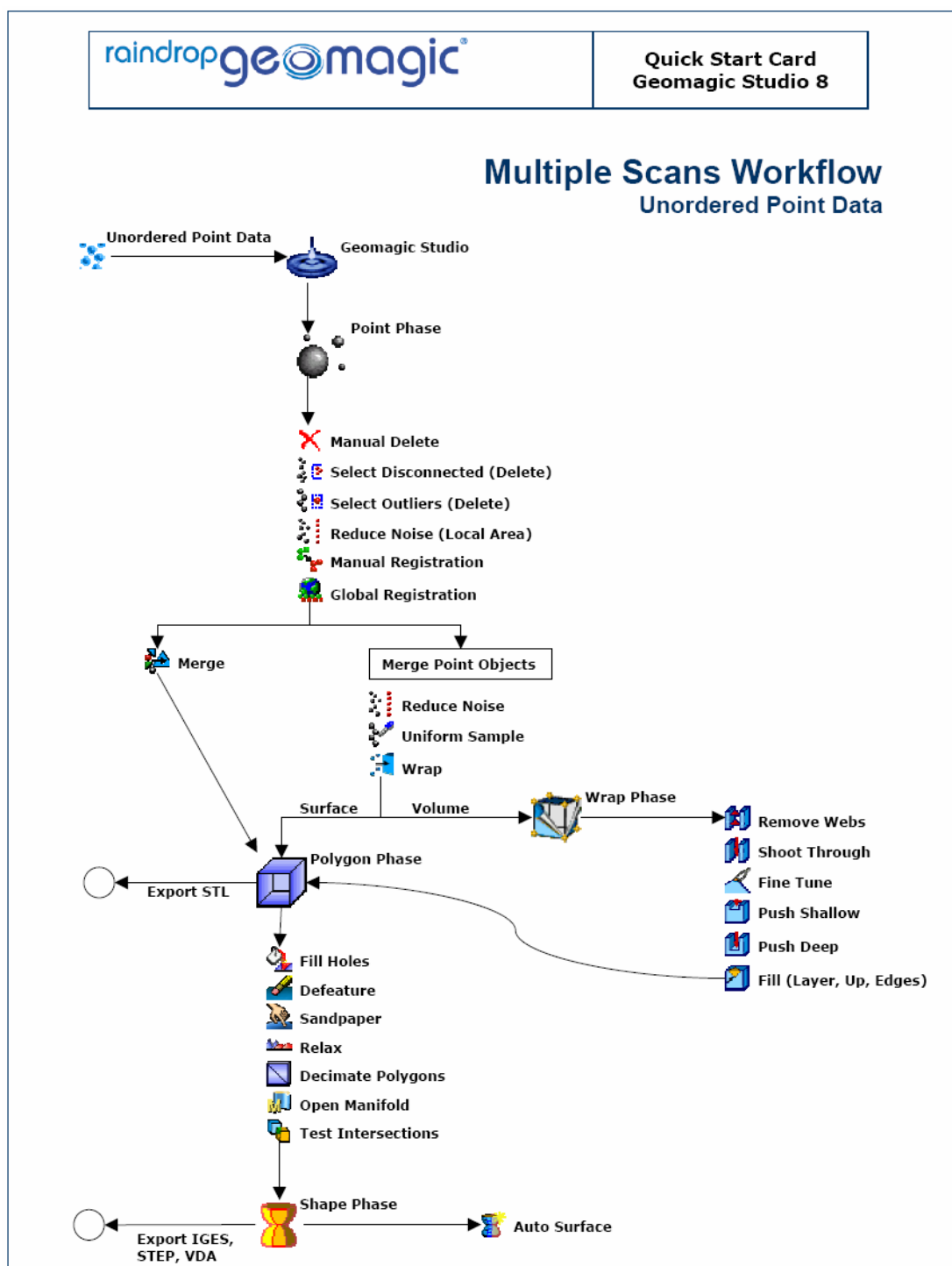


Εικόνα 41. Αναγνώριση ασυνεχειών σε τριγωνικό πλέγμα

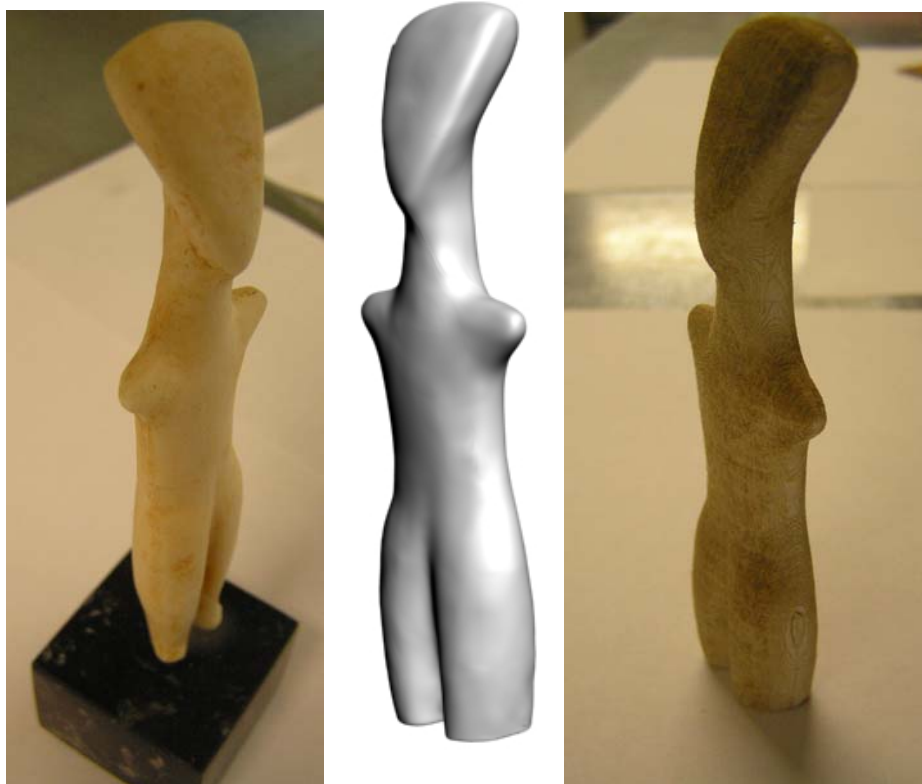
Αν και υπάρχουν αρκετές και διαφορετικές τεχνικές απαλοιφής ασυνεχειών, τα αποτελέσματά τους, τις περισσότερες φορές, δε συμβαδίζουν με την πληροφορία που φέρουν τα πραγματικά αντικείμενα. Παρόλα αυτά, όμως, αποτελούν τη μοναδική λύση αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος.

Μια εναλλακτική τεχνική για τη συμπλήρωση κενών σε νέφη σημείων χρησιμοποιεί πολύ-αρμονικές πολικές συναρτήσεις. Μπορεί και διαχειρίζεται μεγάλους όγκους δεδομένων και παράγει εντυπωσιακά αποτελέσματα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως τεχνική τμηματοποίησης και αναδιοργάνωσης νεφών σημείων.





Κεφάλαιο 5 – Εφαρμογές

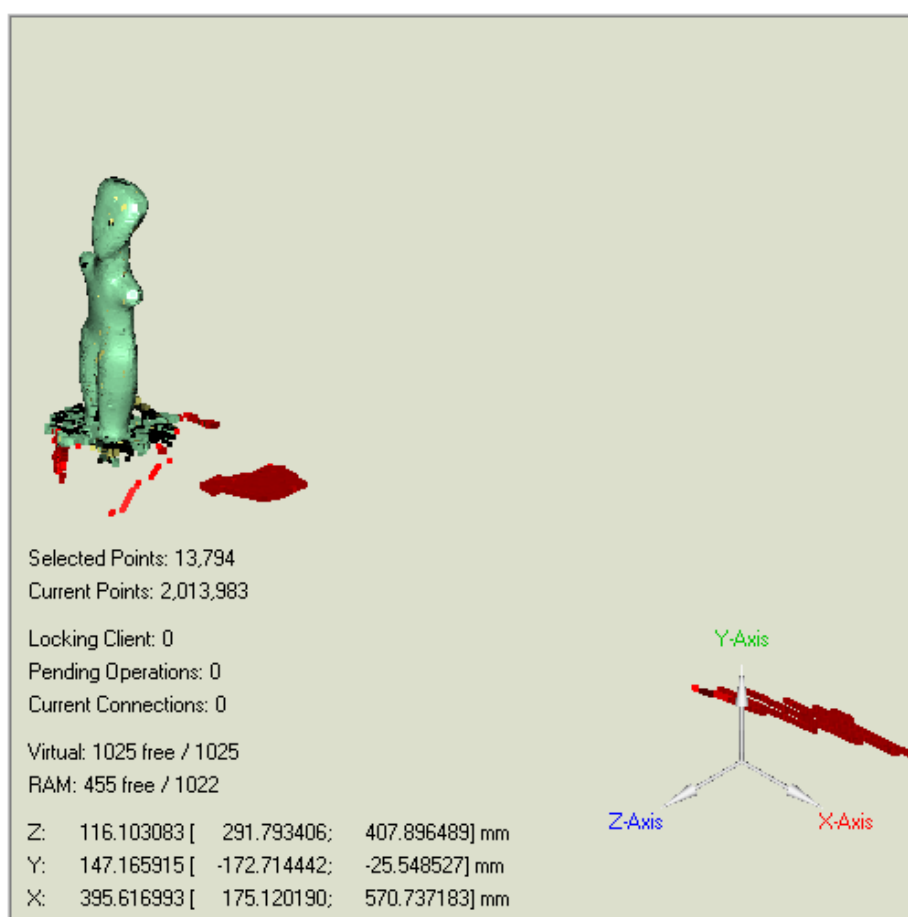


5.1 Εφαρμογή 1 - Ψηφιακή αποτύπωση μουσειακού αντιγράφου: Κυκλαδίτικο Ειδώλιο

Ανδρικό Ειδώλιο Κυκλαδικού τύπου Λούρου
Μουσείο Κυκλαδικής Τέχνης
Πρωτοκυκλαδική I-II περίοδος 2800-2700 π.Χ.
Ύψος 12 cm (ενδ.) - Αντίγραφο σε ρητίνη

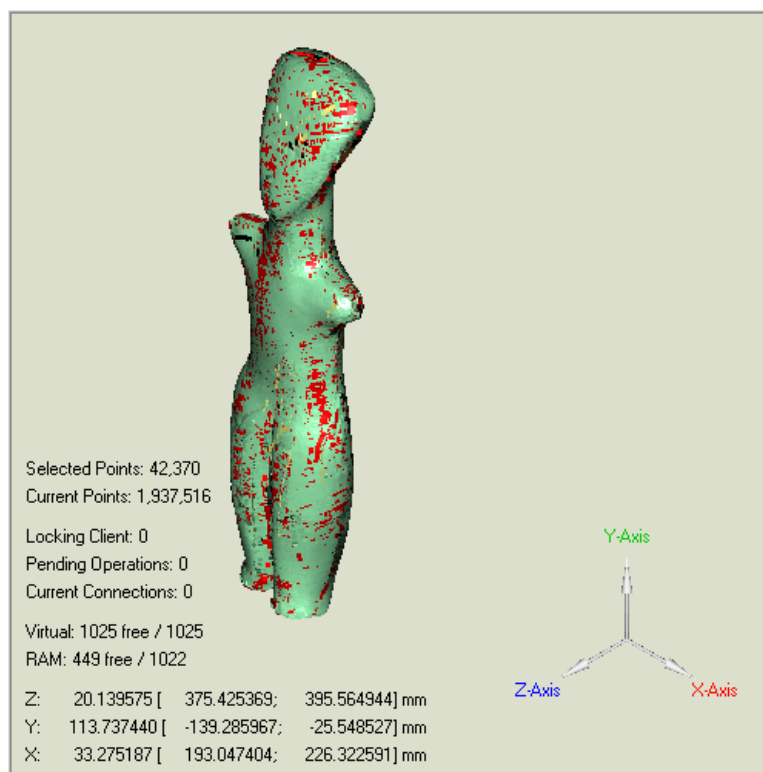


1) Στην πρώτη φάση ανοίγουμε το αρχείο `eidwlio.1_1.wtp` και παρατηρούμε ότι αποτελείται από ένα νέφος σημείων από τα οποία μεγάλο ποσοστό είναι άχρηστα τα οποία έχουν προκληθεί λόγω κακών φωτοσκιάσεων και θορύβων από δονήσεις. Έτσι λοιπόν σε αυτή τη φάση το πρώτο που πρέπει να κάνουμε είναι να διαγράψουμε τα εμφανώς άχρηστα σημεία τα οποία έχουν δημιουργηθεί από κακό χειρισμό της camera. Έτσι λοιπόν επιλέγουμε χειροκίνητα με το εργαλείο **rectangle tool**, **tade** ή **laso tool** από το δεξιό μέρος της οθόνης αυτά τα σημεία και τα διαγράφουμε πατώντας το πλήκτρο `delete` ή το κουμπί `delete` όπως φαίνεται στην εικόνα. Τα σημεία τα οποία επιλέξαμε και εν συνεχεία διαγράψαμε εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δώσουμε στο να μην διαγράψουμε τα σημεία τα οποία θα συνθέσουν τη ζητούμενη επιφάνεια (surface).

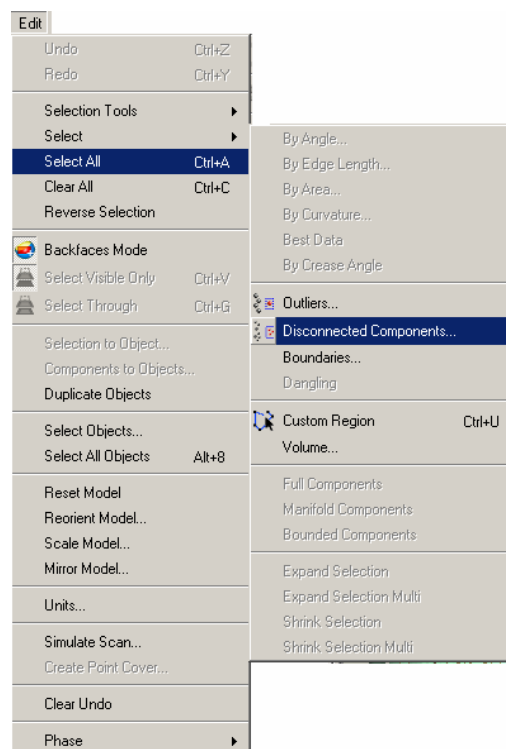


2) Ακολούθως κάνοντας κλικ στο κουμπί `select disconnected` στο πάνω μέρος της οθόνης του προγράμματος ή από το μενού **edit→select→disconnected components** επιλέγουμε τα σημεία τα οποία είναι πλήρως αποσυνδεδεμένα από το κυρίως νέφος σημείων. Από την αναδιπλούμενη λίστα (εικόνα) στο

αριστερό μέρος της οθόνης αφήνουμε τις προεπιλεγμένες επιλογές και κάνουμε κλικ στο OK. Τα σημεία που επιλέξαμε εμφανίζονται και αυτά με κόκκινο χρώμα και τα διαγράφουμε ακολουθώντας της προαναφερθείσα διαδικασία διαγραφής.



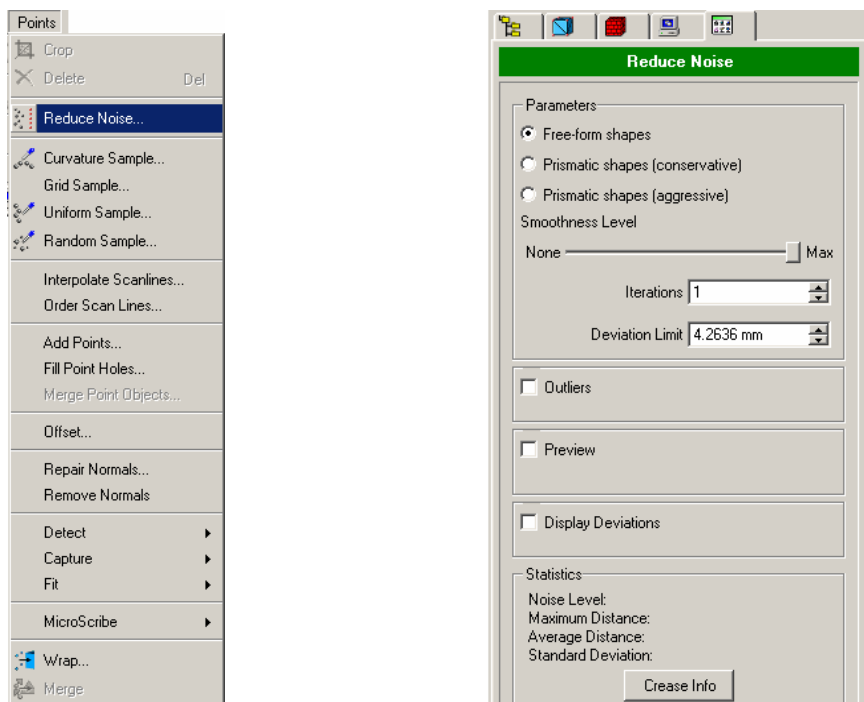
3) Μετά κάνουμε κλικ στο **κουμπί select outliers** ή από το μενού **edit→select→outliers** επιλέγουμε τα σημεία τα οποία έχουν μικρή απόκλιση από το κυρίως σώμα, ενώ στην αναδιπλούμενη λίστα κάνουμε κλικ στο OK και ακολούθως διαγράφουμε τα επιλεγμένα σημεία. (Τα δύο παραπάνω βήματα μπορεί να παρακαμφθούν ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία).



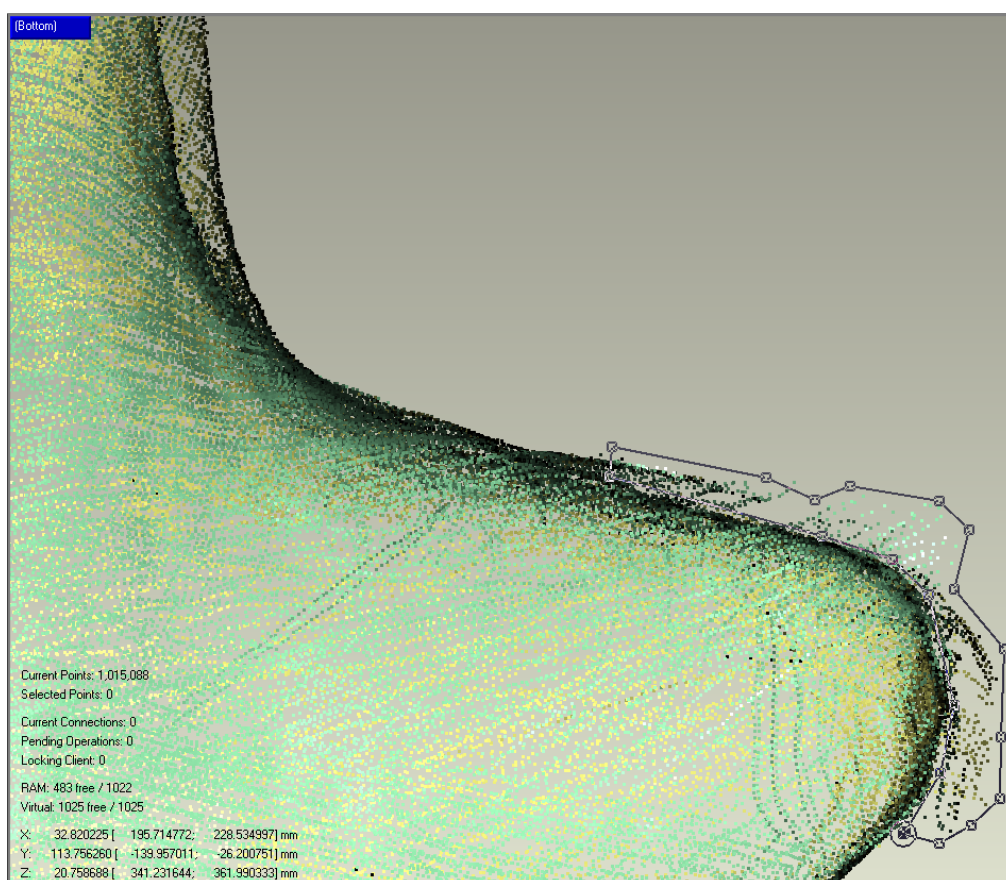
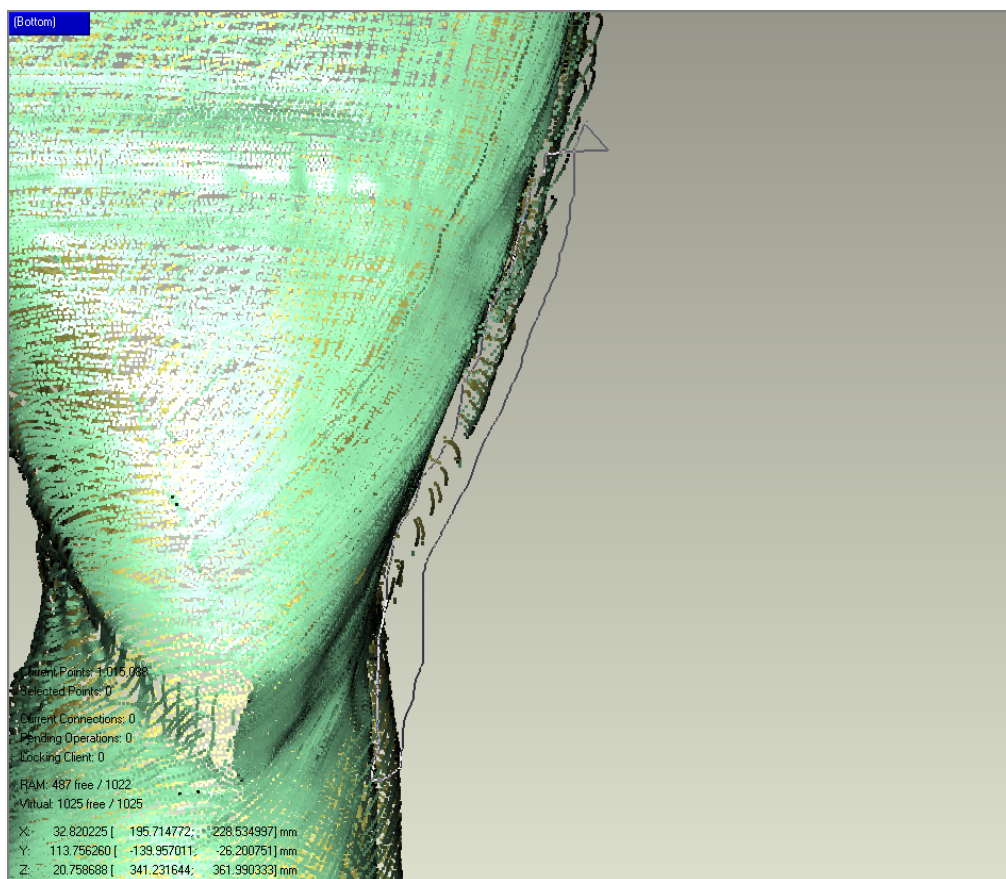
4) Από το μενού **points→reduce noise** κάνοντας κλικ στο κουμπί **reduce noise** στο πάνω μέρος της οθόνης. Στο αναδιπλούμενο αριστερό μέρος της

οθόνης επιλέγουμε στο κουτάκι

parameters to freeform shapes ενώ σέρνουμε τη μπάρα του smoothness level δεξιά μια και έχουμε αρκετό θόρυβο.

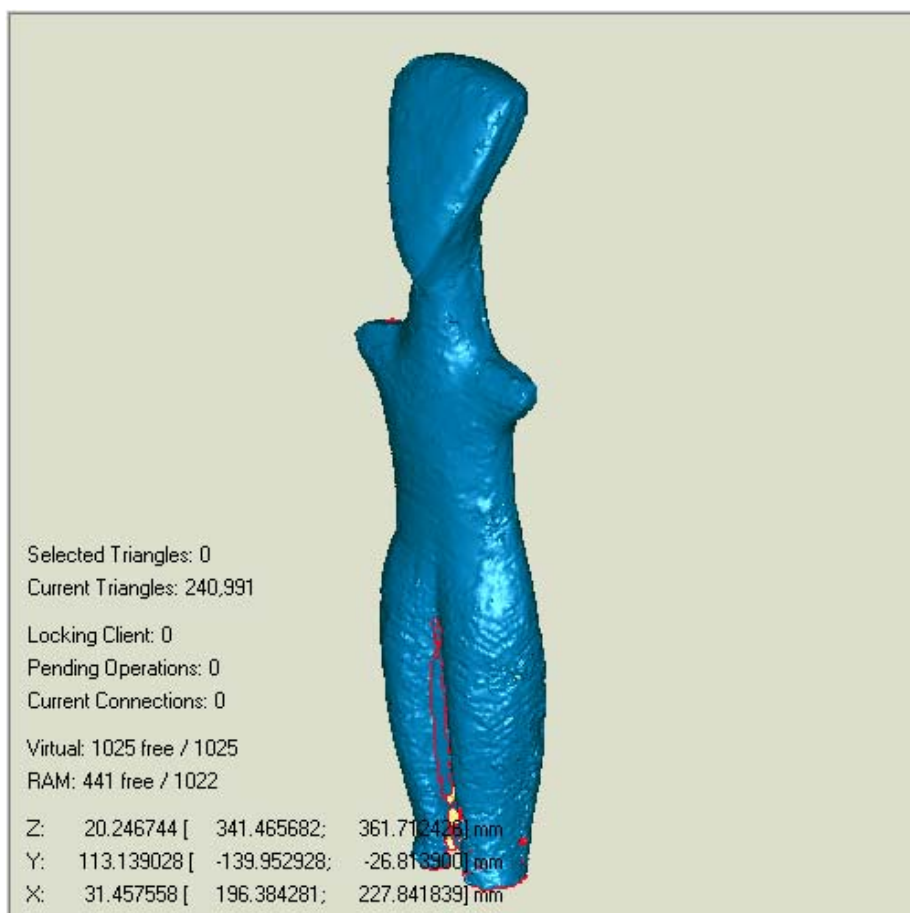
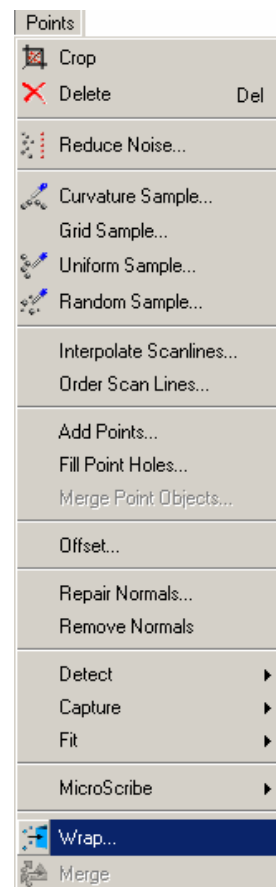
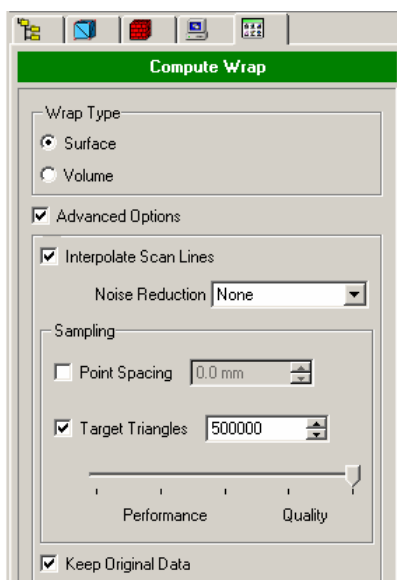


5) Επιλέγουμε χειροκίνητα τα σημεία περιφερειακά του ειδωλίου με τα εργαλεία **tool tade** ή **laso tool** ή **custom region mode** όπως φαίνεται στο σχήμα και ακολούθως διαγράφουμε τα επιλεγμένα σημεία. Για καλύτερη διευκόλυνση και για αποφυγή λαθών είναι καλό να κάνουμε zoom στις περιοχές αυξημένου θορύβου απλά γυρίζοντας το μεσαίο κουμπί του ποντικιού προς το μέρος του χρήστη και κεντράροντας τον κέρσορα στην περιοχή επιθυμητής μεγέθυνσης. Αυτή η διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα καθώς απαιτεί μεγάλη παρατηρητικότητα και συγκέντρωση. Σε περίπτωση που επιλέξουμε λάθος σημεία απλά με πατημένο το κουμπί **ctrl** και χρησιμοποιώντας τη γνωστή διαδικασία επιλογής σημείων απλά από-επιλέγουμε τα σημεία. Στο στάδιο αυτό έχει καθαριστεί πλήρως το μοντέλο μας από τα ανεπιθύμητα σημεία και είμαστε έτοιμοι να το κάνουμε επιφάνεια wrap.

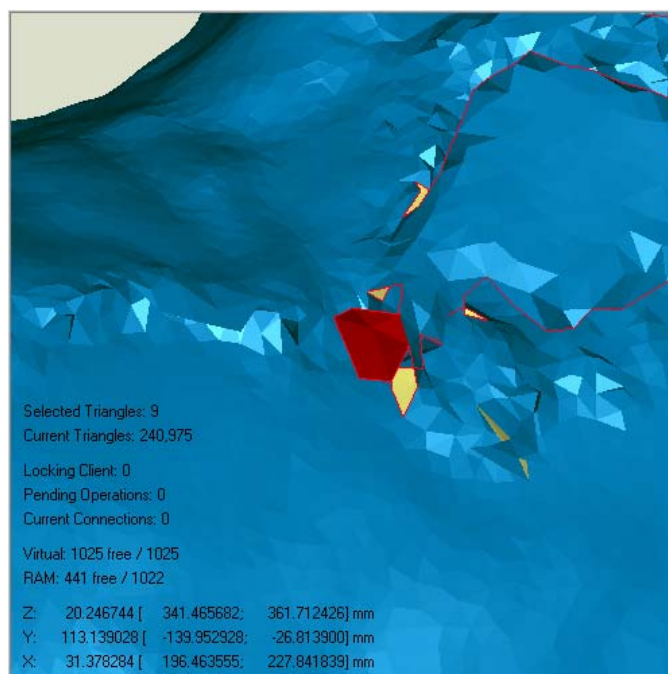
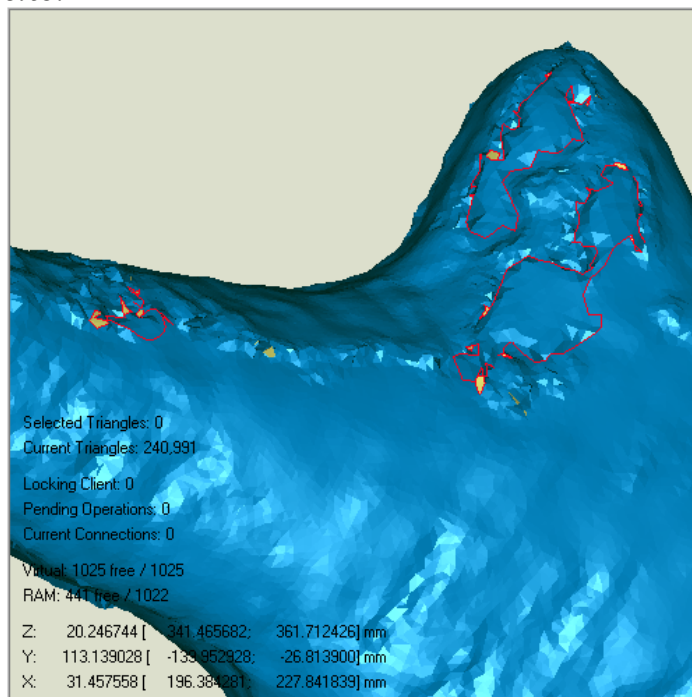




6) Από το μενού **points** → **Wrap** εμφανίζεται στο αριστερό μέρος της οθόνης ένα μενού με την ονομασία compute wrap. Στο κουτάκι wrap type επιλέγουμε surface ενώ από τα advanced options και από την αναδιπλούμενη λίστα του noise reduction επιλέγουμε None. Ακολουθώντας αυξάνουμε τον αριθμό των triangles σε 500.000 και σέρνουμε την μπάρα δεξιά μια και σκοπός μας είναι όσο το δυνατόν καλύτερη ποιότητα και λεπτομέρεια. Κάνοντας κλικ στο OK δημιουργείτε η ζητούμενη επιφάνεια surface που παρά των καθαρισμό του θορύβου και των λοιπών περιττών σημείων έχουν δημιουργηθεί επιφάνειες άχρηστες που παραμορφώνουν την γεωμετρία του μοντέλου μας και είναι εμφανείς με μία κόκκινη γραμμή (boundary) καθώς και μικρές οπές τις οπές πρέπει να κλείσουμε. Επίσης εμφανίζεται μια γενικότερη ανωμαλία στην επιφάνεια.

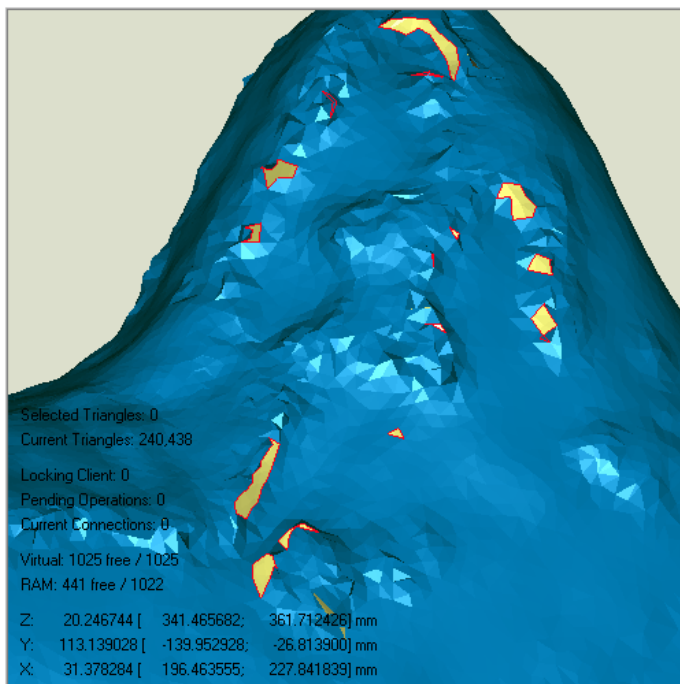


7) Για τους λόγους που αναφέραμε θα πρέπει να καθαρίσουμε το μοντέλο μας με το δυνατόν λιγότερες απώλειες. Έτσι λοιπόν επιλέγουμε τις άχρηστες επιφάνειες με τα γνωστά εργαλεία ή με το **paintbrush tool** που βολεύει καλύτερα στην επιλογή των ζητούμενων επιφανειών και τις διαγράφουμε με τον γνωστό τρόπο.

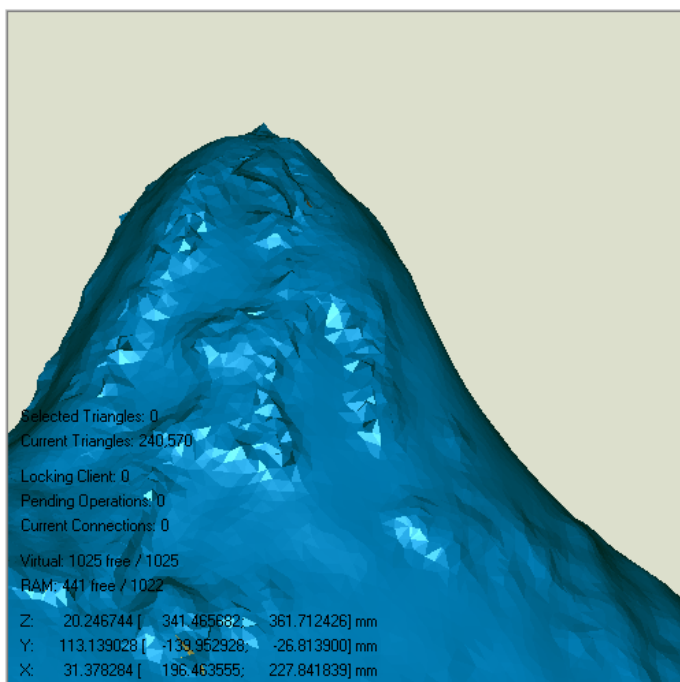
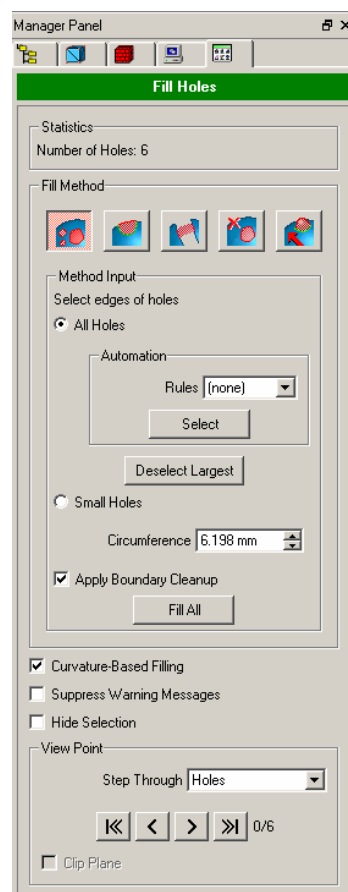




8) Ακολουθώντας από το μενού **polygons→fill holes** και με προεπιλεγμένες τις παραμέτρους του κάνουμε κλικ σε κάθε οπή έτσι ώστε να κλείσει και εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα. Η διαδικασία αυτή γίνεται περισσότερο αυτοματοποιημένη αφού κλείσουμε μια οπή κάνουμε κλικ στο δεξί βελάκι(next) στο κάτω μέρος του μενού που εμφανίζεται αριστερά μας.



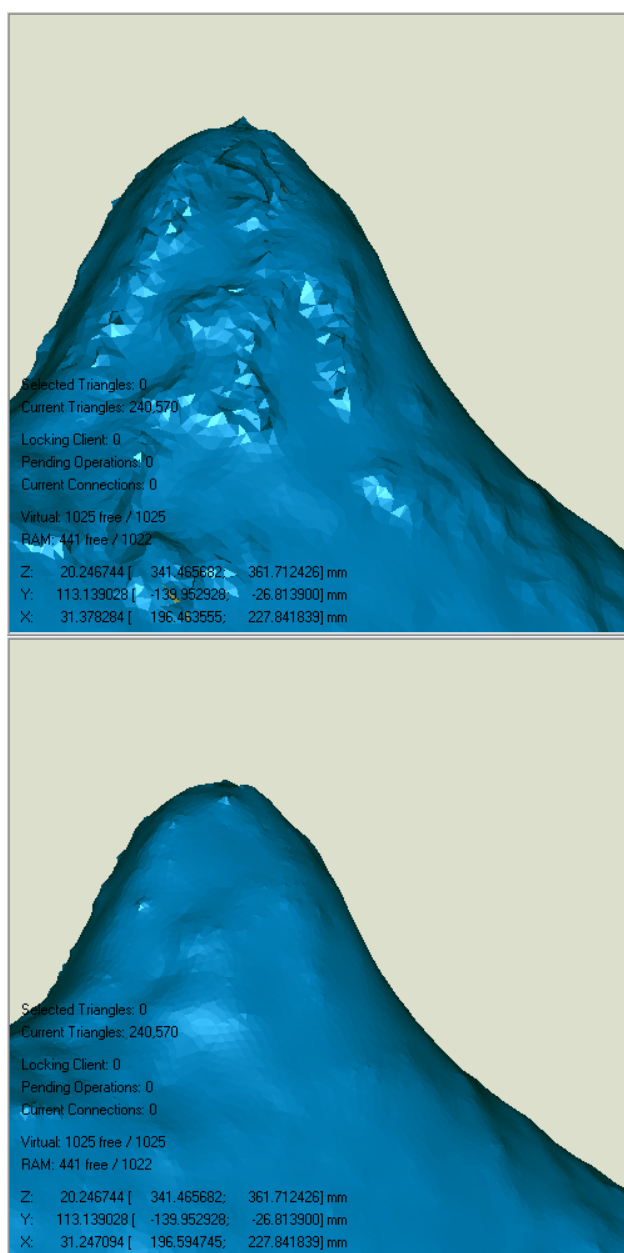
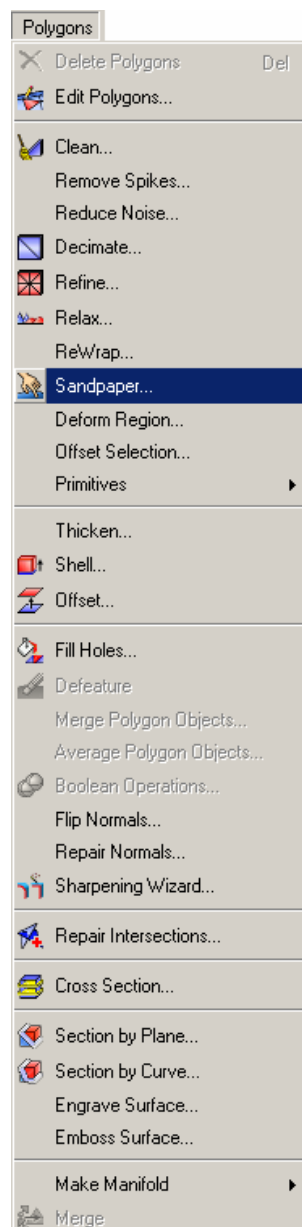
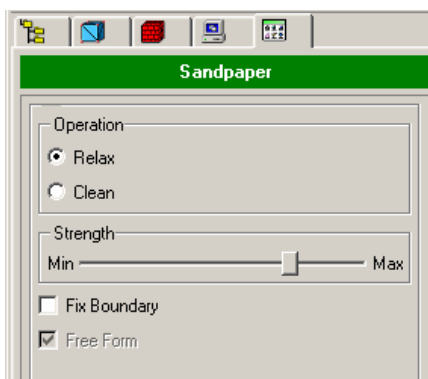
ΠΡΙΝ



META

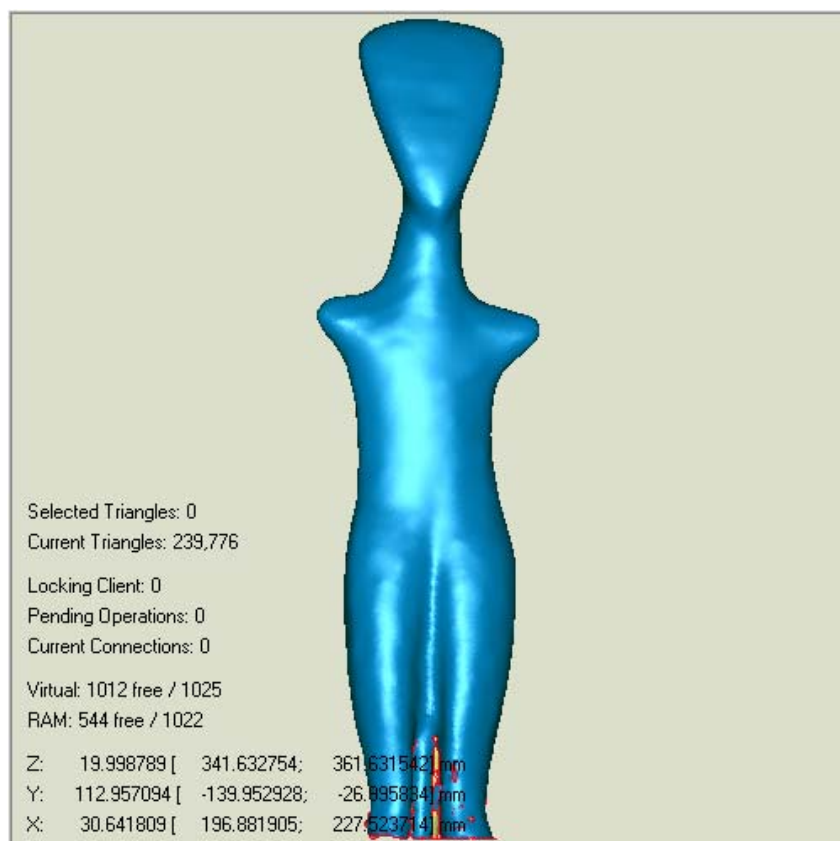
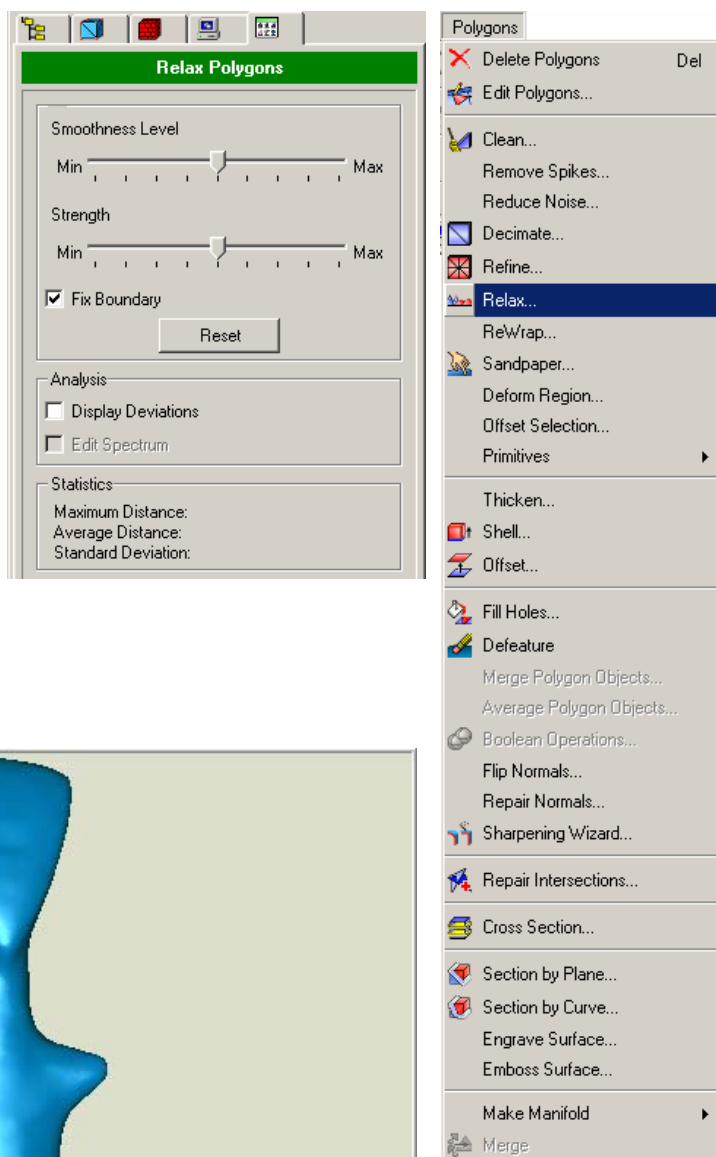


9) Αφού κλείσουμε όλες τις οπές εκτός από αυτές που είναι στο κάτω μέρος των ποδιών επιλέγοντας το εργαλείο sandpaper το οποίο εξομοιώνει ένα γυαλόχαρτο λειαίνουμε τα εξογκώματα και τις διάφορες ανωμαλίες του μοντέλου μας όπως φαίνεται και στο σχήμα, επιλέγοντας το strength αναλόγως την περίπτωση και κάνουμε κλικ στο OK.

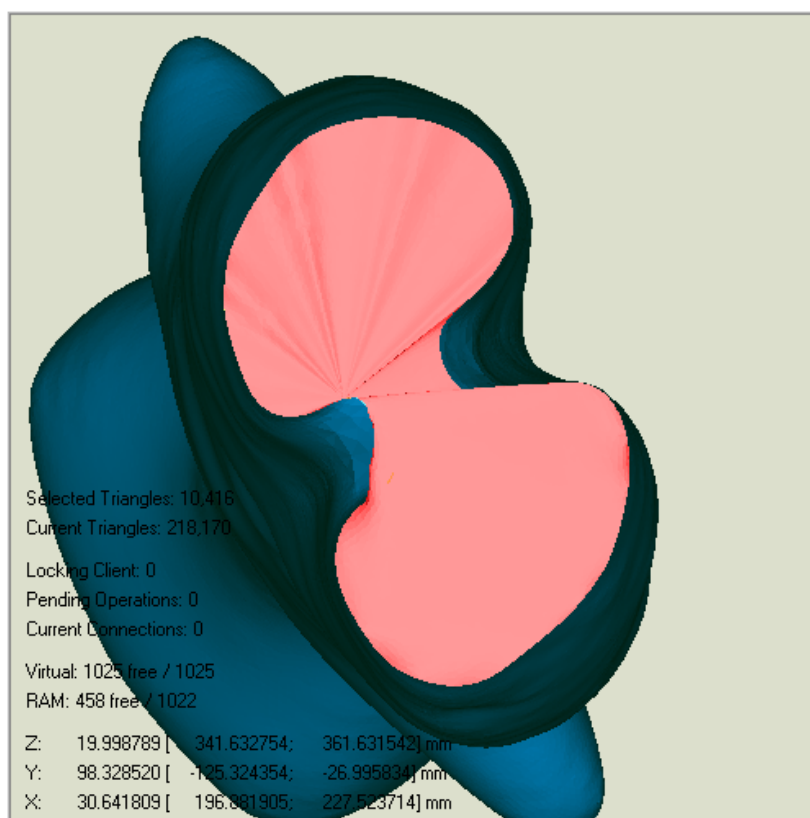
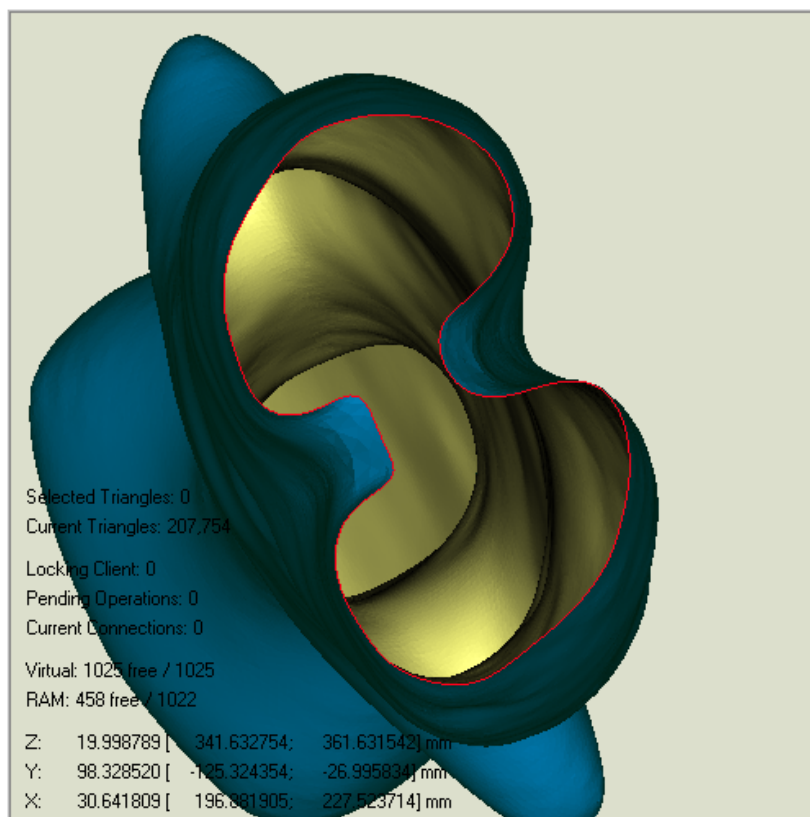




10) Ακολουθώντας από το μενού **polygons→relax** και μετακινώντας τις μπάρες δεξιά ή αριστερά ανάλογα με την προτίμησή μας κάνουμε κλικ στο Apply και ακολουθώντας στο OK.

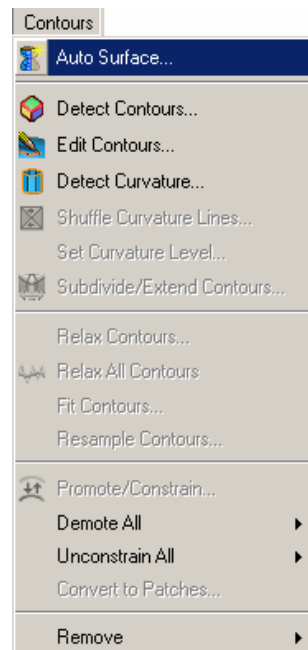


11) Μετά διαγράφουμε τα προβληματικά πόδια και κλείνουμε την κάτω σπή ακολουθώντας την γνωστή διαδικασία.

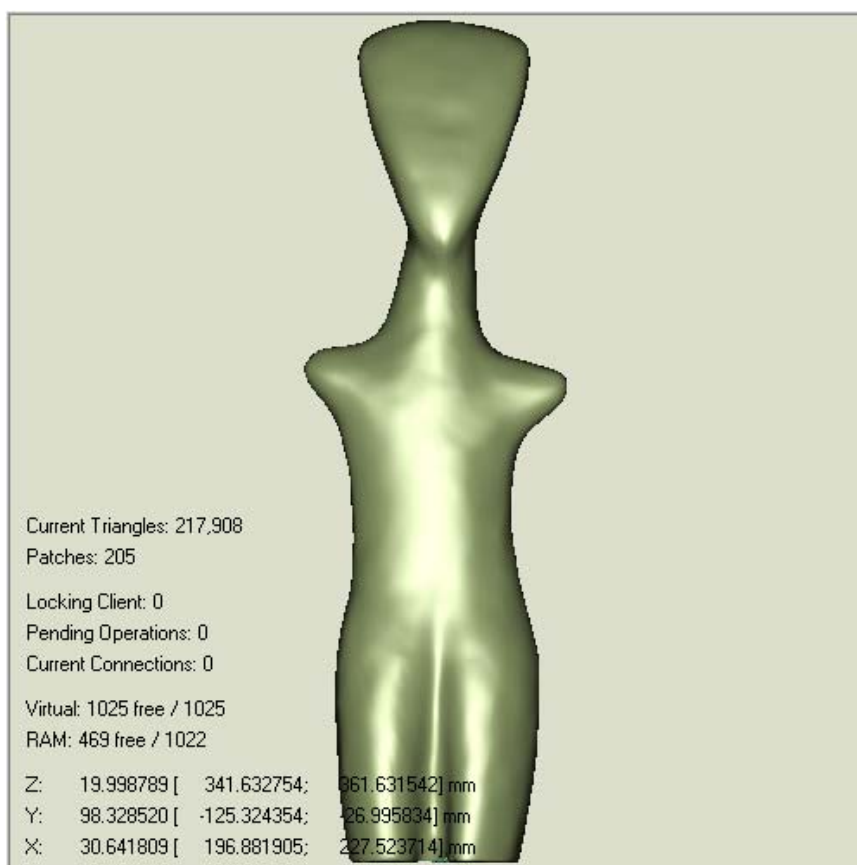
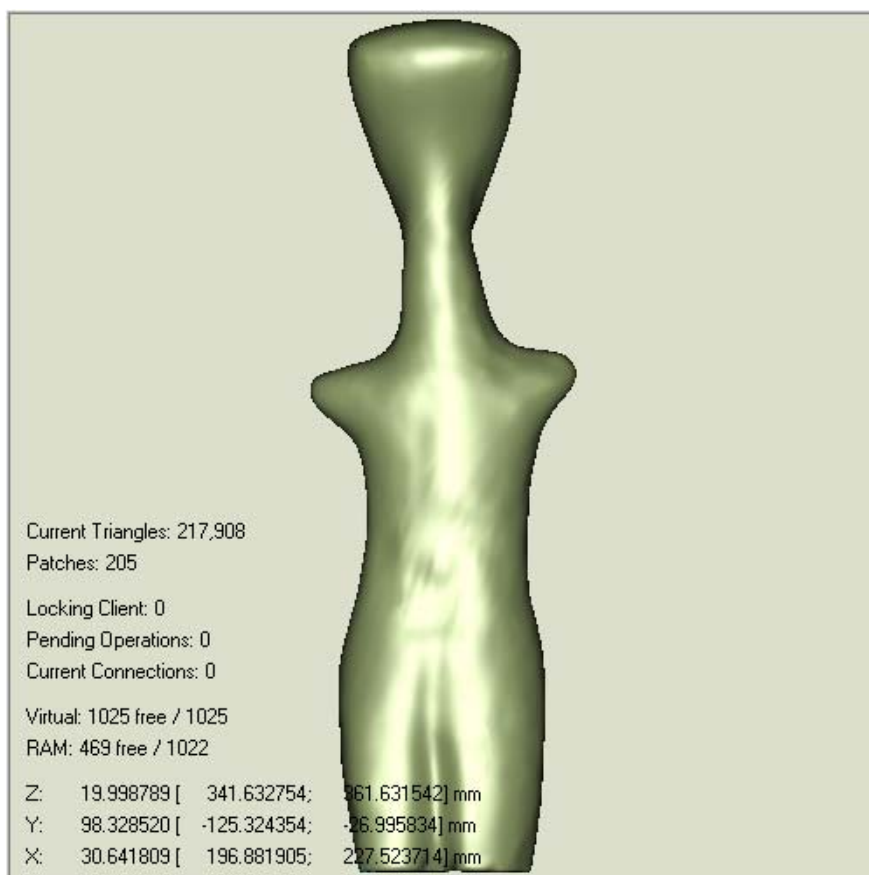


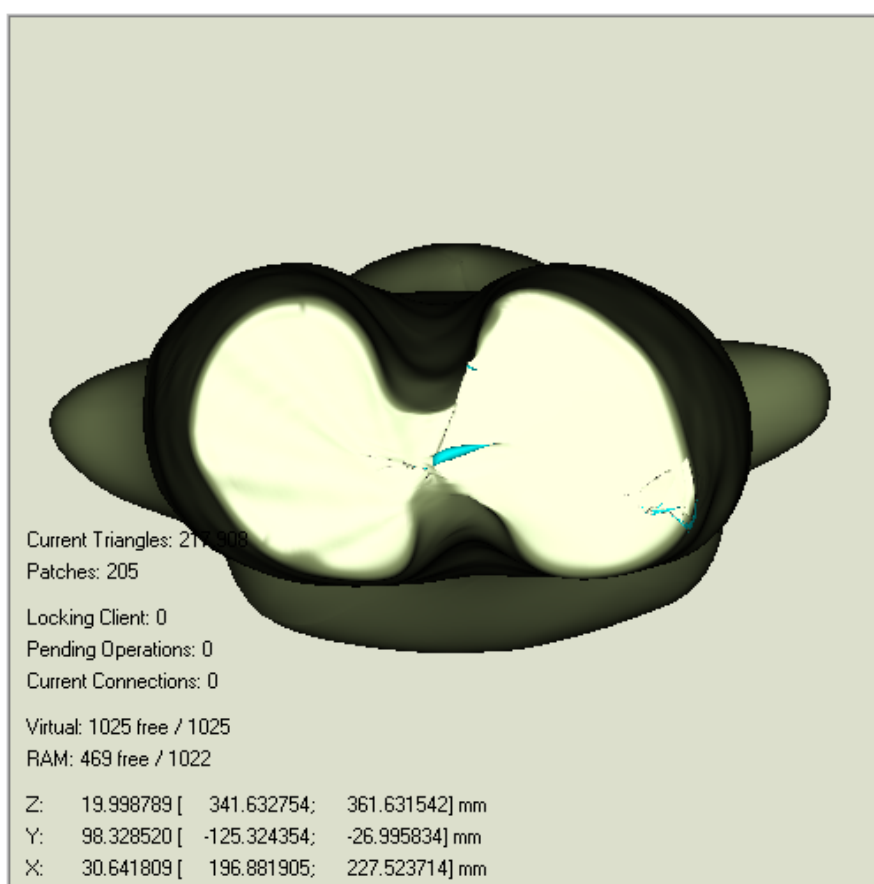
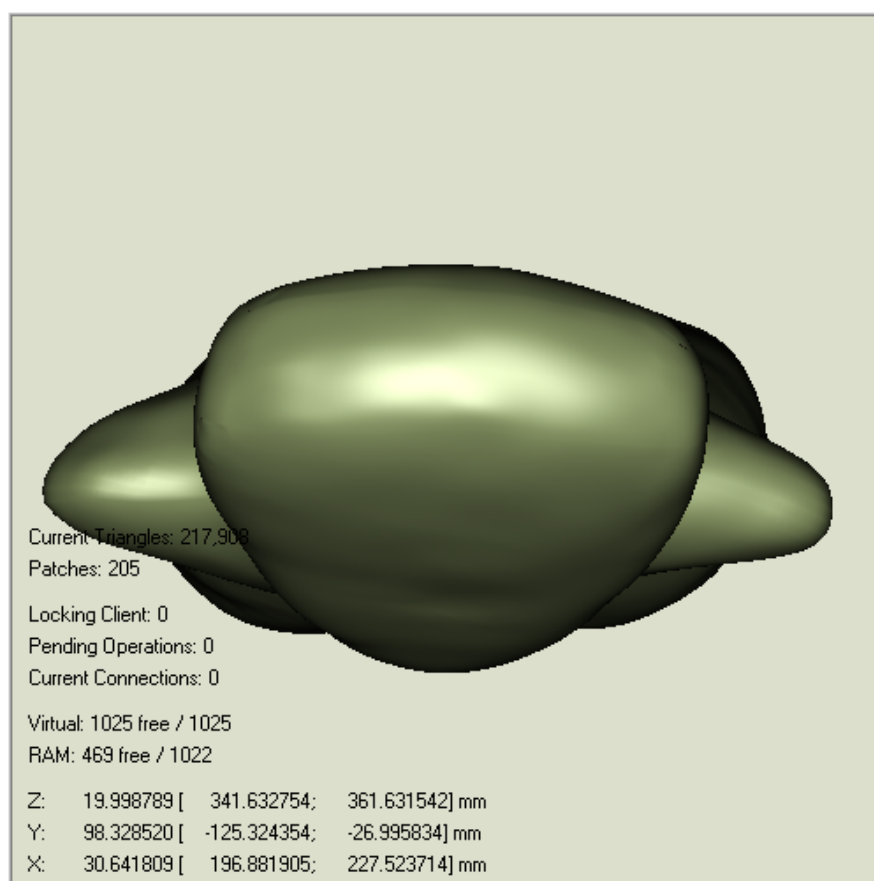


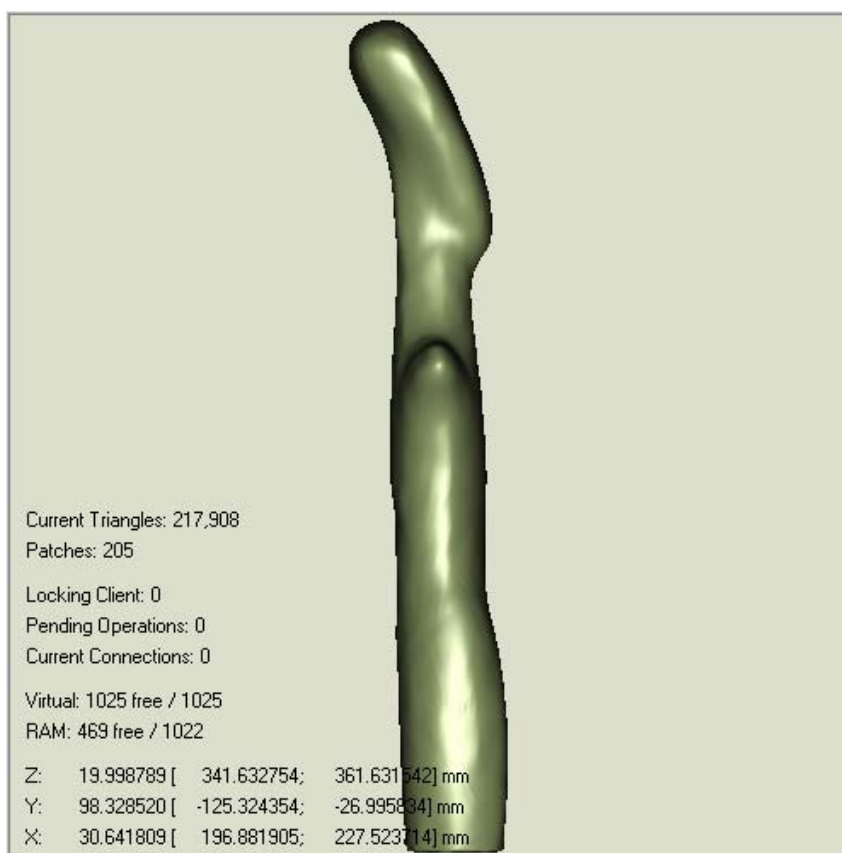
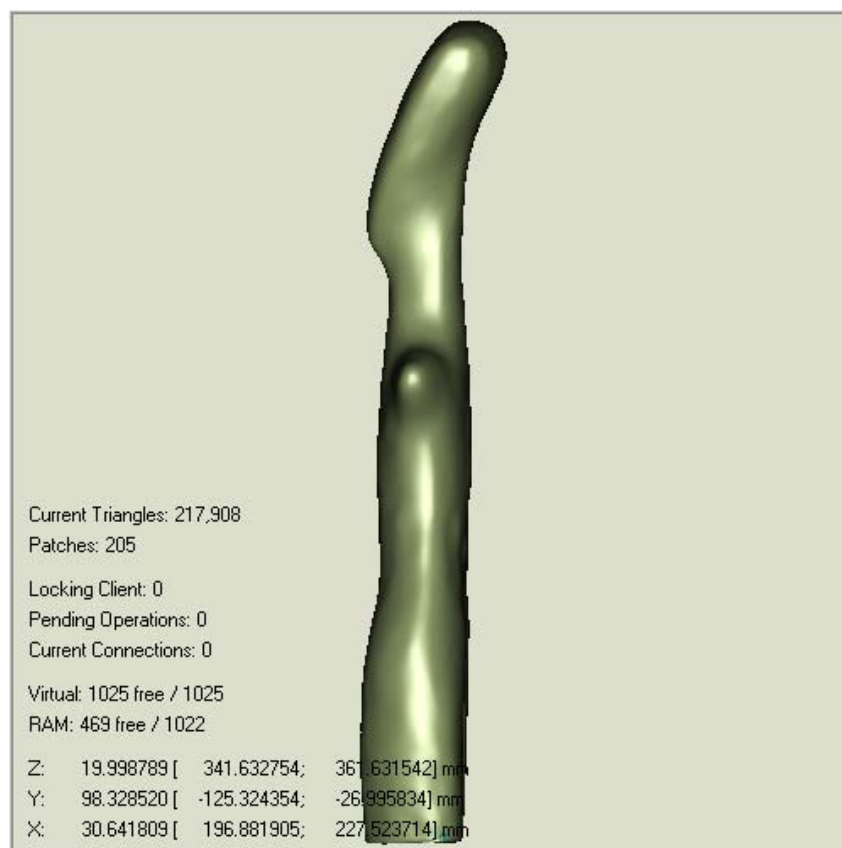
12) Κάνοντας κλικ στο κουμπί **shape face** και ακολούθως στο **auto surface** ολοκληρώνεται η διαδικασία.



Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το μοντέλο μας από όλες τις όψεις.







Αντίγραφο του ειδωλίου με τη μέθοδο ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων LOM





5.2 Εφαρμογή 2 - Ψηφιακή αποτύπωση μουσειακού αντιγράφου: Κεφαλή Ηρακλή

Κεφαλή Ηρακλή από την Αρχαία Αγορά των Αθηνών.
Αθήνα, Μουσείο Αρχαίας Αγοράς, αρ. ευρ. S1295
Τέλος 6^{ου} αιώνα π.Χ.
Ύψος 14 cm (ενδ.)– Αντίγραφο σε ρητίνη

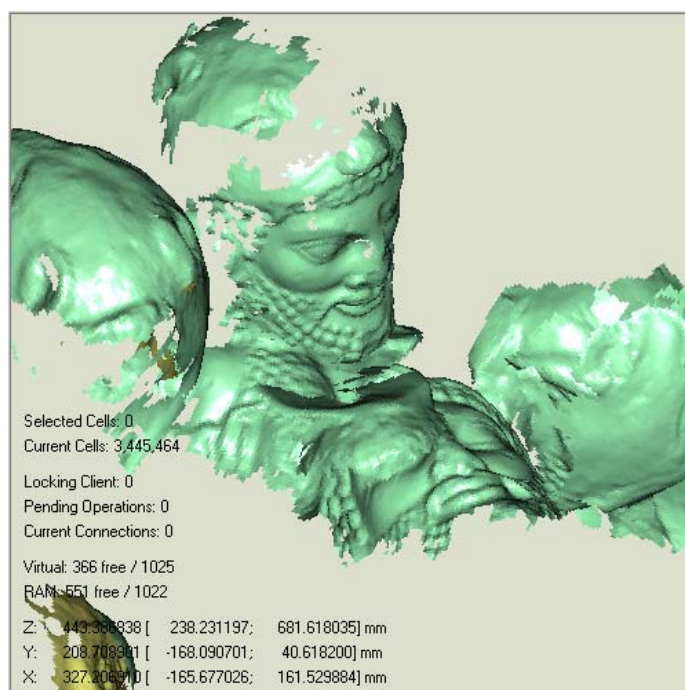
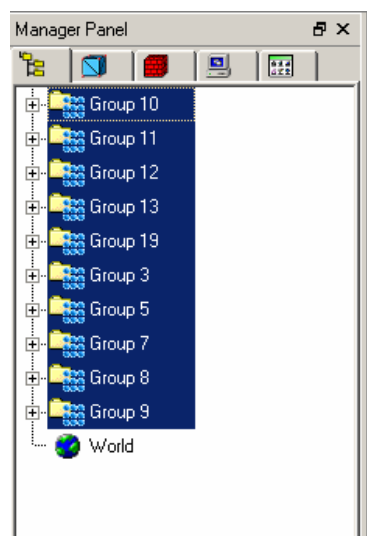


1) Ανοίγουμε το αρχείο head.wrp. Το αρχείο αυτό περιέχει τα δεδομένα της σάρωσης μιας αρχαίας κεφαλής του Ηρακλή. Όπως αναφέραμε και παραπάνω τα δεδομένα μας δεν εμφανίζονται σαν νέφος σημείων αλλά σαν κελία(order data) τα οποία έχουν καλύτερη ποιότητα και μεγαλύτερη ευκολία στην απεικόνιση (render).

2) Όπως παρατηρούμε (φαίνεται στη παρακάτω εικόνα) το αρχείο αποτελείται από πολλές διαφορετικές σαρώσεις (scans) οι οποίες δεν έχουν καμιά σύνδεση μεταξύ τους και αυτό λόγω του ότι λόγω της πολυπλοκότητας του αντικειμένου χρειάστηκε να το μετακινήσουμε και να κάνουμε πολλά διαφορετικά scans από πολλές διαφορετικές όψεις και έτσι το αντικείμενο δεν ξεκάθαρο και αποτελείται από πολλές αλληπάλληλες σαρώσεις. Η διαδικασία δημιουργίας ενός ενιαίου μοντέλου αποτελείται από 3 βήματα. Κατ' αρχάς θα «ευθυγραμμίσουμε» τα αντικείμενα έτσι ώστε να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό μεταξύ τους, μετά δημιουργήσουμε μια γενική διάταξη έτσι ώστε να μειώσουμε τις αποστάσεις-αποκλίσεις των scans και τέλος θα γίνει μια μίξη των καλύτερων δεδομένων σε ένα ενιαίο μοντέλο.

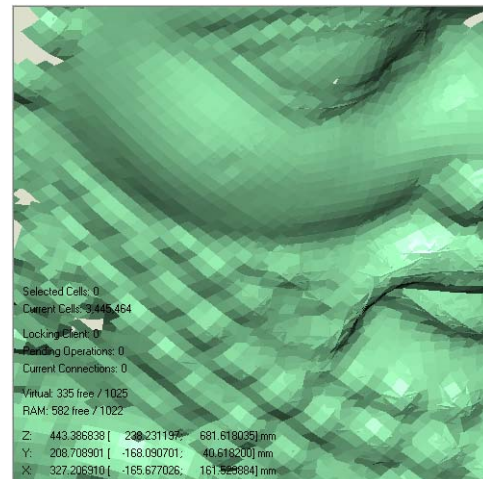


3) Επιλέγουμε όλα τα scans από το **Model Manager** που βρίσκεται στο αριστερό μέρος της οθόνης πατώντας το κουμπί **Ctrl** ενώ επιλέγουμε τα αντικείμενα. (μπορούμε επίσης να επιλέξουμε όλα τα αντικείμενα με **Alt+8**)





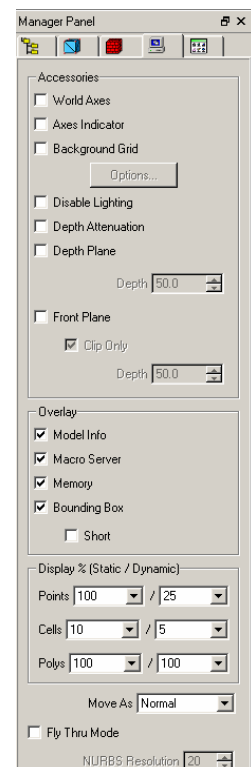
4) Κάνοντας Zoom σε ένα από τα scans παρατηρούμε ότι δεν αποτελείτε από νέφος σημείων αλλά από ορθογώνια αντικείμενα τα οποία τα ονομάζουμε κελιά (cells). Από τη στιγμή που τα δεδομένα μας είναι διατεταγμένα (ordered data) είναι πιο απλή η απεικόνιση και η επεξεργασία τους σε σχέση με όταν τα δεδομένα μας είναι νέφος σημείων. Αυτό κάνει γενικά τη διαδικασία μας πιο εύκολη.



5) Πατώντας Ctrl+D εμφανίζεται όλο το μοντέλο στην οθόνη μας.

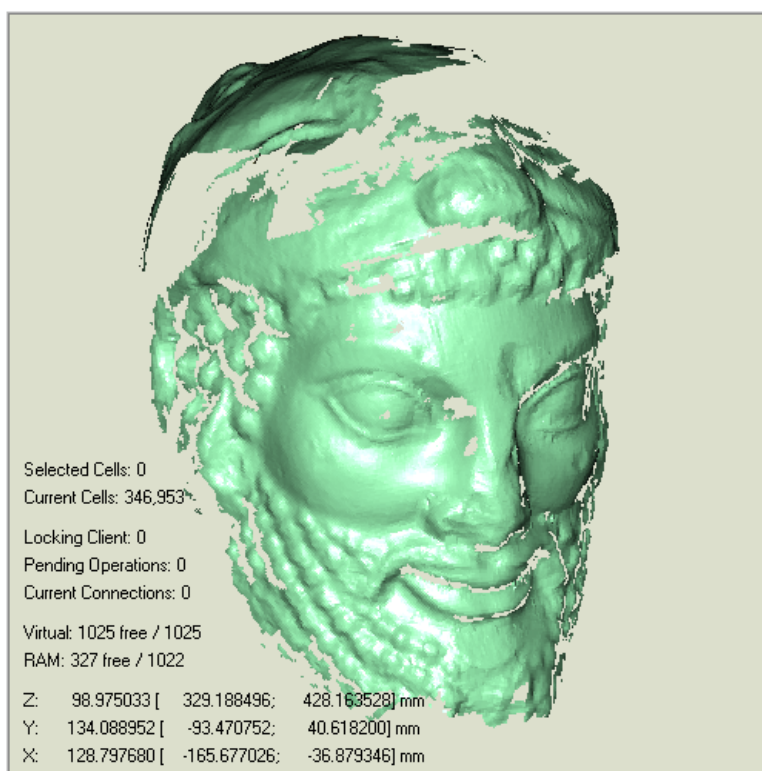
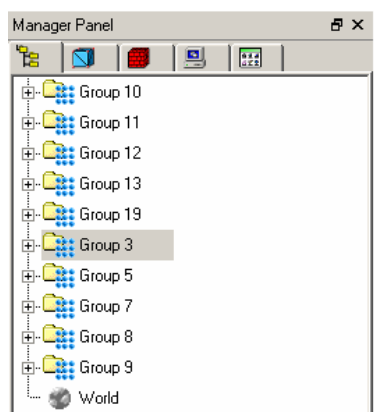
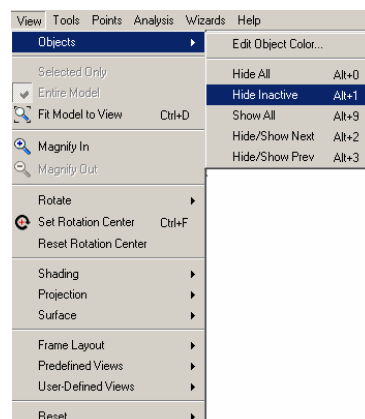


6) Στο Display Panel στο αριστερό μέρος της οθόνης μπορούμε να ελέγχουμε το ποσοστό επί τις εκατό των σημείων και των πολυγώνων που θα εμφανίζονται. Ορίζουμε την τιμή στα 25% και έτσι με αυτόν τρόπο αυξάνεται η ταχύτητα που δουλεύει ο χρήστης μια και το αντικείμενο μας αποτελείται από πολλά scans τα οποία δημιουργούν γενικότερα μια δυσκολία επεξεργασίας του μοντέλου μιας και η μείωση των πολυγώνων και σημείων αντιστοιχεί σε ταυτόχρονη μείωση της χρησιμοποιούμενης μνήμης RAM.





7) Από το **Model Manager** επιλέγουμε μόνο το group3 και για να αποκρύψουμε όλα τα υπόλοιπα scans πατάμε **Alt+1** ή από το μενού κάνουμε κλικ στο **View→Objects→Hide Inactive** και στην οθόνη μας εμφανίζεται μόνο το group3.



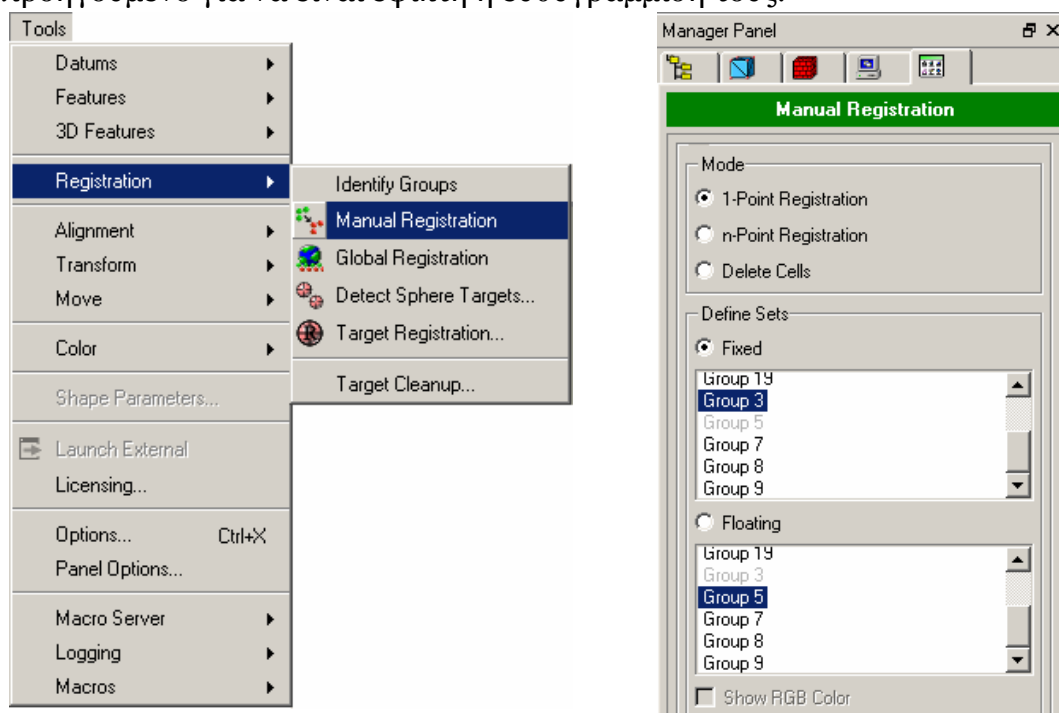
8) Παρατηρούμε ότι υπάρχουν μικρά και μεγάλα τμήματα σημείων τα οποία είναι αποκομμένα από το κυρίως scan καθώς και κενά. Αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο μας είναι αρκετά πολύπλοκο και πολλές εσοχές και δεν ήταν δυνατόν να σαρώσουμε την επιφάνεια χωρίς να δημιουργηθεί κανένα απολύτως πρόβλημα. Ωστόσο αυτός είναι ο λόγος των πολλαπλών και αλληπάληλων σαρώσεων έτσι ώστε να βρεθεί λύση στο πρόβλημα αυτό και να καλυφθούν τα κενά.



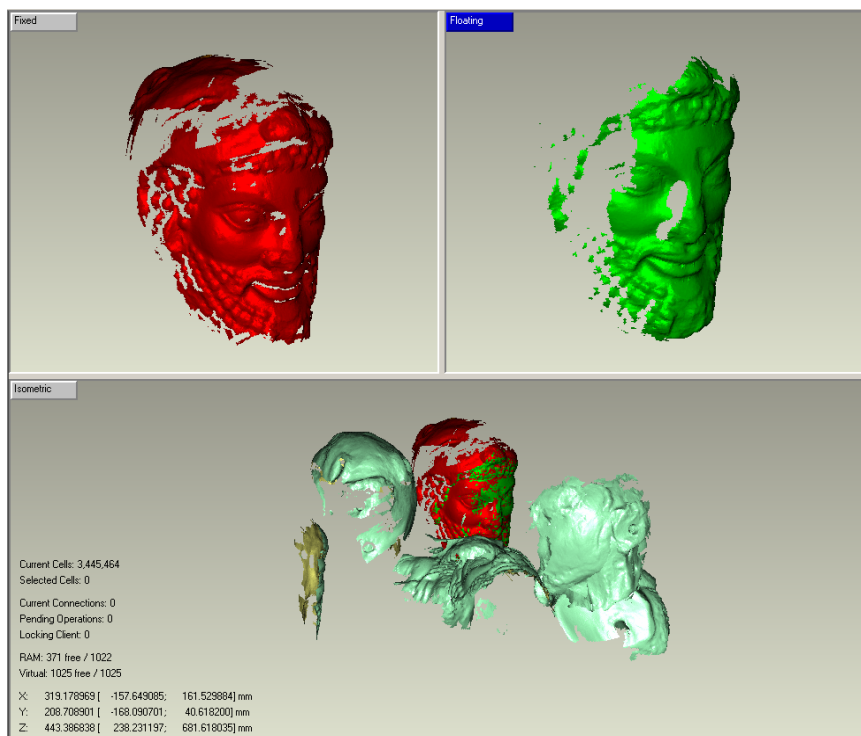
9) Για να φέρουμε στην ίδια θέση όλα τα scans έτσι ώστε να έχουν και τον ίδιο προσανατολισμό επιλεγούμε ξανά όλα τα αντικείμενα (Alt+8) από το Model Manager όπως άλλωστε έχουμε προαναφέρει.



10) Εν συνεχεία επιλεγούμε **Manual Registration** από το μενού **Tools→Registration**. Η εφαρμογή μας επιτρέπει να συνδέσουμε μεταξύ τους τα scans έτσι ώστε να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό και να είναι ευθυγραμμισμένα σαν να είναι ένα ενιαίο αντικείμενο. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά τη διαδικασία του scanning έτσι ώστε όταν δημιουργούμε ένα νέο scan αυτό το scan να έχει κοινά σημεία ή περιοχές με το προηγούμενο για να είναι εφικτή η ευθυγράμμιση τους.

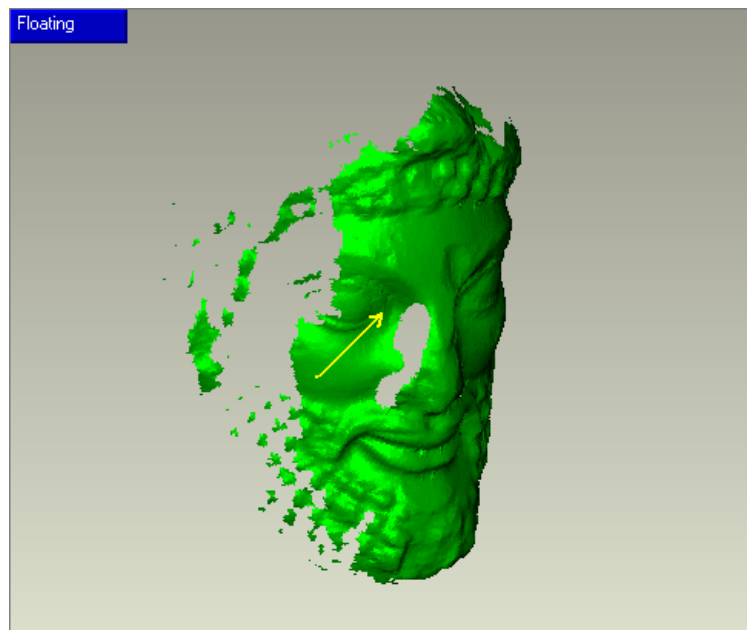
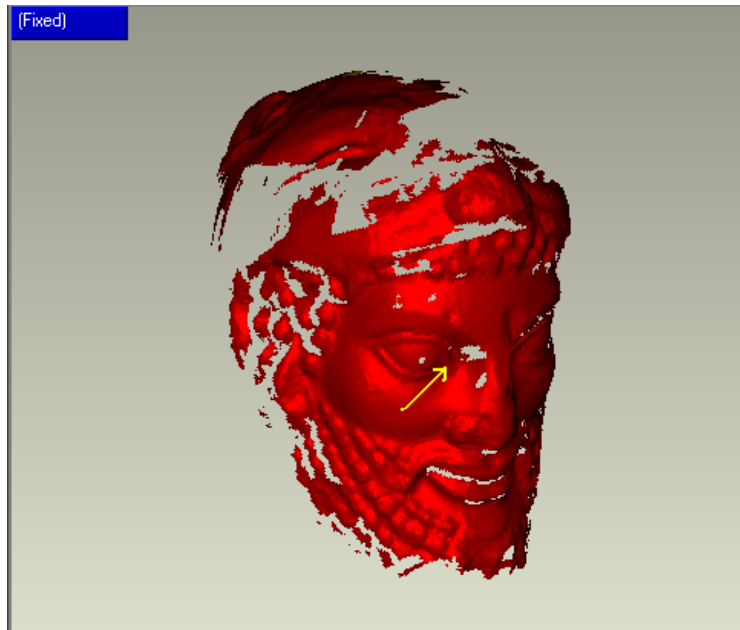


11) Από το μενού που εμφανίζεται στο αριστερό μέρος της οθόνης μας επιλεγούμε **1-Point Registration** και από τη λίστα Fixed επιλέγουμε το Group 3 το οποίο εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα ενώ από τη λίστα Floating επιλέγουμε το Group 5 το οποίο εμφανίζεται με πράσινο χρώμα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



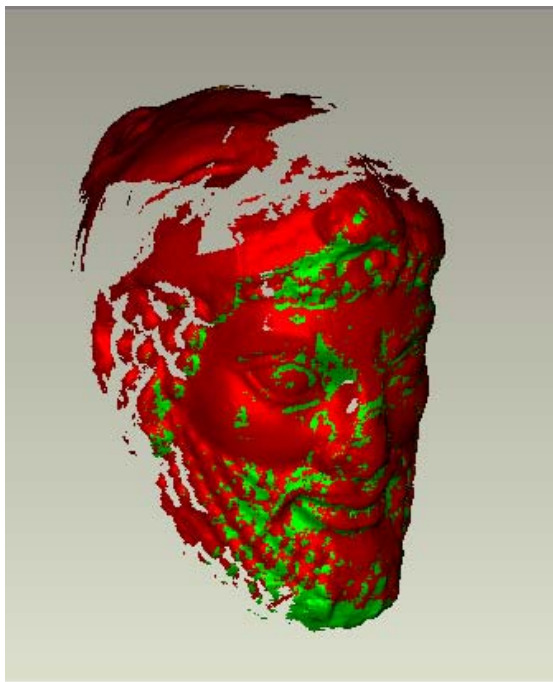
12) Ακολουθώς περιστρέφουμε κάθε μια από τις όψεις **Fixed** και **Floating** έτσι ώστε καθένα από τα scans να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Για να περιστρέφουμε κάθε μια από τις όψεις πρέπει να ορίσουμε κέντρο περιστροφής κάνοντας κλικ στο κουμπί **set rotation center** και εν συνεχεία κάνουμε κλικ στο επιθυμητό κέντρο περιστροφής. Ακολουθώς κάνουμε κλικ στο μεσαίο κουμπί του mouse περιστρέφουμε της όψεις έτσι ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

13) Παίρνουμε ένα σημείο στο Fixed scan (κόκκινο χρώμα) το οποίο είναι ορατό στο Floating scan (πράσινο χρώμα). Στην περίπτωση μας επιλέξαμε την κόγχη του δεξιού ματιού του Ηρακλή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή αυτού του σημείου έτσι ώστε εκτός από το ότι πρέπει να είναι κοινό και στα δύο scans πρέπει να είναι και χαρακτηριστικό έτσι ώστε να μην έχουμε κακό registration.

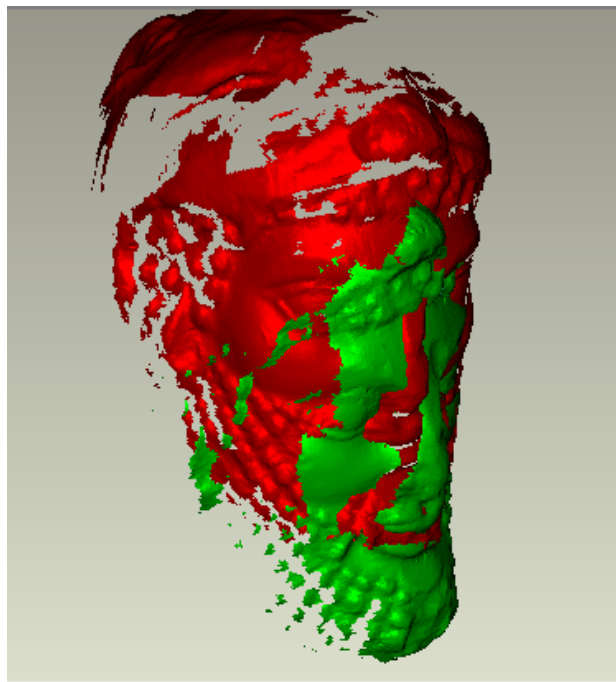


14) Από τη στιγμή που επιλέξαμε τα δύο σημεία στην όψη που βρίσκεται στο κάτω μέρος της οθόνης (isometric view) εμφανίζονται τα 2 groups ευθυγραμμισμένα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αν όμως δεν έχουν

τηρηθεί οι προϋποθέσεις που θέσαμε θα έχουμε ένα πολύ κακό αποτέλεσμα. Στην τελευταία περίπτωση κάνουμε κλικ στο Unregister έτσι ώστε να έρθει



Καλό Registration

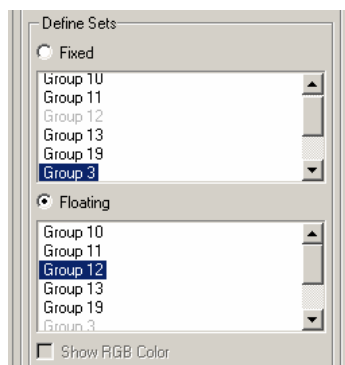


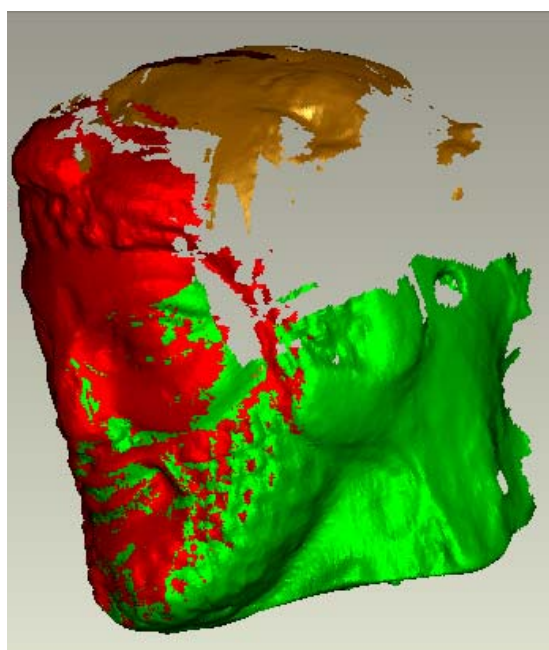
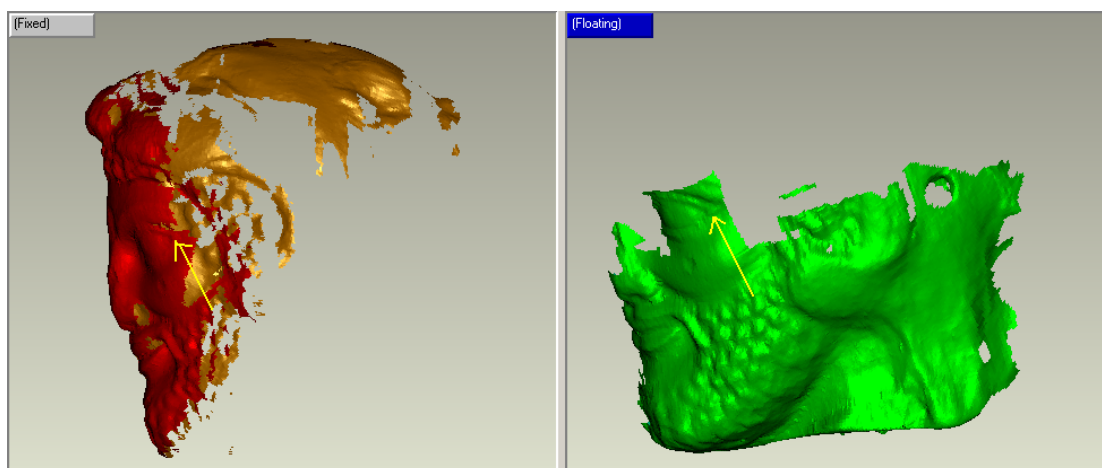
Κακό Registration

στην αρχική κατάσταση.

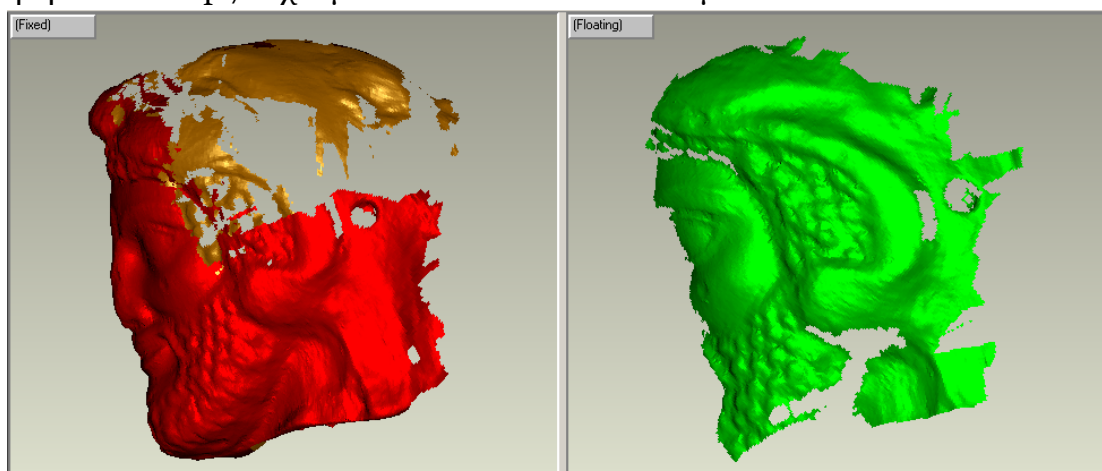
15) Αν μας ικανοποιεί το αποτέλεσμα κάνουμε κλικ στο **Next** για να συνεχίσουμε τη διαδικασία. Κάνοντας κλικ στο next αποδεχόμαστε ότι έχει γίνει σωστό registration και το group 5 ενσωματώνεται στο group 3.

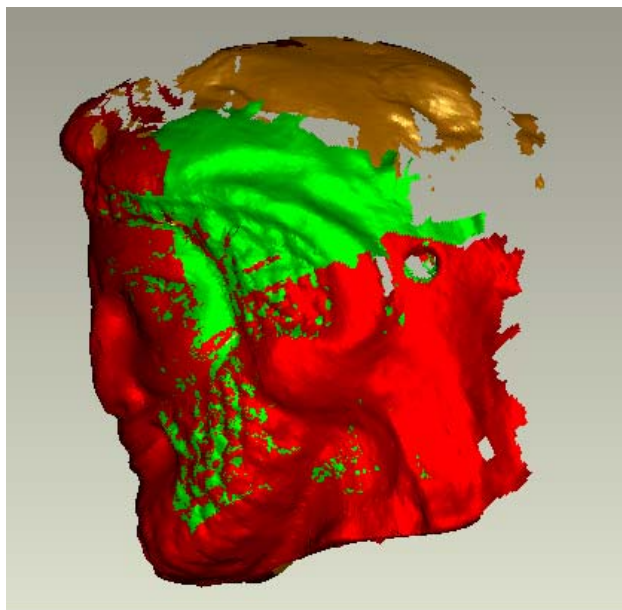
16) Συνεχίζοντας τη διαδικασία του registration κάνουμε κλικ στο Group 12 από την αναδιπλούμενη λίστα του floating και ακολούθως εργαζόμαστε έως άνω για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτή τη φορά το σημείο που χρησιμοποιήσαμε είναι η αριστερή κόγχη του αριστερού ματιού όπως φαίνεται και παρακάτω.



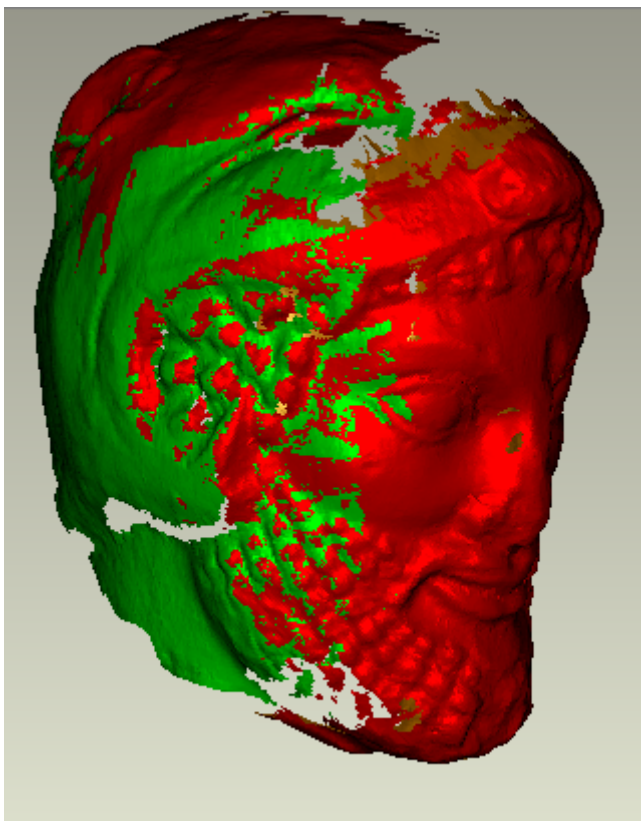


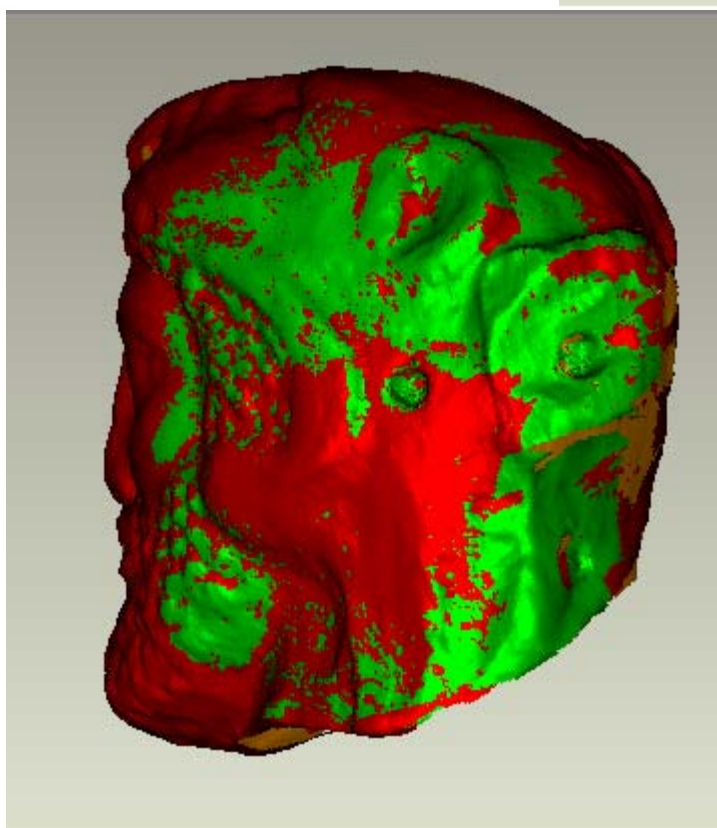
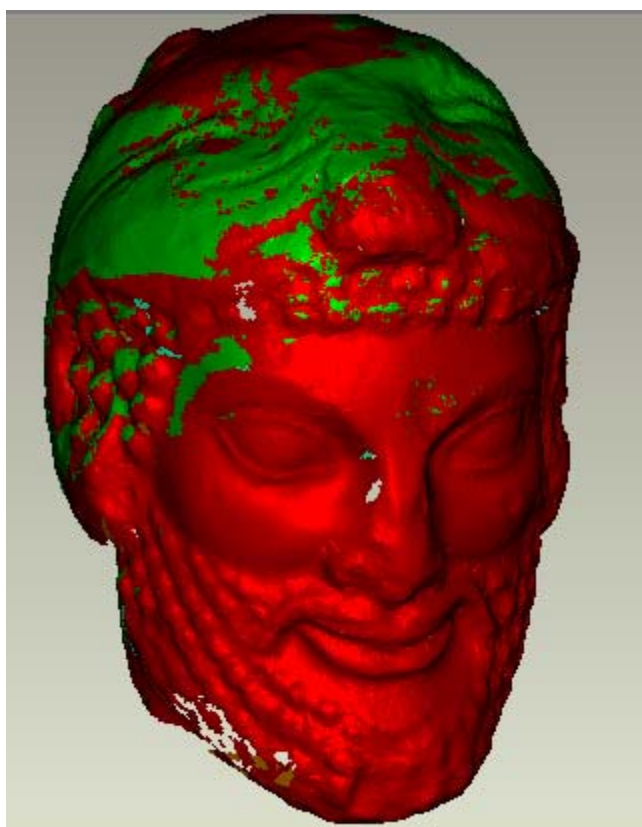
17) Ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία ενσωματώνοντας αυτή τη φορά το Group 7- έχουμε το ακόλουθο αποτέλεσμα.

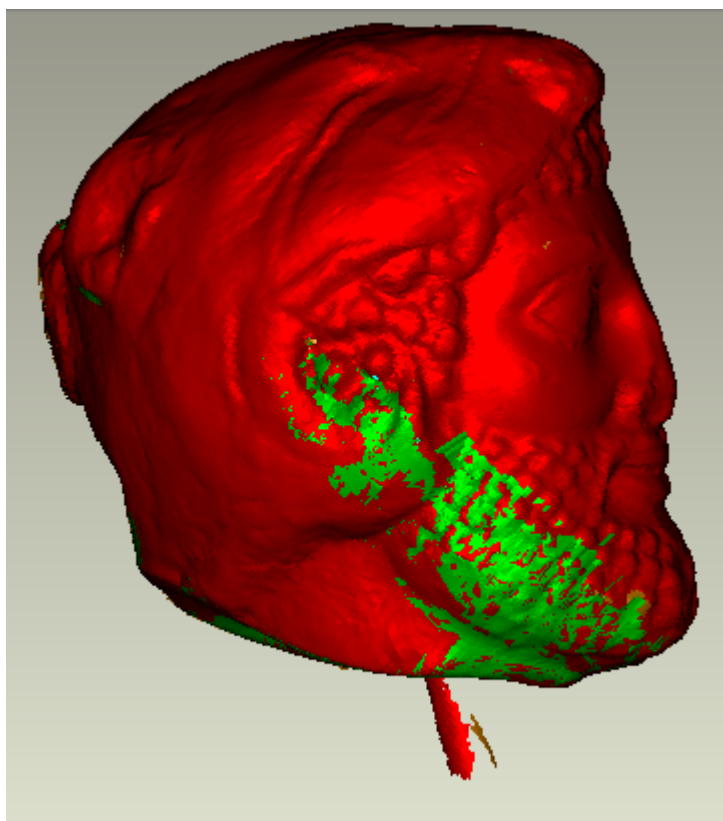
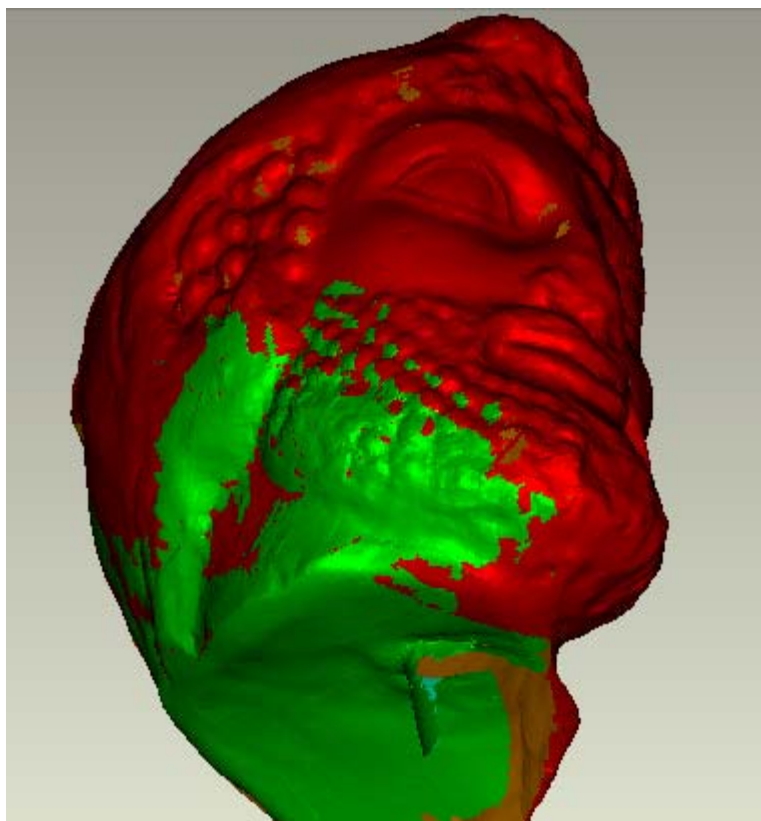


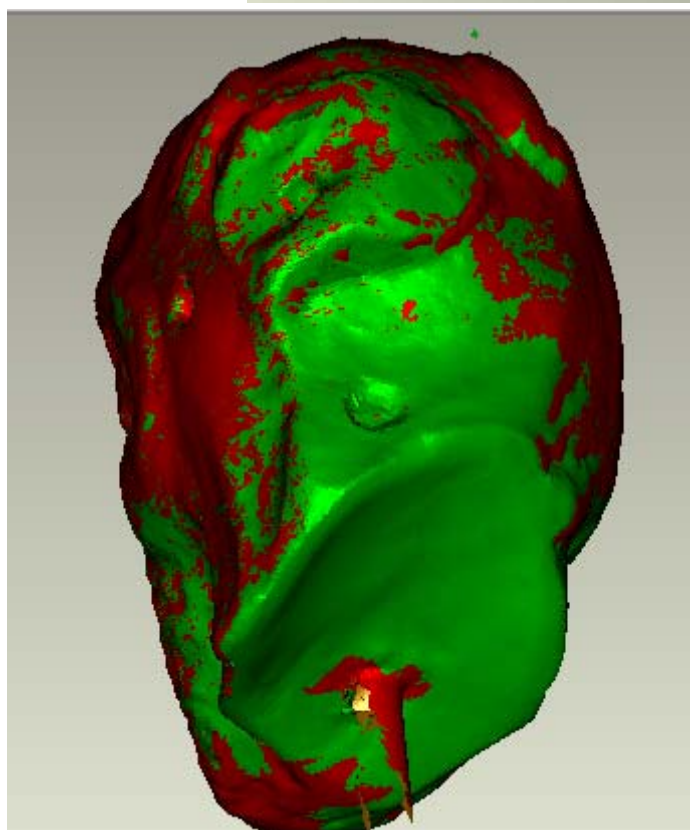
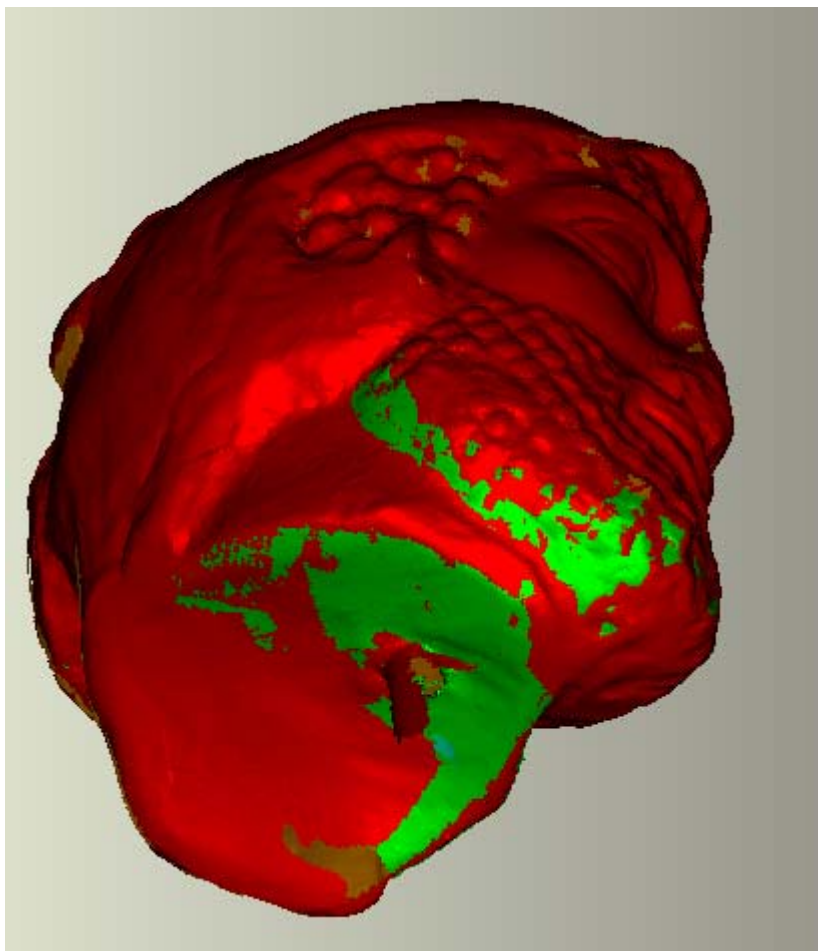


18) Την ίδια ακριβώς διαδικασία που προαναφέραμε ακολουθούμε και στη συνέχεια κάνοντας **register** κάθε φορά σε διαφορετικό Group μέχρις ότου σχηματιστεί πλήρως το ζητούμενο μοντέλο. Η σταδιακή εξέλιξη του μοντέλου φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

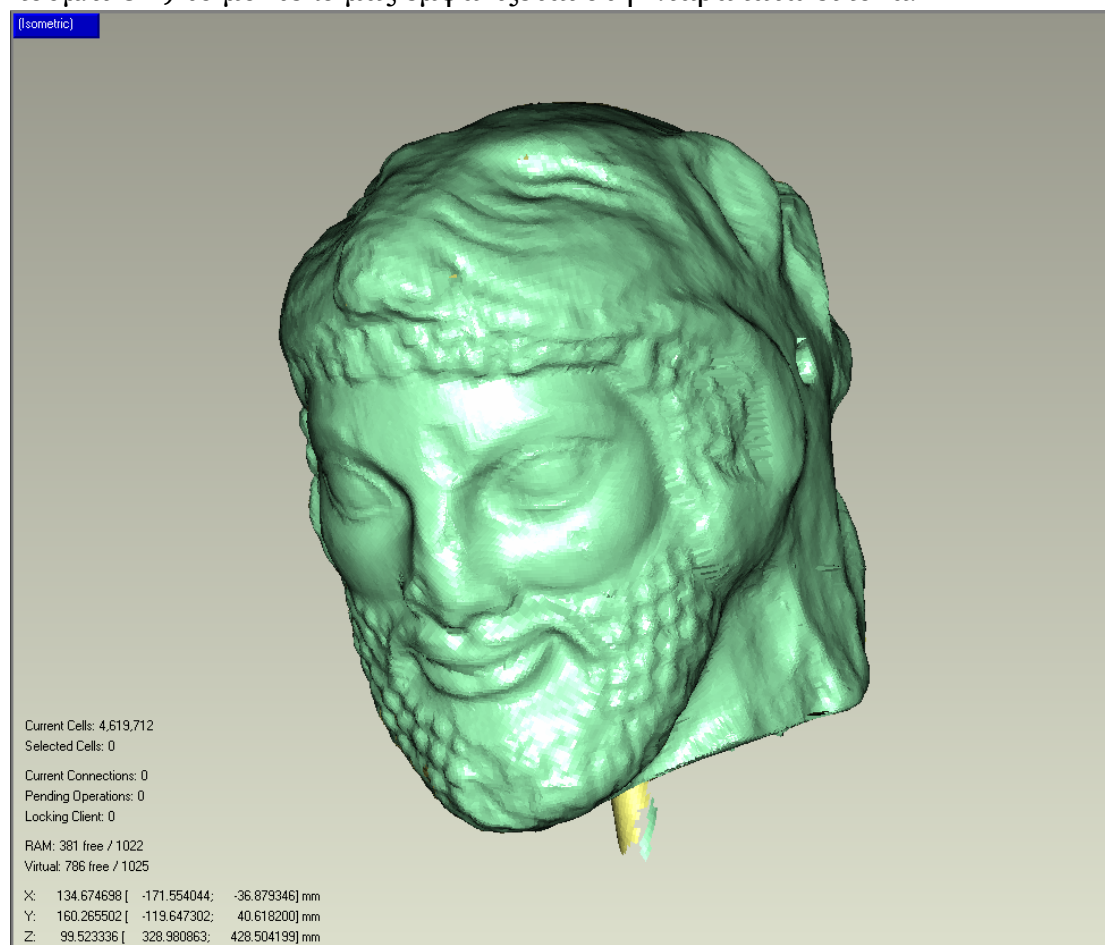






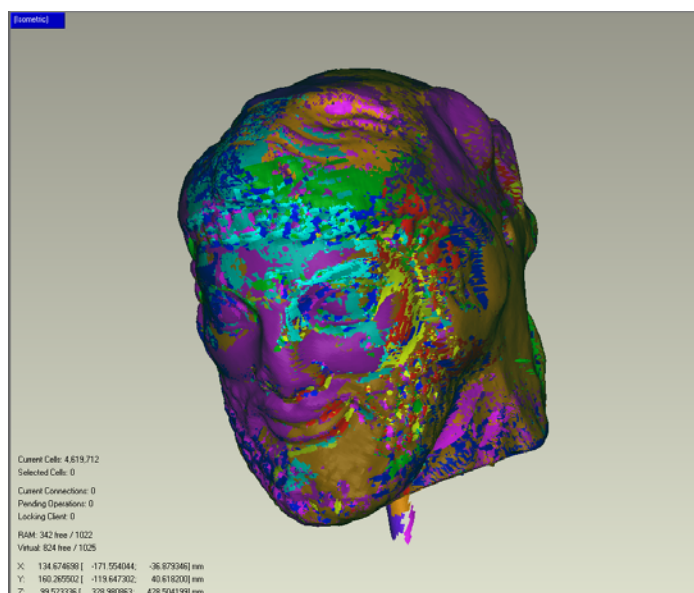


Μετά το τέλος της διαδικασίας του registration (αφού κάνουμε κλικ στο κουμπί OK) το μοντέλο μας εμφανίζεται στην παρακάτω εικόνα.



19) Προκειμένου να μειωθούν το δυνατόν περισσότερο οι αποστάσεις μεταξύ των διαφορετικών scans κάνουμε κλικ στο **Global Registration** από το μενού **Tools→Registration**.

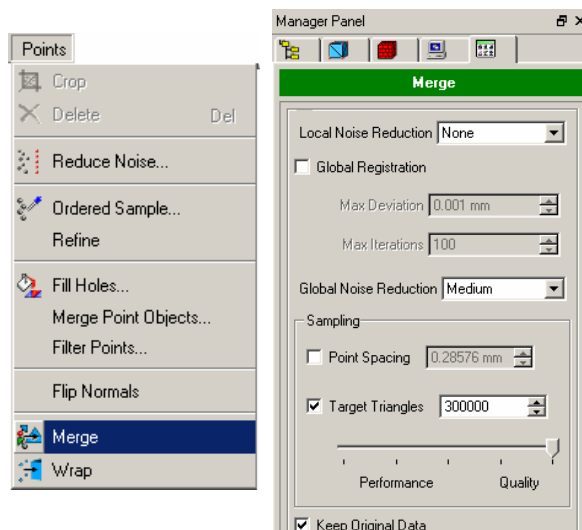
20) Από το μενού που εμφανίζεται στο αριστερό μέρος της οθόνης κάνουμε κλικ στο κουμπί **Apply** ενώ παρατηρούμε ότι το μοντέλο μας εμφανίζεται με μια πληθώρα χρωμάτων δείγμα των πολλών διαφορετικών scans που έχουν πραγματοποιηθεί



21) Η διαδικασία ίσως καθυστερήσει λόγω των πολλών scans και αναγκαστικά πολλών cells. Μετά το τέλος τη εφαρμογής κάνουμε κλικ στο OK.



22) Εν συνεχεία έχοντας ήδη επιλέξει όλα τα scans από το **Model Manager** κάνουμε κλικ στο Merge από το μενού **Points**→**Merge**. Στο αριστερό μέρος της οθόνης μας εμφανίζεται ένα μενού με της επιλογές που μπορούμε να κάνουμε σχετικά με τη μίξη των scans .



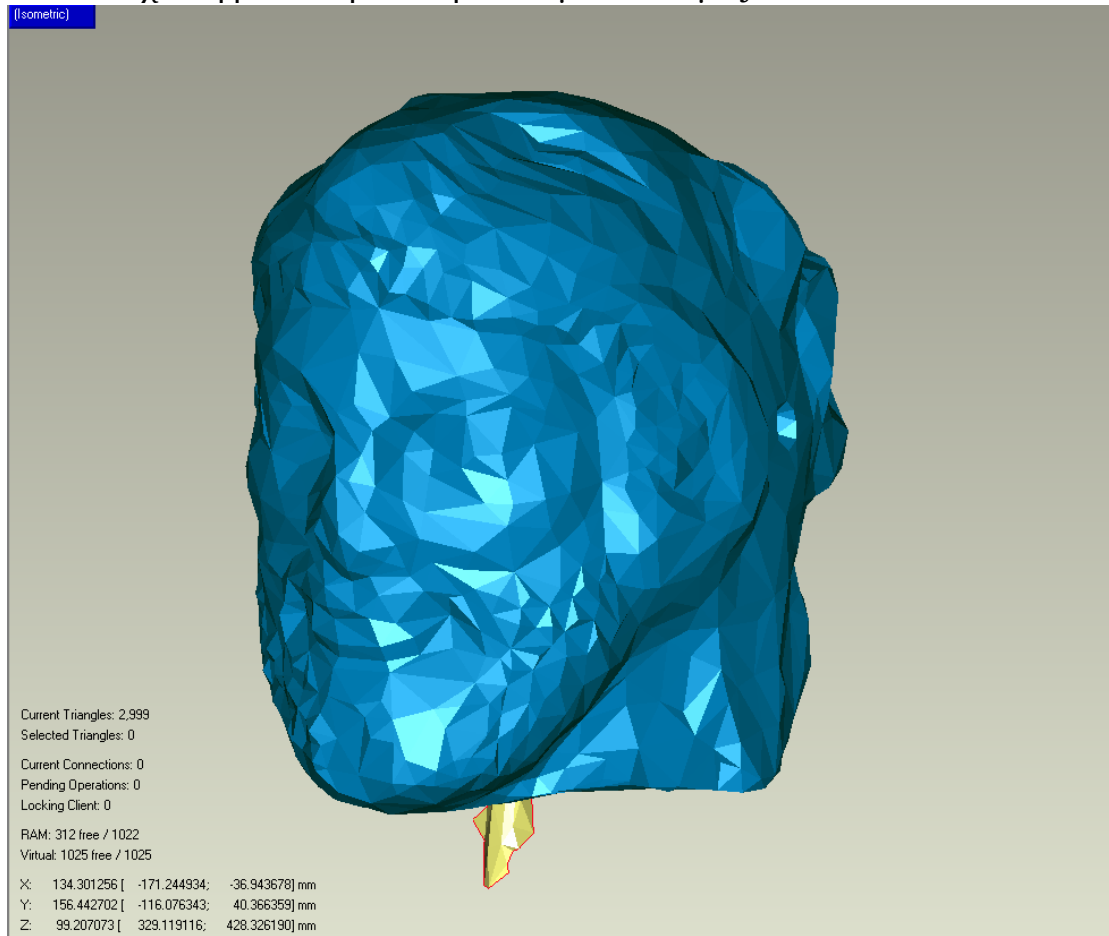
23) Ρυθμίζουμε το **Local Noise Reduction** στο **Med** μιας και διακρίνουμε ότι σε ορισμένα σημεία των scans υπάρχει αρκετός θόρυβος.

24) Ορίζουμε το **Global Noise Reduction** στο **Auto**. Με την επιλογή μας αυτή επιτρέπουμε στο πρόγραμμα να κάνει επιπλέον εξομάλυνση (smoothing) των επιφανειών όπου χρειαστεί.

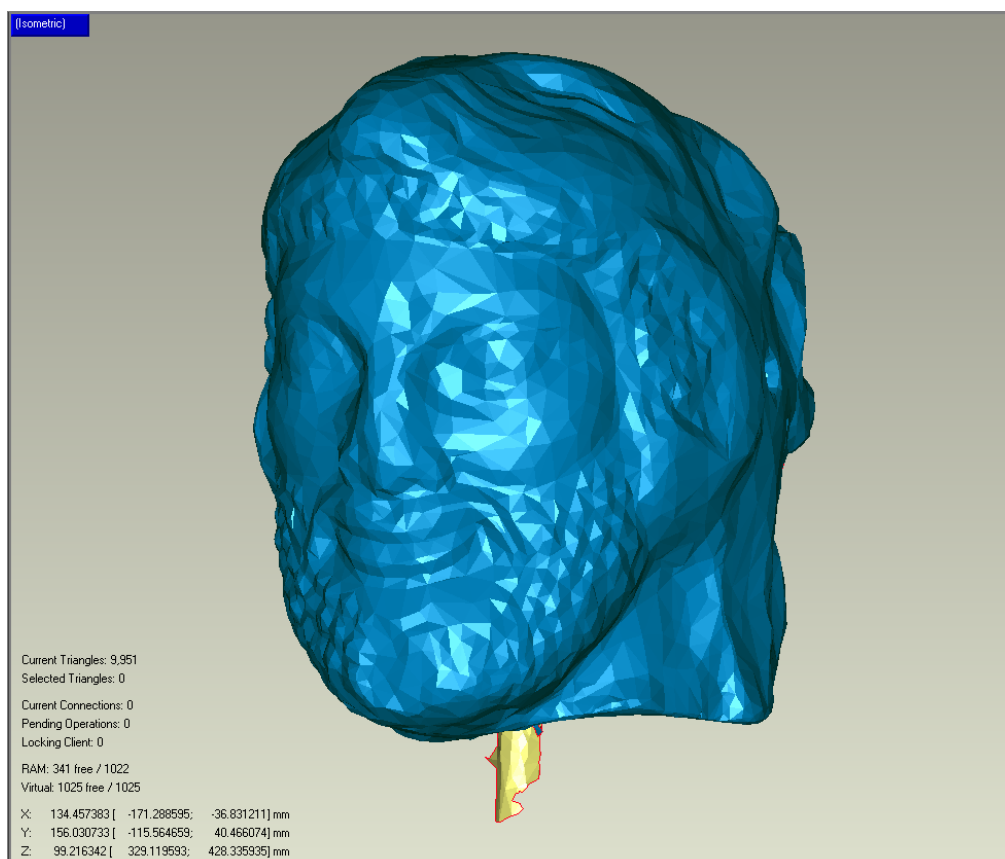
25) Στη λεζάντα **Sampling** του μενού έχουμε τρεις επιλογές. Η πρώτη επιλογή **Point Spacing** δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει την μέση απόσταση μεταξύ των scans. Επειδή όμως αναφέρεται σε εμπείρους χρήστες θα το αφήσουμε ως έχει.

26) Η δεύτερη επιλογή **Target Triangles** αφορά τον αριθμό των τριγώνων που θέλουμε να έχει το μοντέλο μας μετά την μίξη των scans. Σε αυτήν την περίπτωση μη γνωρίζοντας τον επιθυμητό αριθμό των τριγώνων που θα μας δώσουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα καταλήξαμε σε μια σειρά πειραματισμών τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στις εικόνες που παραθέτονται παρακάτω.

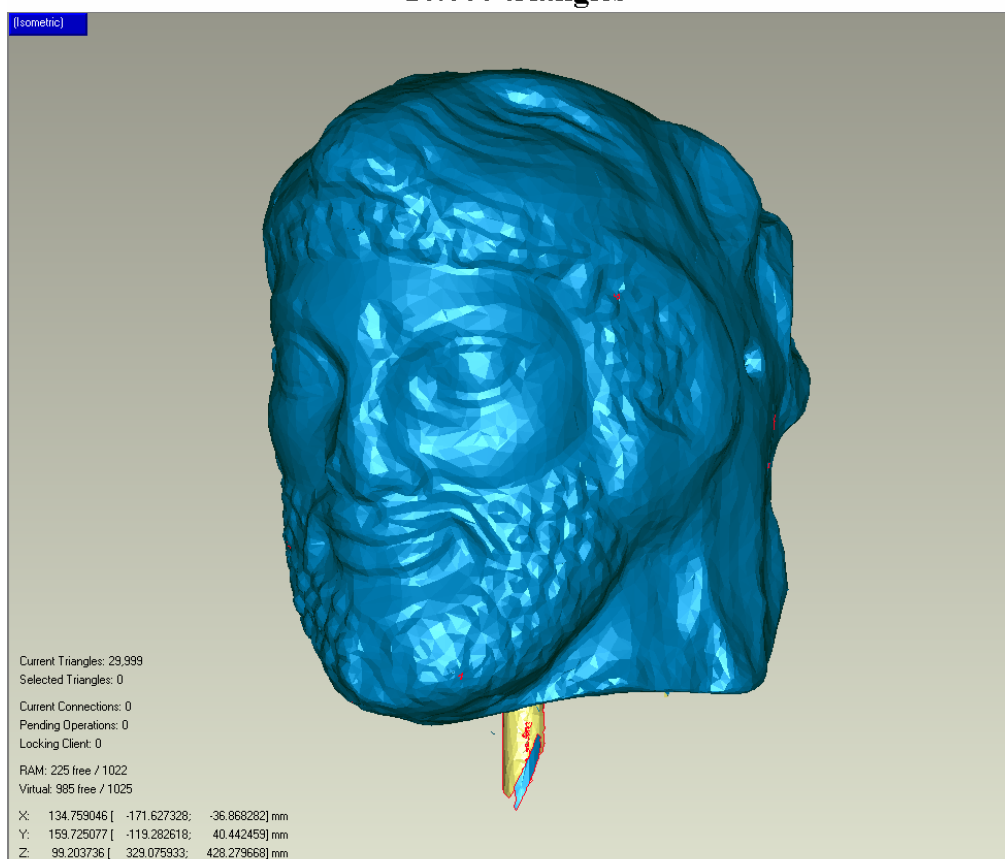
27) Τέλος η τρίτη επιλογή, μας δίνεται από μια κινούμενη μπάρα στην οποία καλούμαστε να επιλέξουμε μεταξύ του **Performance** (Λειτουργικότητα) και του **Quality** (Ποιότητα). Επειδή το αντικείμενο μας ως γνωστόν αποτελεί ομοίωμα αρχαίου μνημείου μετακινούμε την μπάρα στο δεξί άκρο έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ποιότητα του μοντέλου μας.



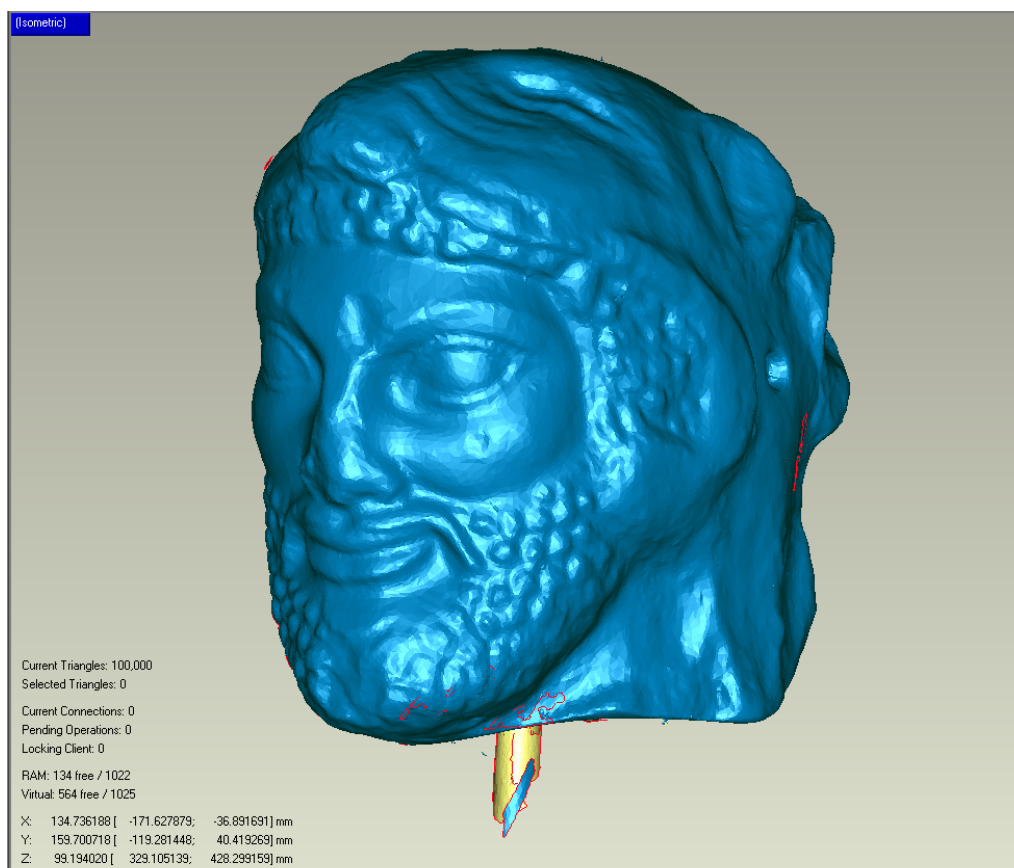
3.000 triangles



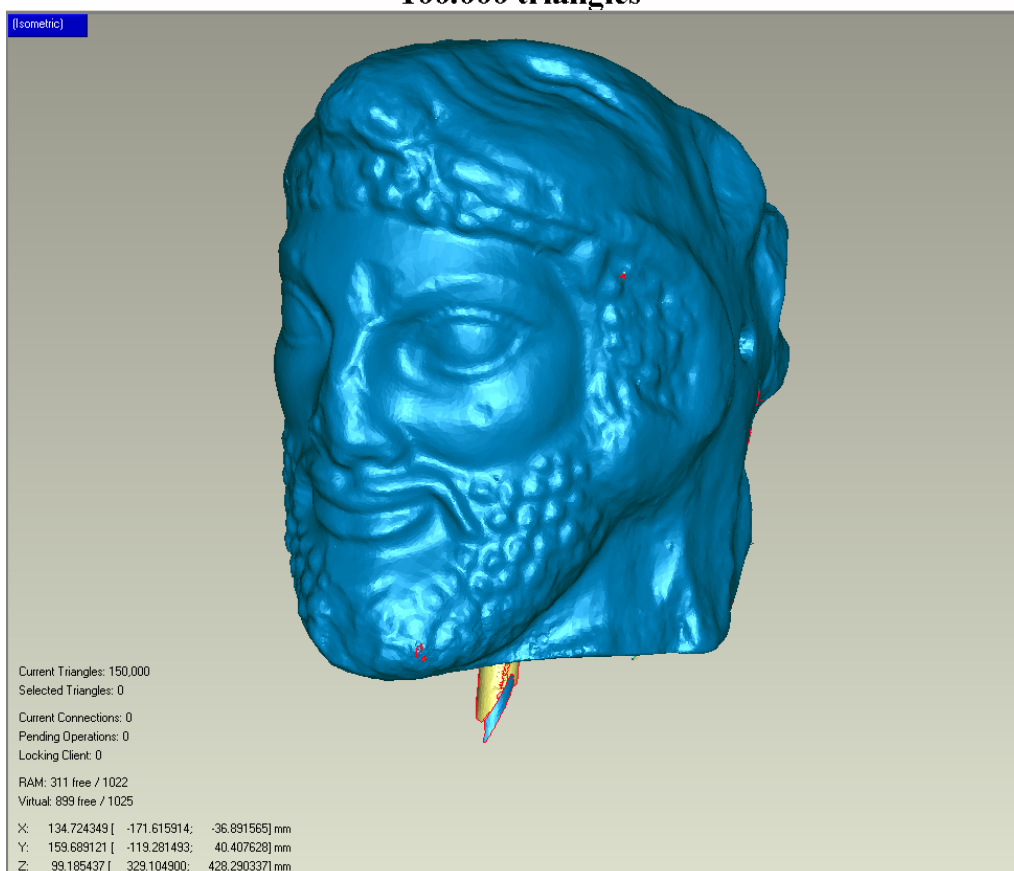
10.000 triangles



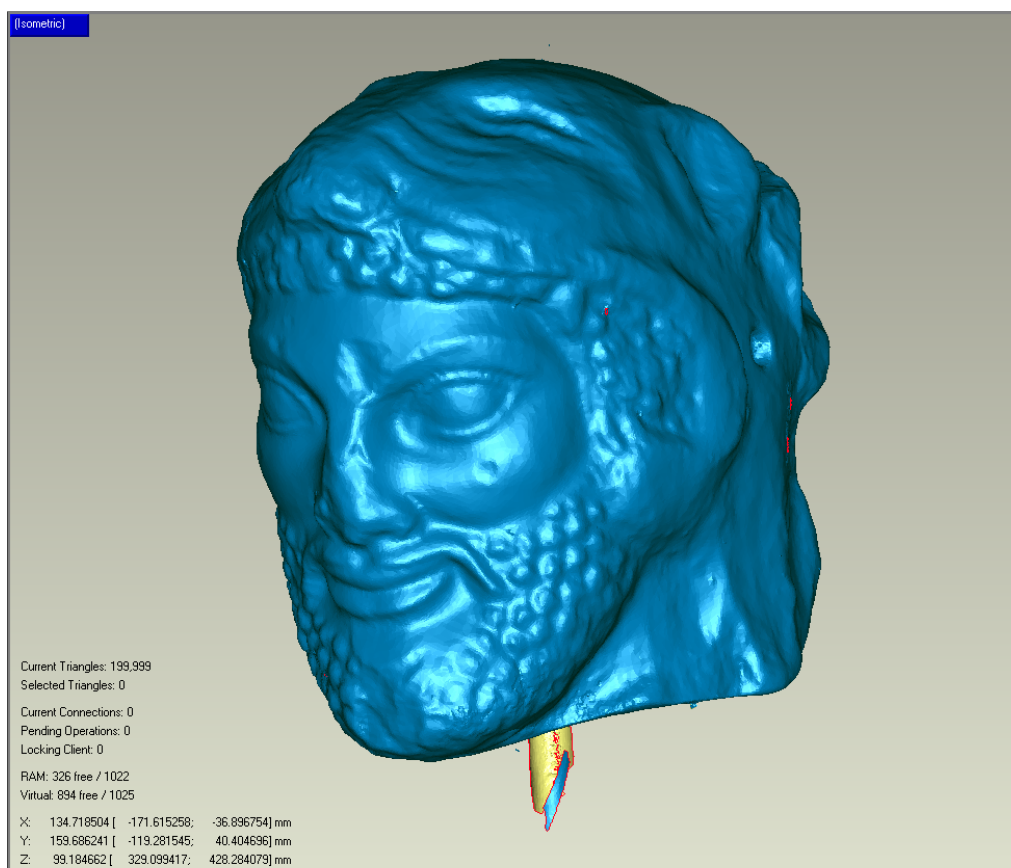
30.000 triangles



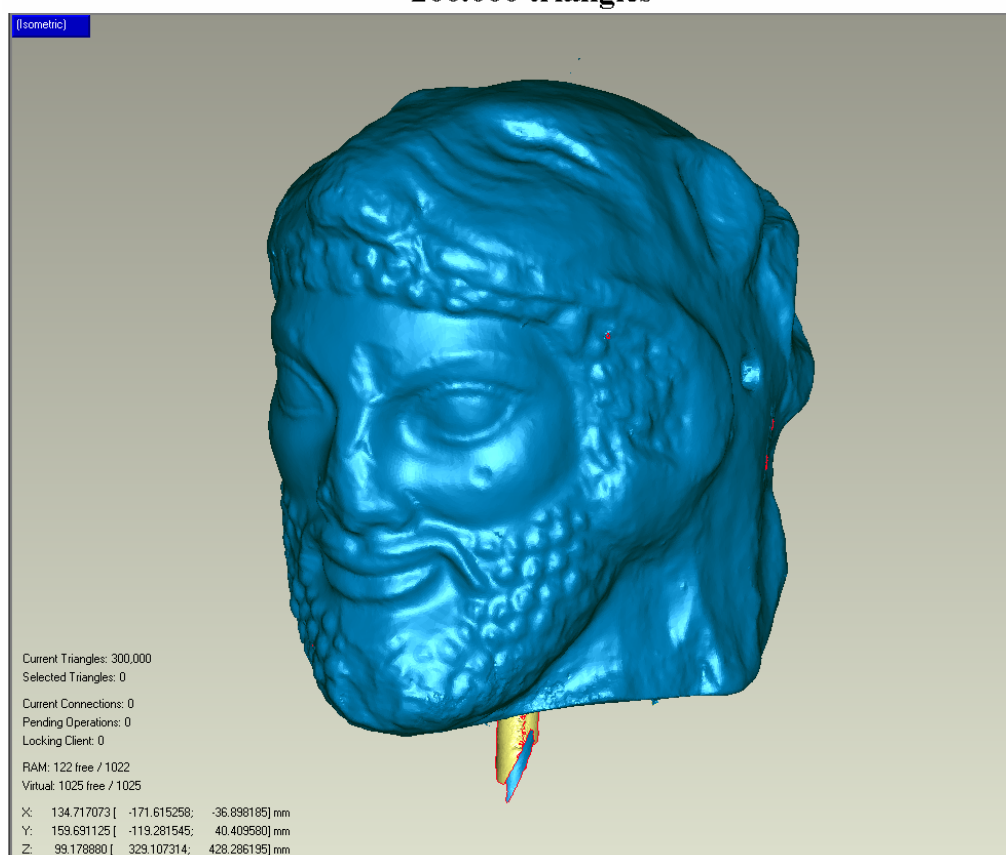
100.000 triangles



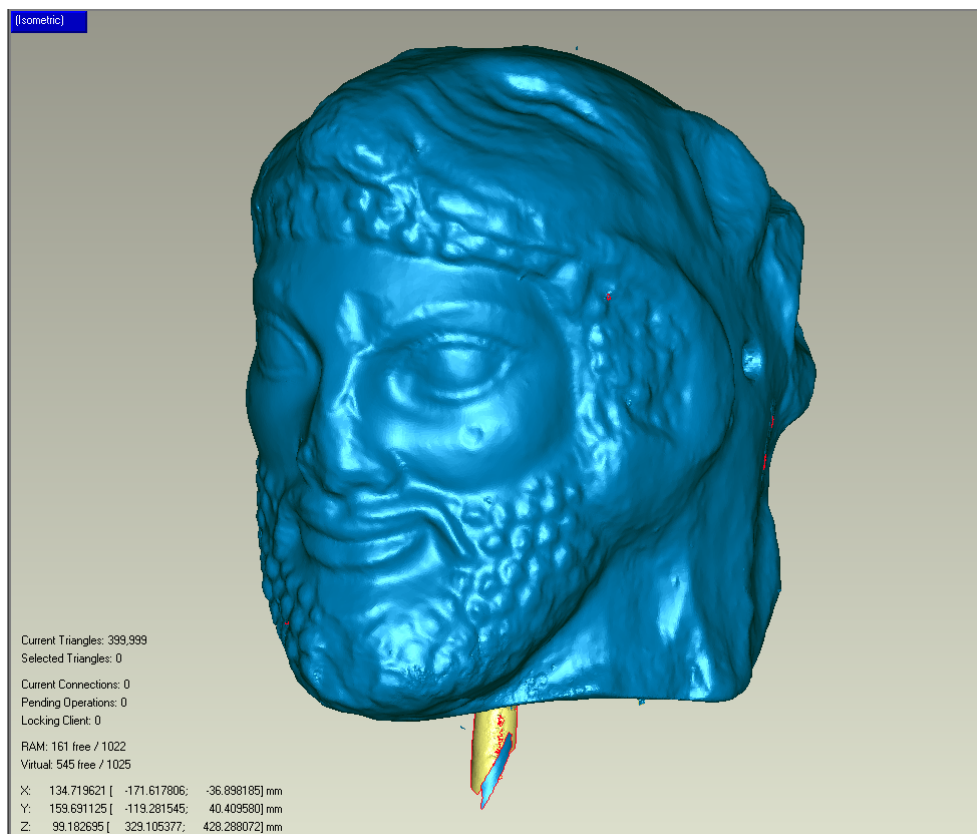
150.000 triangles



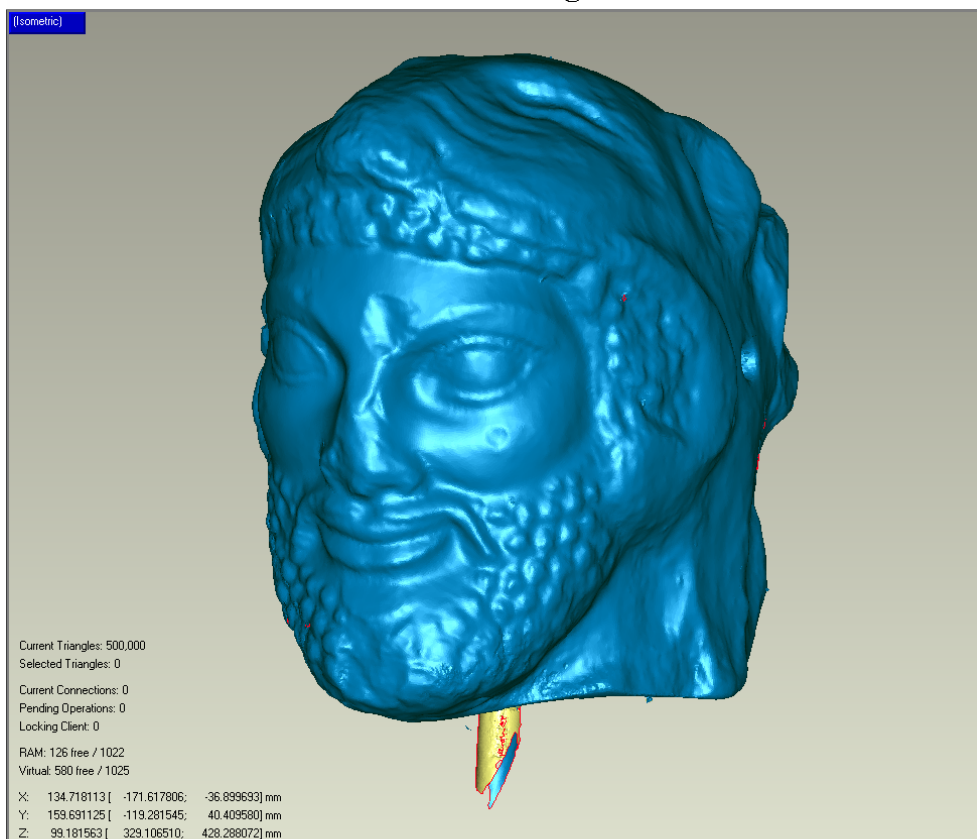
200.000 triangles



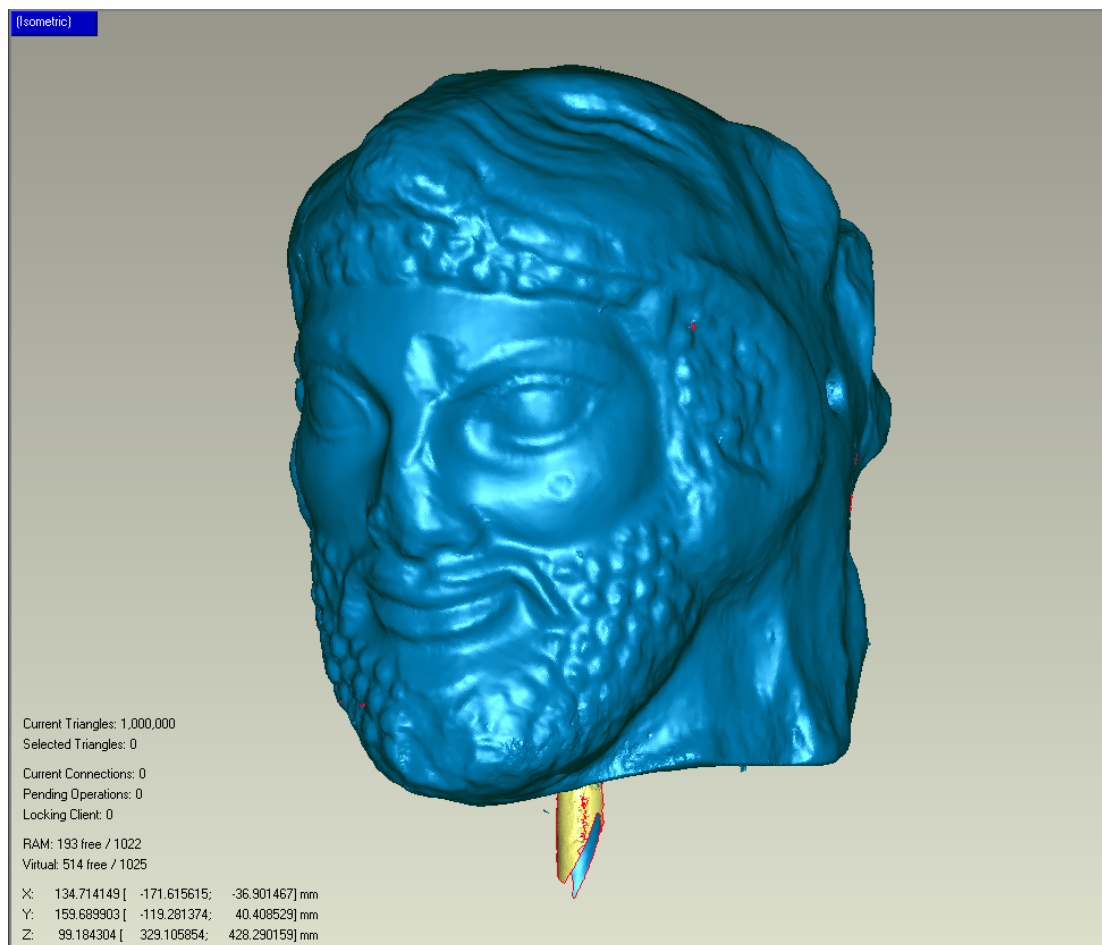
300.000 triangles



400.000 triangles



500.000 triangles



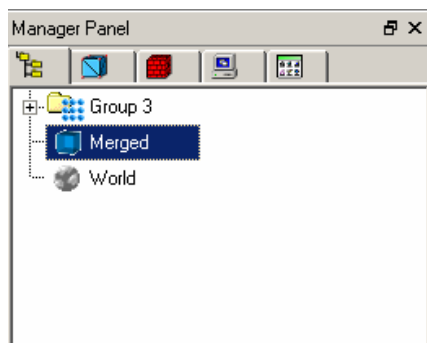
1.000.000 triangles

28) Η λογική μας υπαγορεύει ότι όσο περισσότερα triangles έχει το μοντέλο μας τόσο πιο ακριβές θα είναι. Στην πράξη όμως παρατηρούμε ότι ενώ αρχικά δείχνει να συμβαίνει η παραπάνω παραδοχή ακολούθως δεν έχουμε το αναμενόμενο αποτέλεσμα. Δηλαδή οι τα triangles από 3.000 έως 10.000 αδυνατούν να απεικονίσουν το μοντέλο μας στοιχειωδώς ενώ για 30.000 triangles έχουμε στοιχειώδη αποτύπωση του μοντέλου μας. Ουσιαστικά η πιο ακριβής αποτύπωση του μοντέλου μας είναι μεταξύ των τιμών 100.000 και 200.000 ενώ για τιμές μεγαλύτερες από 200.000 έως και 1.000.000 τα triangles είναι πάρα πολλά και έτσι κάποιες επιφάνειες με μεγαλύτερη τραχύτητα όπως είναι τα διαφορά «σπασίματα» λειαίνονται αρκετά και έτσι δεν έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα . Έτσι λοιπόν ορίζουμε την τιμή των triangles σε 150.000.

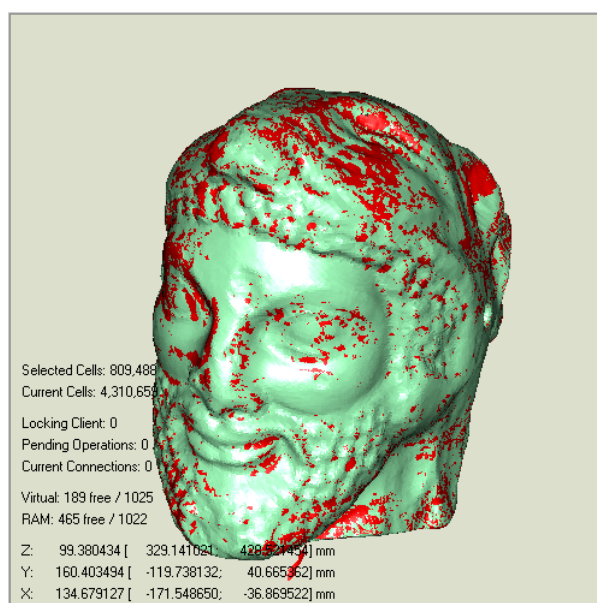
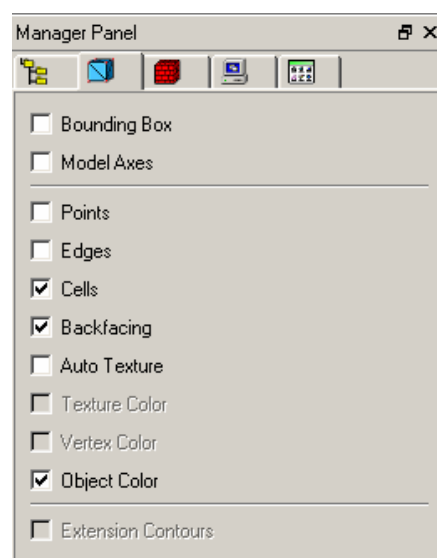
29) Αφού καταλήξαμε στις επιλογές που θέλουμε να κάνουμε κλικ στο κουμπί OK για να ξεκινήσει η διαδικασία του Merge. Αυτή η εφαρμογή ίσως είναι και η πιο χρονοβόρα από πλευράς Η/Υ και διαρκεί αρκετά λεπτά.

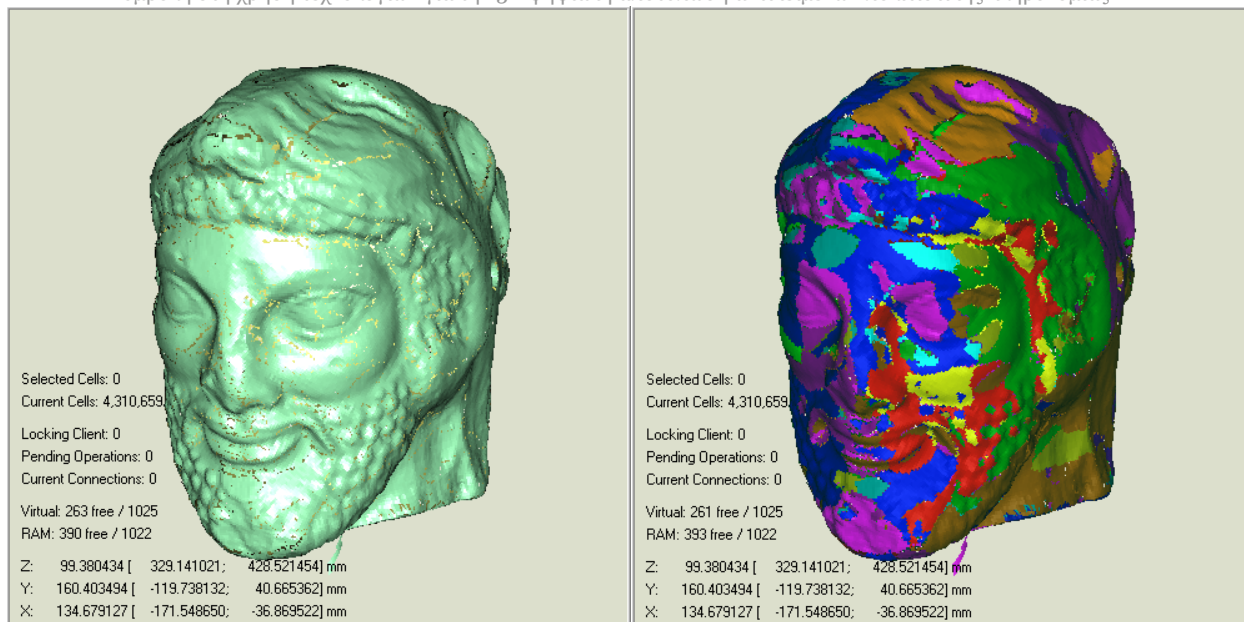


30) Μετά το τέλος της διαδικασίας στο Model Manager στο αριστερό μέρος της οθόνης μας εμφανίζεται το merged αντικείμενο μας. Για να δούμε τα «καλύτερα» δεδομένα (best data) δηλαδή τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία του τελικού μας μοντέλου κάνουμε κλικ στο Group 3 στο Model Manager και πατάμε Alt+1 για να 'κρύψουμε' προσωρινά το μοντέλο μας.

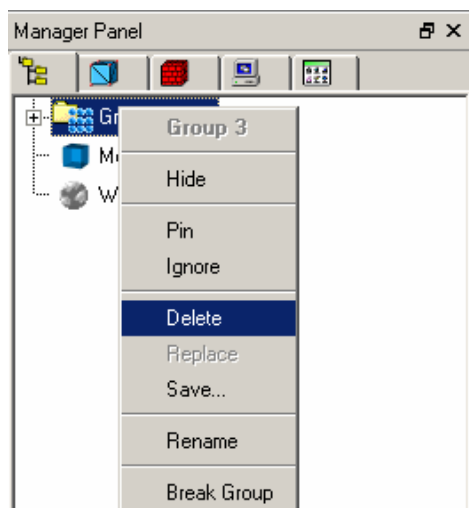


31) Παρατηρούμε ότι ορισμένα τμήματα των scans παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα, αυτές είναι οι περιοχές οι οποίες είναι τα καλύτερα δεδομένα μας που χρησιμοποιήθηκαν για το merge. Για να τα δούμε πιο ξεκάθαρα κάνουμε κλικ στο View→Selected Only, ενώ για να γίνει πιο σαφής η διάταξη των διαφορετικών scans που χρησιμοποιήθηκαν από το Primitives Panel στο αριστερό μέρος της οθόνης μας τσεκάρουμε την επιλογή Object Color.

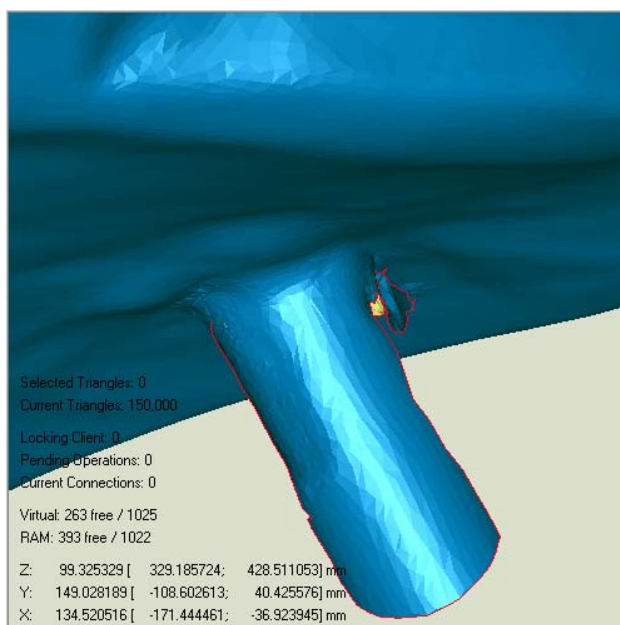




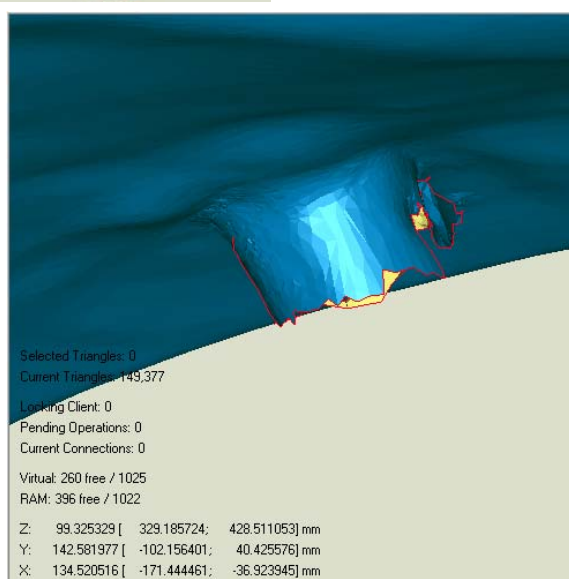
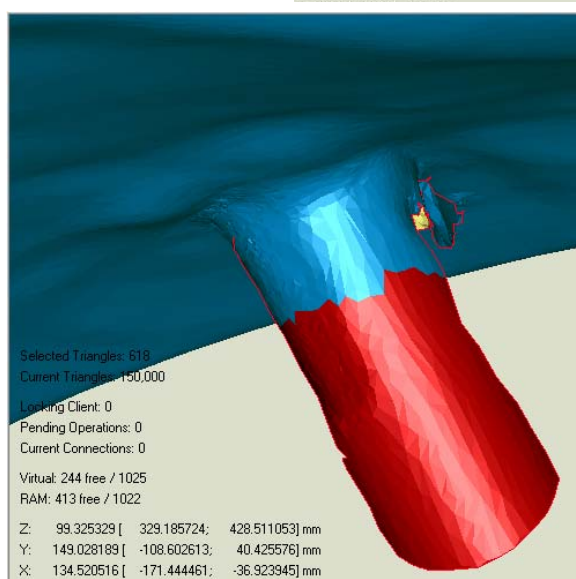
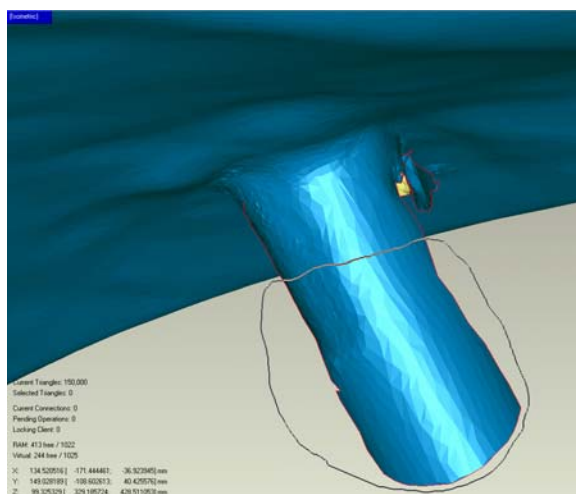
32) Επειδή τα αρχικά scans δεν μας είναι πλέον χρήσιμα μπορούμε να τα διαγράψουμε απλά κάνοντας δεξί κλικ στο Group 3 από το **Model Manager** και από το εμφανιζόμενο μενού πατώντας κλικ στο **delete**.



33) Όπως παρατηρήσαμε και παραπάνω το μοντέλο μας (merged) εμφανίζεται με το στήριγμα το οποίο αναπόφευκτα σκανάραμε καθώς ήταν κολλημένο επάνω του. Σε αυτή τη φάση λοιπόν στόχος μας είναι να αναιρέσουμε αυτό το στήριγμα.

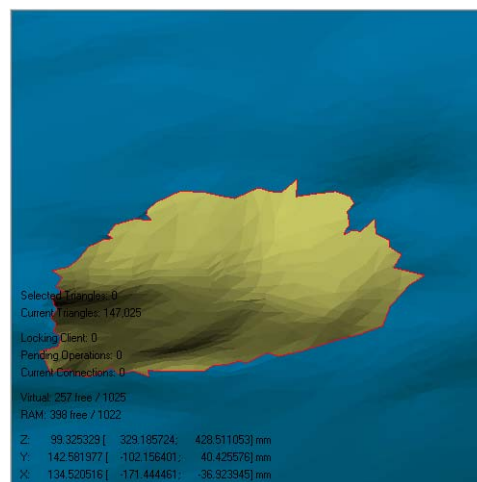
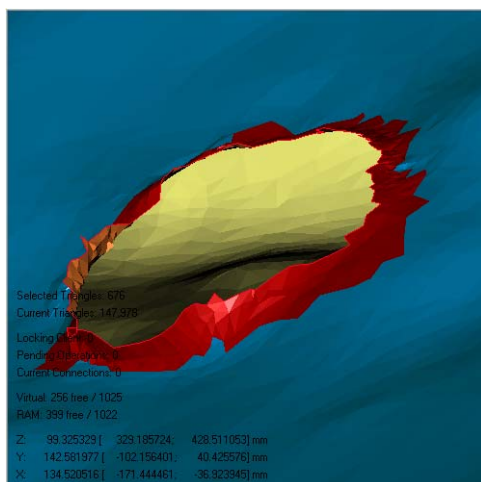
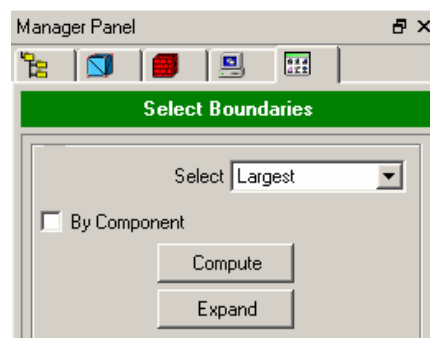
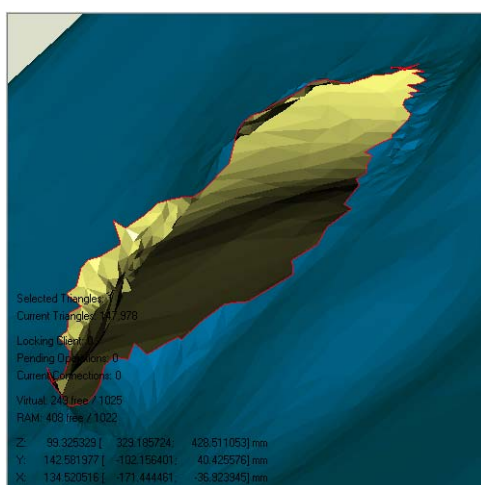
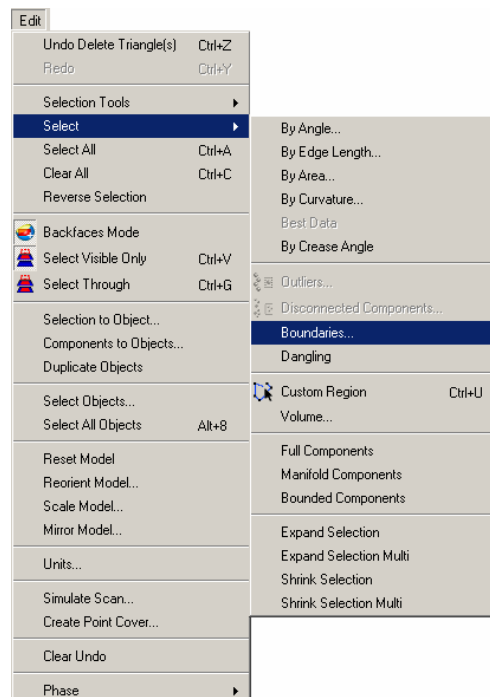


34) Στο δεξιό μέρος της οθόνης μας υπάρχει μια σειρά γραμμών εργαλείων (Selection Tools) που θα μας φανεί πολύ χρήσιμη στην συγκεκριμένη φάση προκειμένου να αναιρέσουμε την ζητούμενη περιοχή. Αρχικά κάνουμε κλικ στο Lasso tool και επιλέγουμε μέρος της ζητούμενης περιοχής όπως φαίνεται παρακάτω. Ακολουθώντας πατάμε delete και διαγράφεται η επιλεγμένη περιοχή. Απαραίτητο επίσης σε αυτή τη φάση είναι να έχουμε κάνει κλικ στο κουμπί **Select Visible**  έτσι ώστε να επιλέξουμε μόνο της ορατές επιφάνειες.



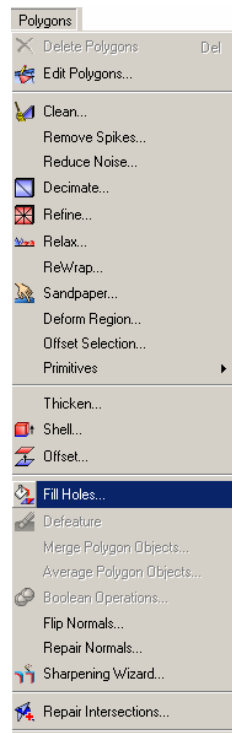
35) Ακολουθώντας χρησιμοποιούμε κατά περίπτωση εργαλεία επιλογής περιοχών από την γραμμή εργαλείων που προαναφέρουμε και ακολουθούμε την παραπάνω διαδικασία μέχρι να εξαλείψουμε πλήρως την ζητούμενη περιοχή.

36) Για δική μας διευκόλυνση μετά την αφαίρεση του μεγαλύτερου μέρους του στηρίγματος και επειδή η γύρω περιοχή της οπής είναι δύσκολο να αφαιρεθεί «χειροκίνητα» κάνουμε κλικ στην επιλογή **Edit→ Select→ Boundaries**. Από το μενού που εμφανίζεται στο αριστερό μέρος της οθόνης κάνουμε κλικ στο **select Largest** (μια και υπάρχει πιθανότητα να υπάρχουν και άλλες οπές μικρότερες σε μέγεθος) και ακολούθως κάνουμε κλικ στο κουμπί **Compute**. Έτσι επιλέγεται η γύρω περιοχή του boundary (κόκκινη γραμμή), κάνουμε κλικ στο OK και εν συνεχεία τη διαγραφούμε πατώντας το **delete**. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί να μην επιλεγεί επιφάνεια που χρήσιμη για τη διαμόρφωση του αντικειμένου μας. Σε αυτήν την περίπτωση προτού πατήσουμε το delete, έχοντας πατημένο το Ctrl κάνουμε κλικ στις επιφάνειες που δεν θέλουμε να διαγραφούν και σταματούν να είναι επιλεγμένες.

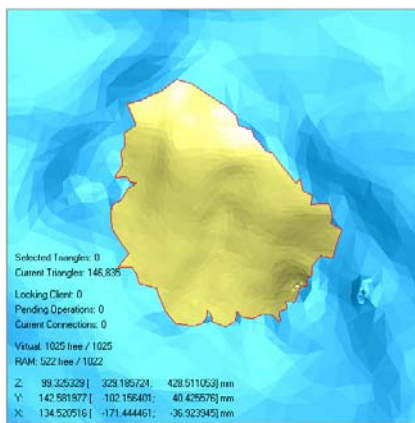
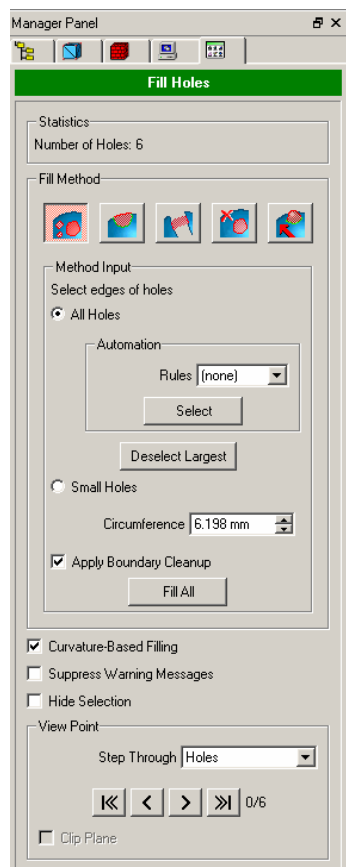




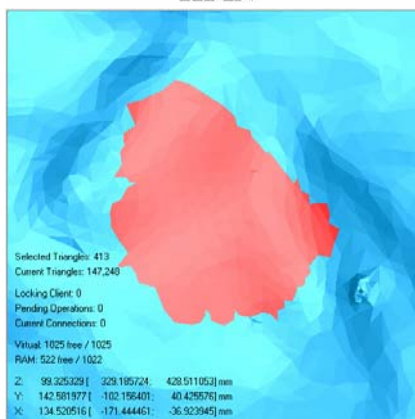
37) Πρωταρχικός στόχος μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας είναι κλείσουμε την οπή που δημιουργήθηκε από την αφαίρεση του στηρίγματος καθώς και άλλες οπές μικρότερου μεγέθους. Έτσι λοιπόν κάνουμε κλικ στο **Polygons**→ **Fill Holes**.



38) Στο αριστερό μέρος τη οθόνης και εμφανίζεται ένα μενού στο οποίο αναγράφεται και ο αριθμός των οπών (Number of Holes:6) τις οποίες καλούμαστε να «γεμίσουμε». Κάνοντας κλικ στα βέλη στο κάτω μέρος του μενού το πρόγραμμα μας οδηγεί μόνο του στις οπές. Έτσι έχοντας επιλέξει για **Fill Method** το **Fill** το οποίο κλείνει απλές τρύπες και κάνοντας κλικ στο boundary της εκάστοτε οπής έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η επιφάνεια η οποία καλύπτει τις οπές εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα. Ακολούθως κάνουμε κλικ στο OK.

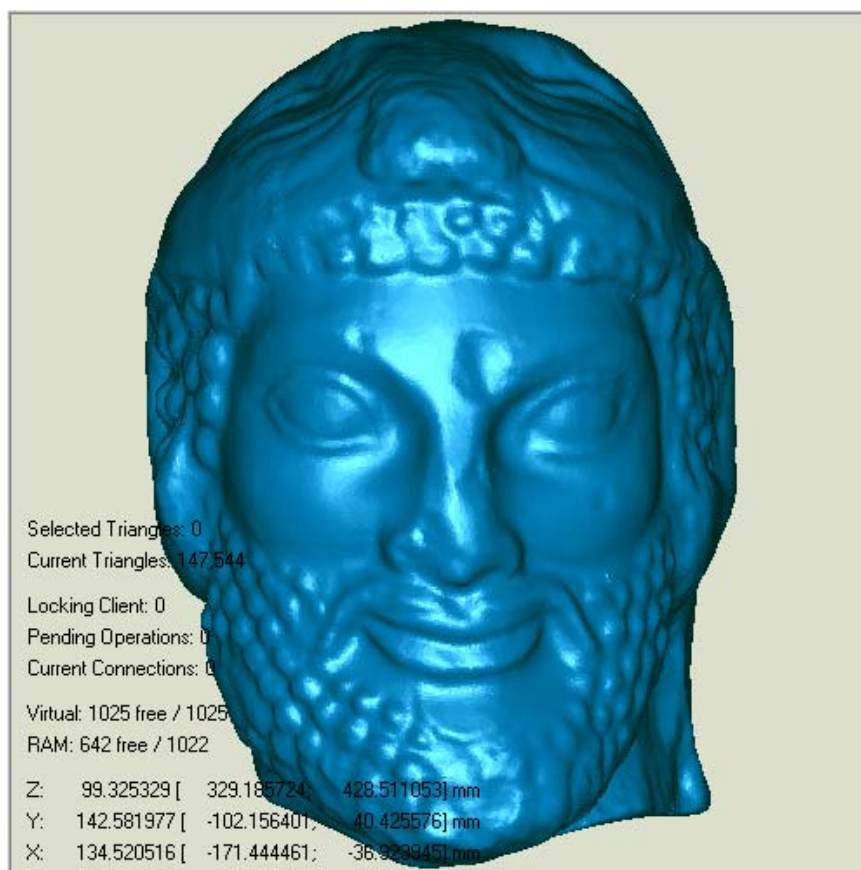


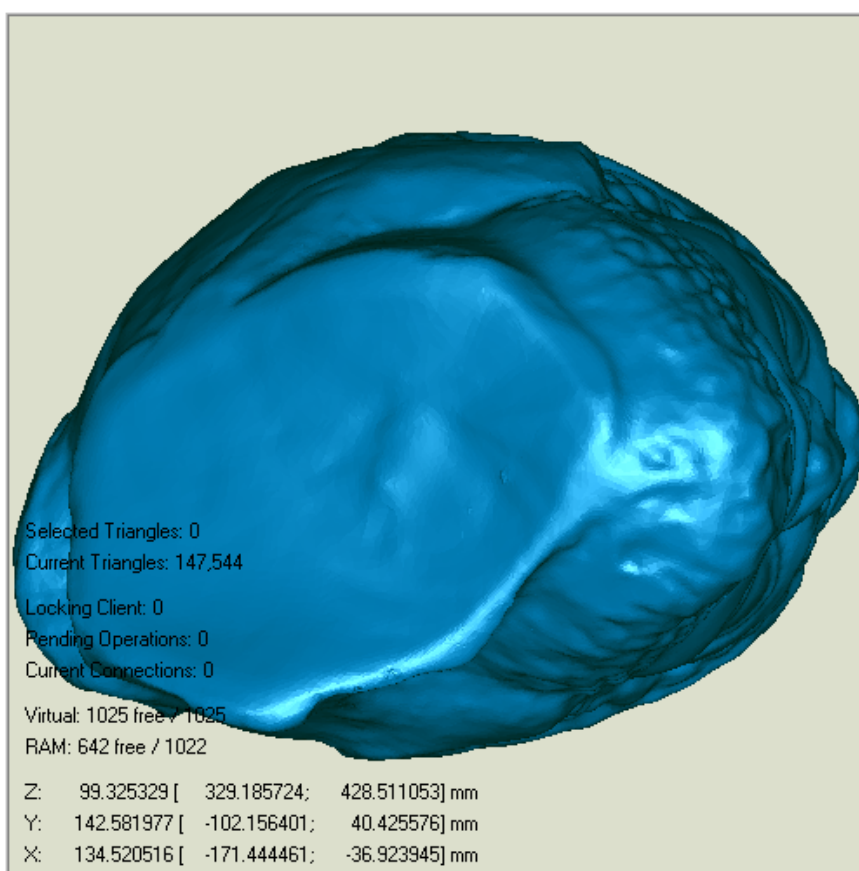
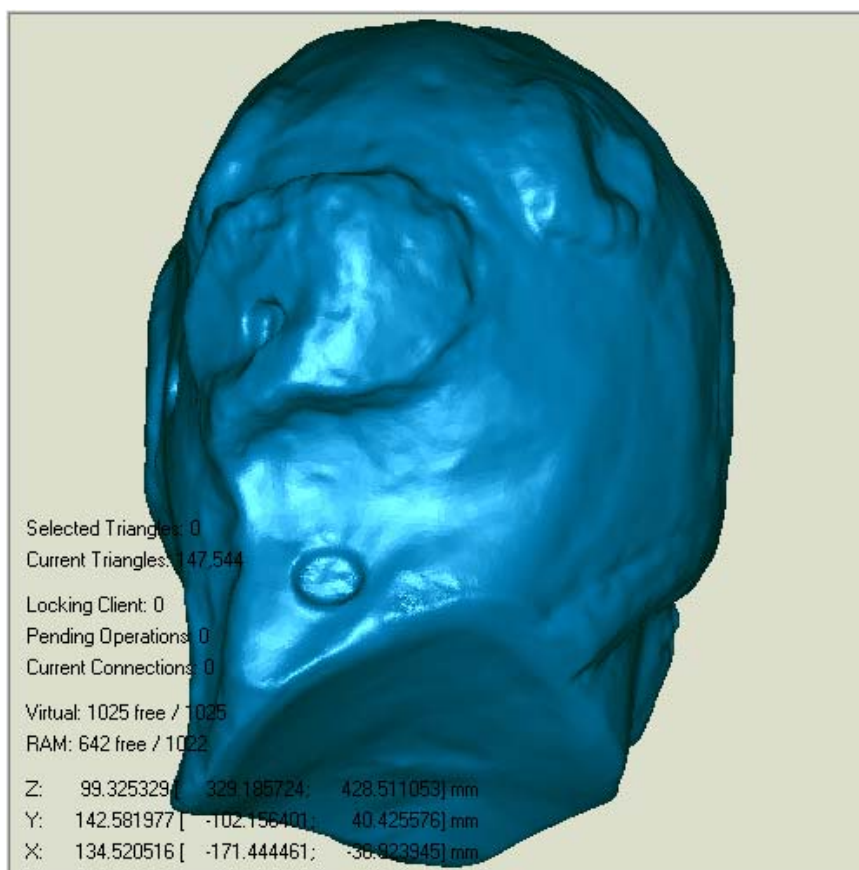
ΠΡΙΝ

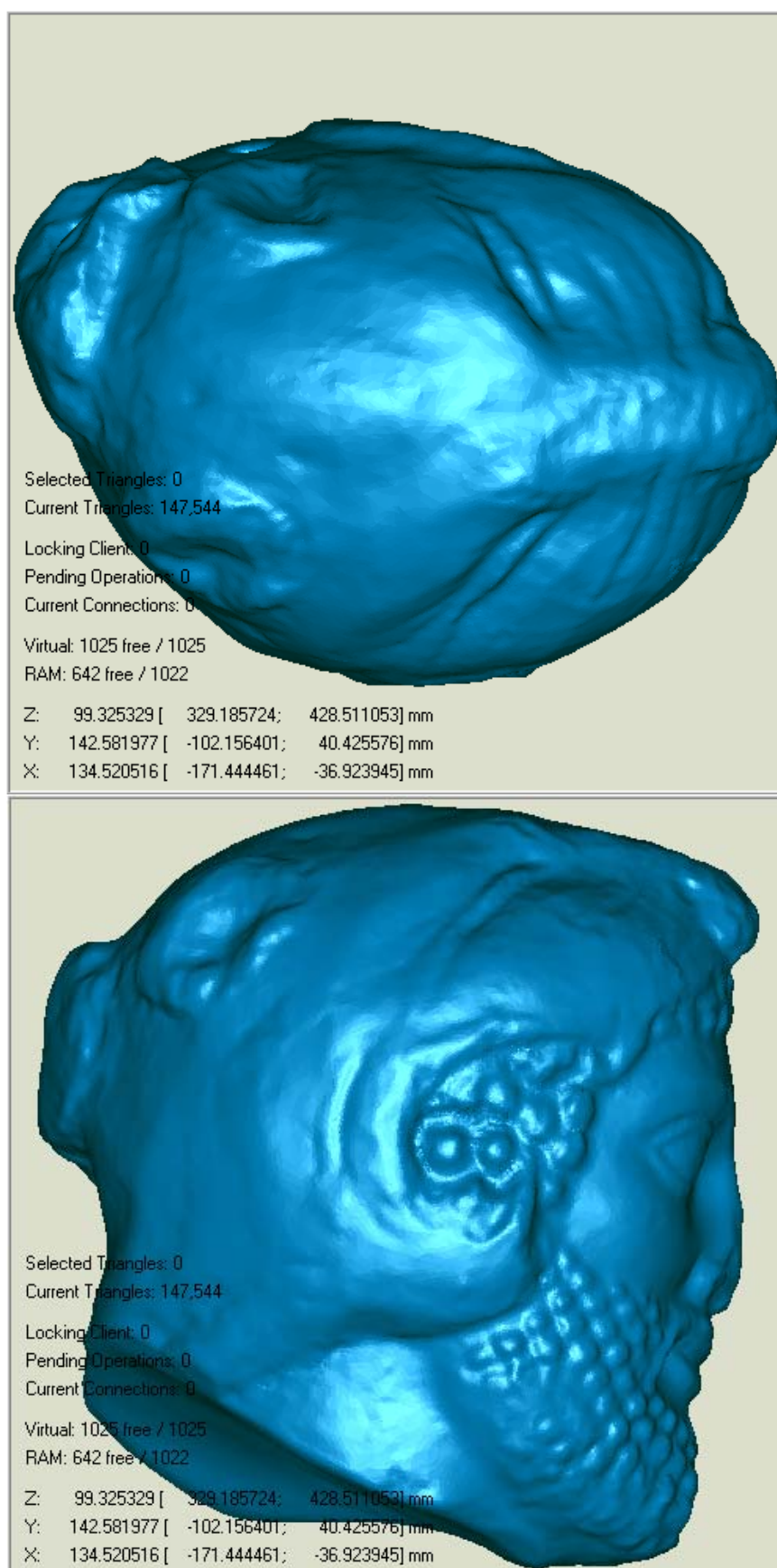


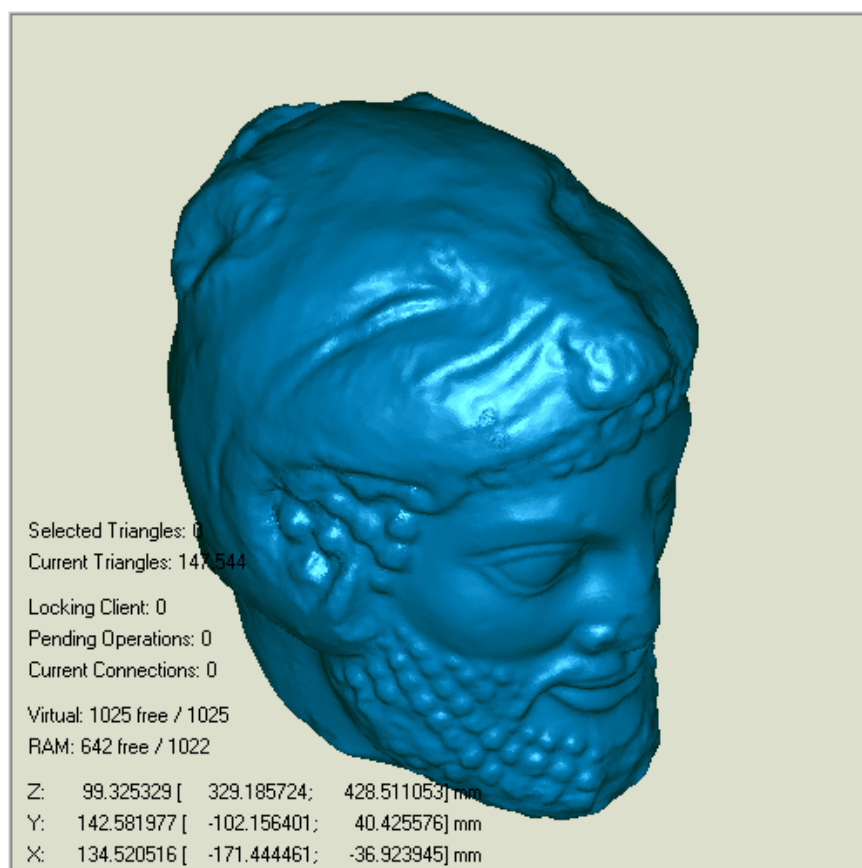
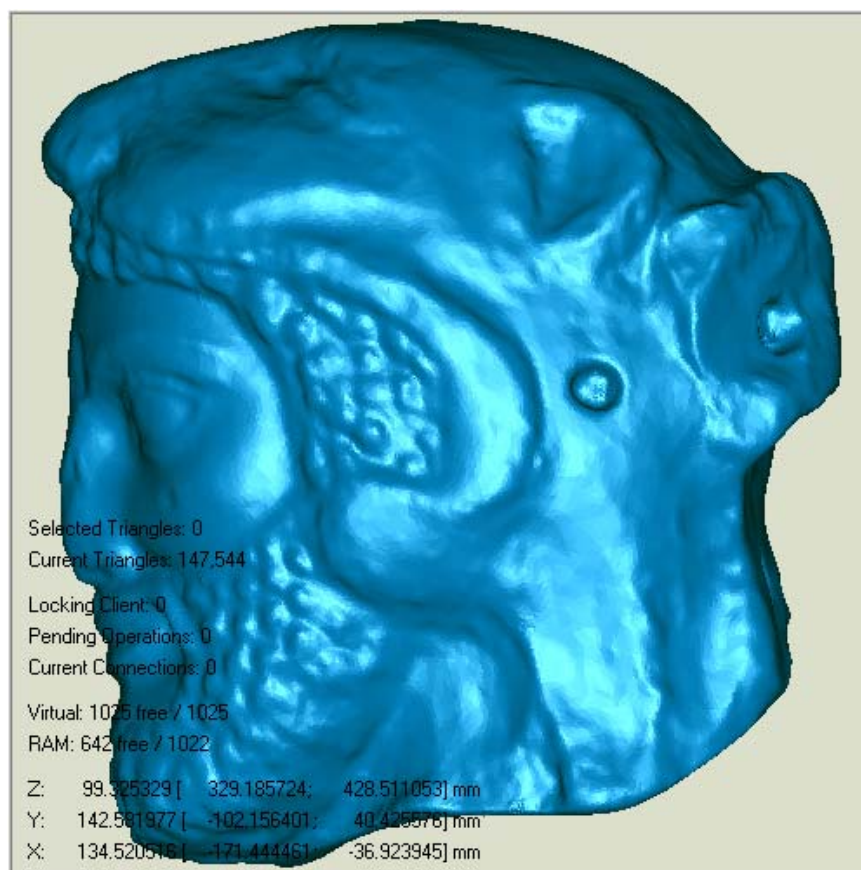
ΜΕΤΑ

39) Σε αυτό το σημείο ουσιαστικά έχει ολοκληρωθεί η σύνθεση του μοντέλου μας, οι όψεις του οποίου φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



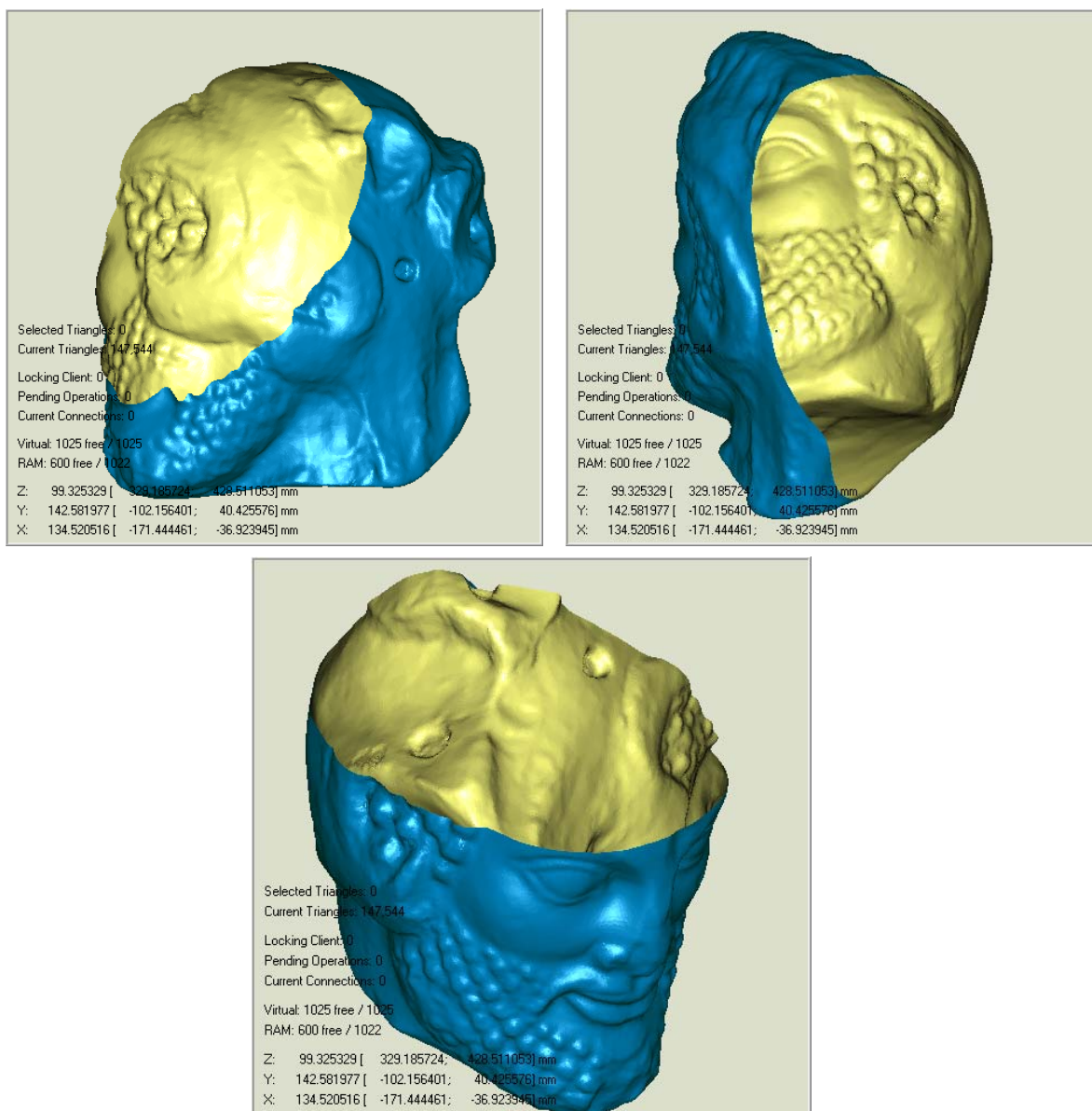








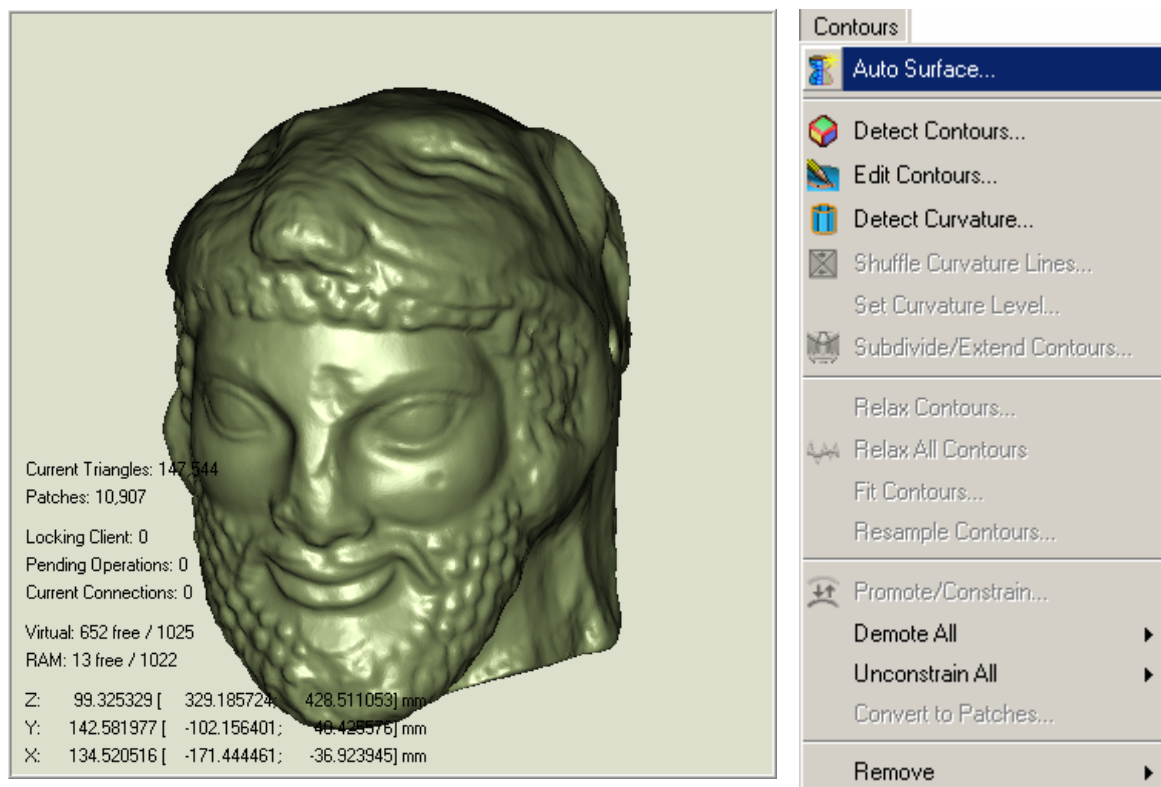
40) Ένας εύκολος τρόπος για ελέγχουμε τη διαμόρφωση του αντικειμένου είναι από το **Display Manager** στο αριστερό μέρος της οθόνης ενεργοποιούμε την επιλογή **Front Plane** και ανάλογα με αυξομείωση του **Depth** (βάθος) μπορούμε να δούμε το εσωτερικό του αντικείμενου όπως φαίνεται παρακάτω.



41) Τέλος για να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε το αντικείμενο μας και από άλλα προγράμματα σχεδιαστικά πρέπει να έχει τη σωστή μορφή δηλαδή να είναι επιφάνεια surface.



42) Κάνουμε κλικ στο κουμπί **Shape Phase** και ακολούθως από το μενού **Contours→Auto Surface**. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα





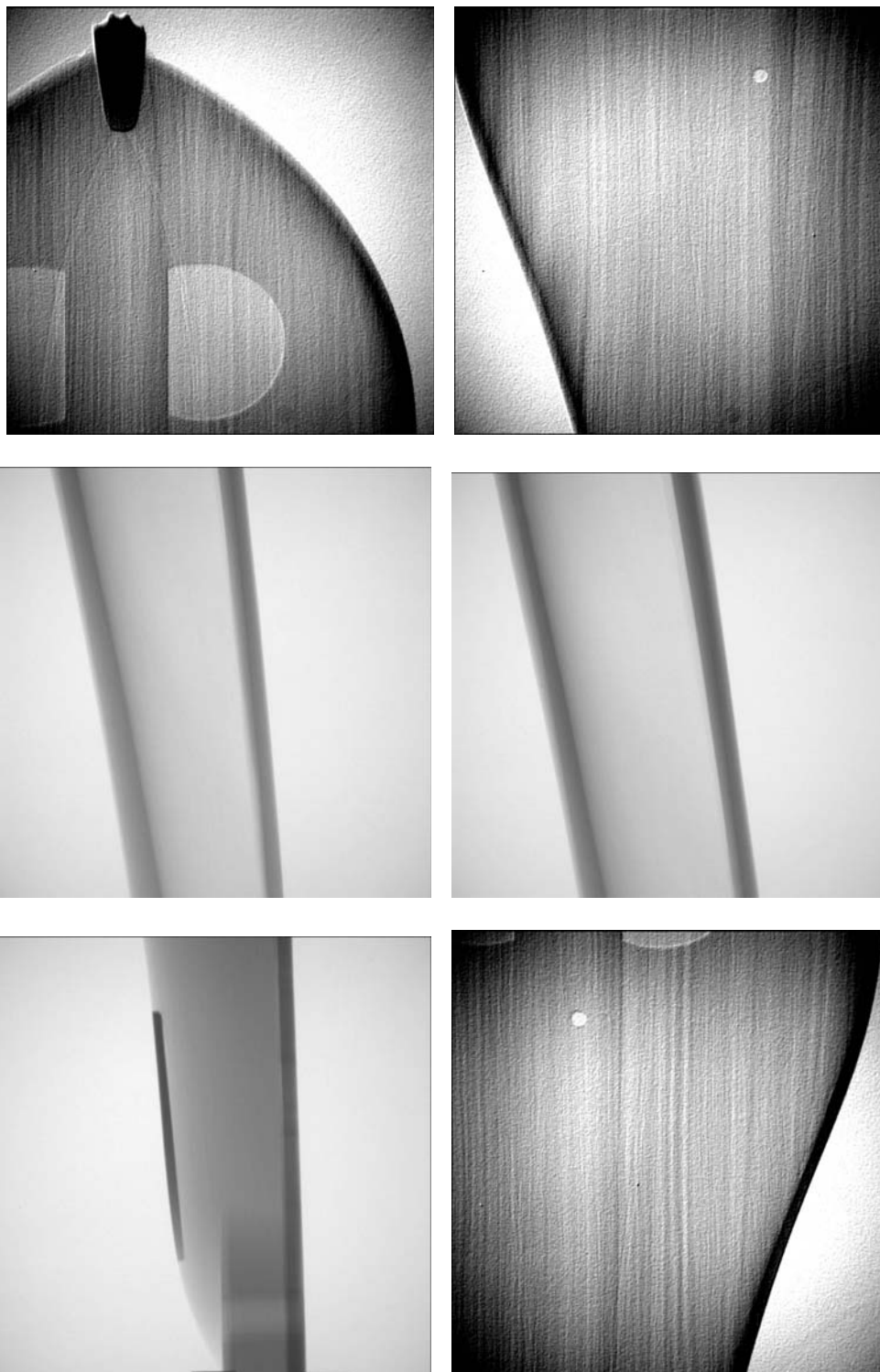
5.3 Εφαρμογή 3 - Ψηφιακή αποτύπωση παραδοσιακού μουσικού οργάνου : Πολίτικη λύρα

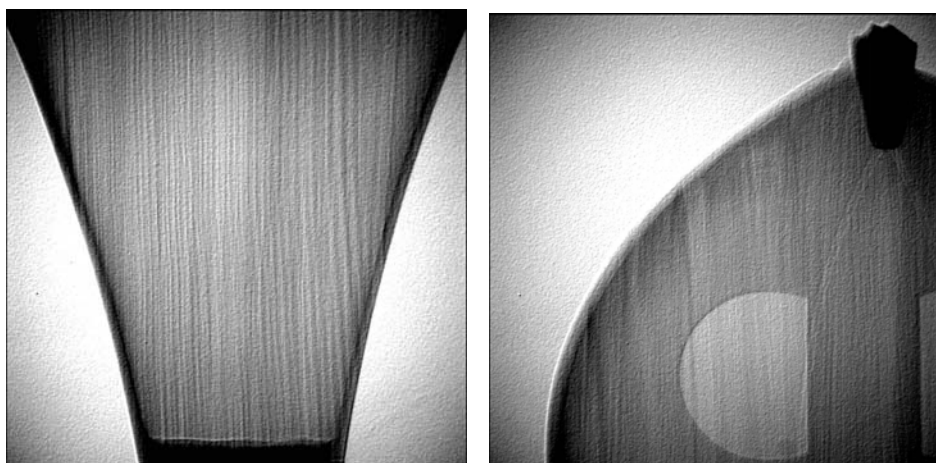
Έτος Κατασκευής: 1980

Κατασκευαστής: Resat Uca, Σμύρνη, Τουρκία

Ύψος 36cm (ενδ.). Παντούκ (σκάφος) – Ξύλο κέδρου (καπάκι)

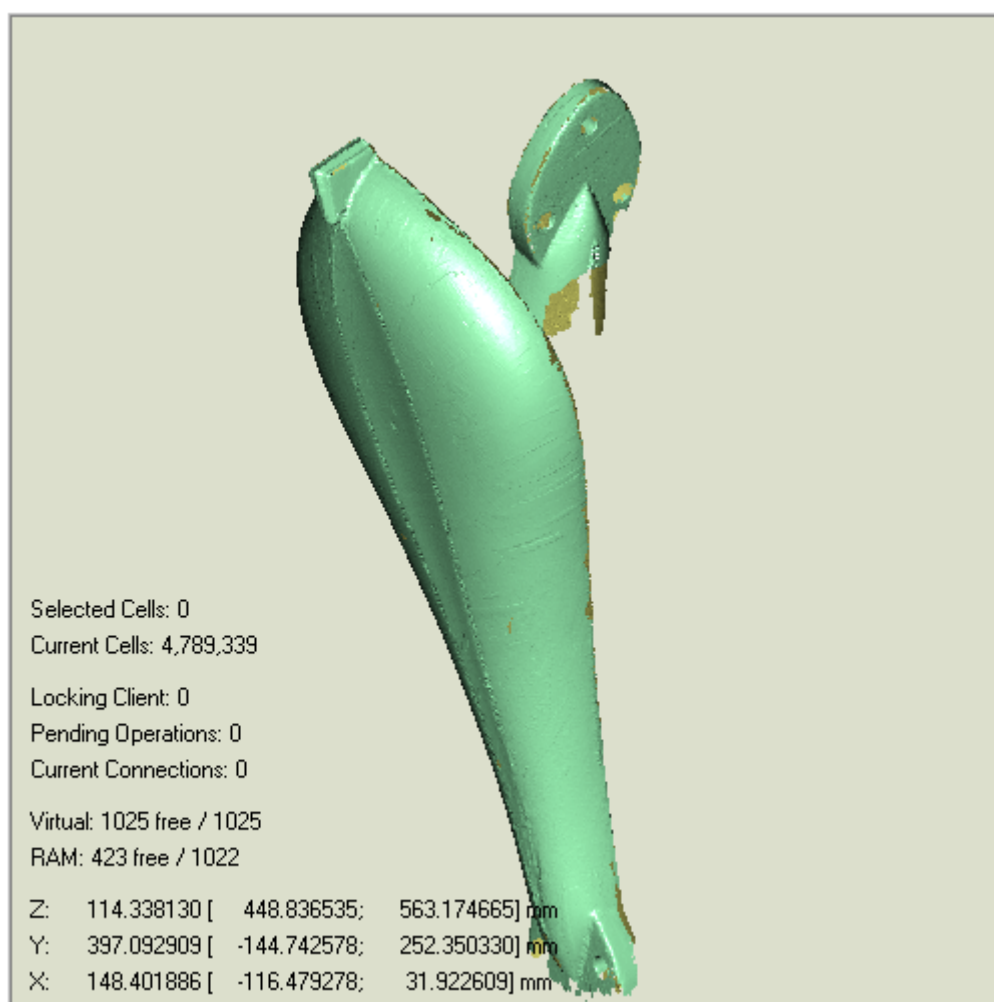
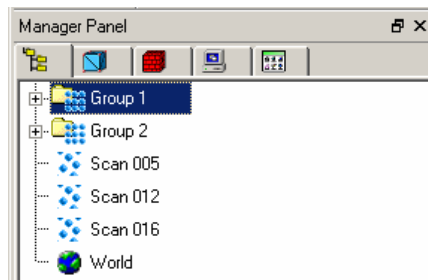
Επειδή η σάρωση των κοίλων διαμορφώσεων και των εσωτερικών επιφανειών του αντικειμένου μας με το Faro Arm ήταν αδύνατη και προκειμένου να έχουμε μια εικόνα για την εσωτερική του διαμόρφωση κάναμε χρήση βιομηχανικού εξοπλισμού μη καταστροφικού ελέγχου με ακτίνες X (*industrial X-ray inspection system*) τύπου YXLON MU2000. Οι εικόνες λήψης με τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας φαίνονται παρακάτω:





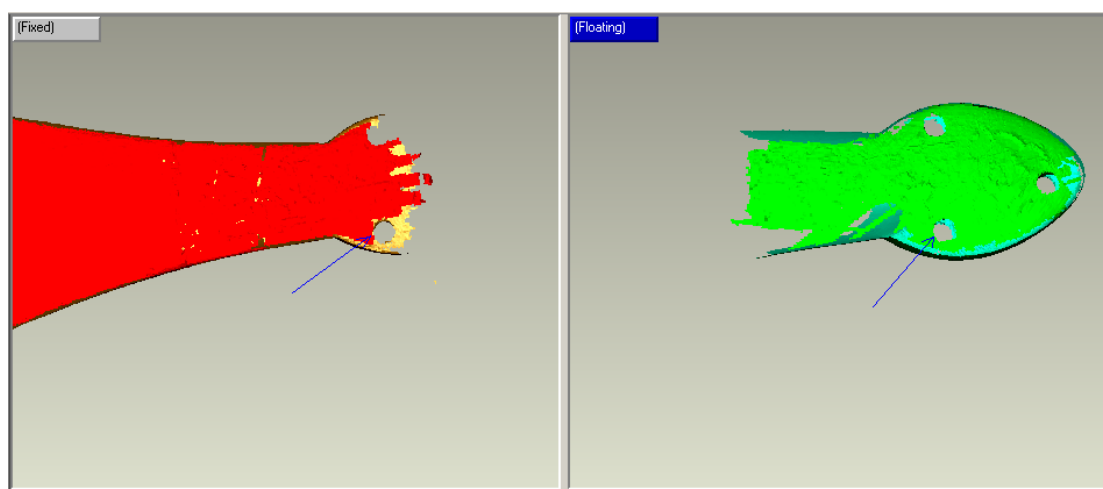
Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία με αυτή που ακολουθήσαμε και για την κεφαλή του Ηρακλή είχαμε τα ακόλουθα αποτελέσματα

1) Αρχικά στερεώσαμε με το αντικείμενο μας σε μια μέγγενη προκειμένου να έχουμε μεγάλη σταθερότητα και για το λόγω αυτό δημιουργήθηκαν δύο ομάδες scans έτσι ώστε να σαρώσουμε και τα δύο μέρη του αντικειμένου. Σε αυτή την περίπτωση δεν ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία με προηγουμένως δηλαδή να μετακινήσουμε το αντικείμενο μας προκειμένου να διευκολυνθεί ο χρήστης στη συγκεκριμένη διαδικασία. Ο λόγος είναι ότι δεν θα ήταν εύκολη η μετέπειτα διαδικασία του registration λόγω της μη ύπαρξης κοινών τόπων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σημεία.

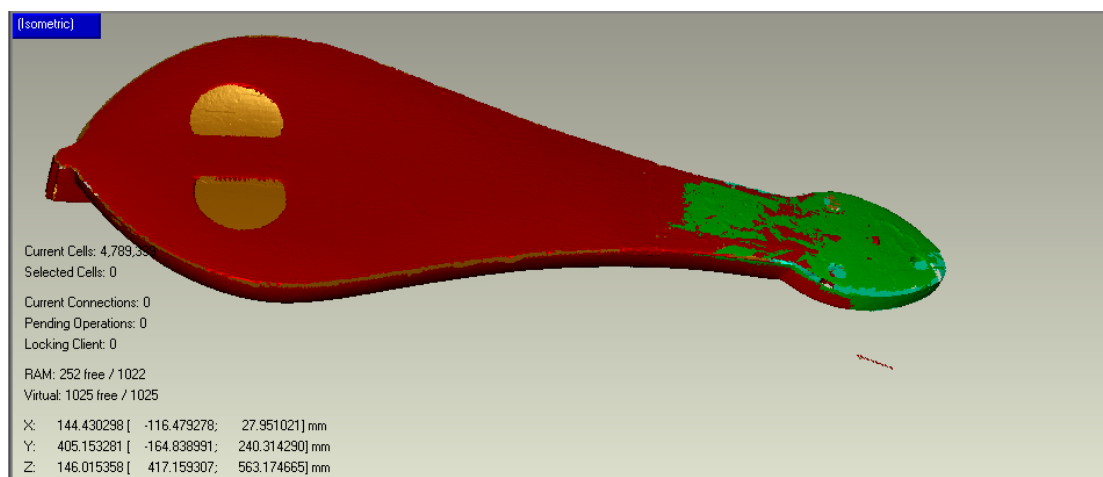




2)Manual Registration. Το **Point registration** που χρησιμοποιήσαμε σε αυτήν την περίπτωση είναι η κόγχχη της οπής που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα

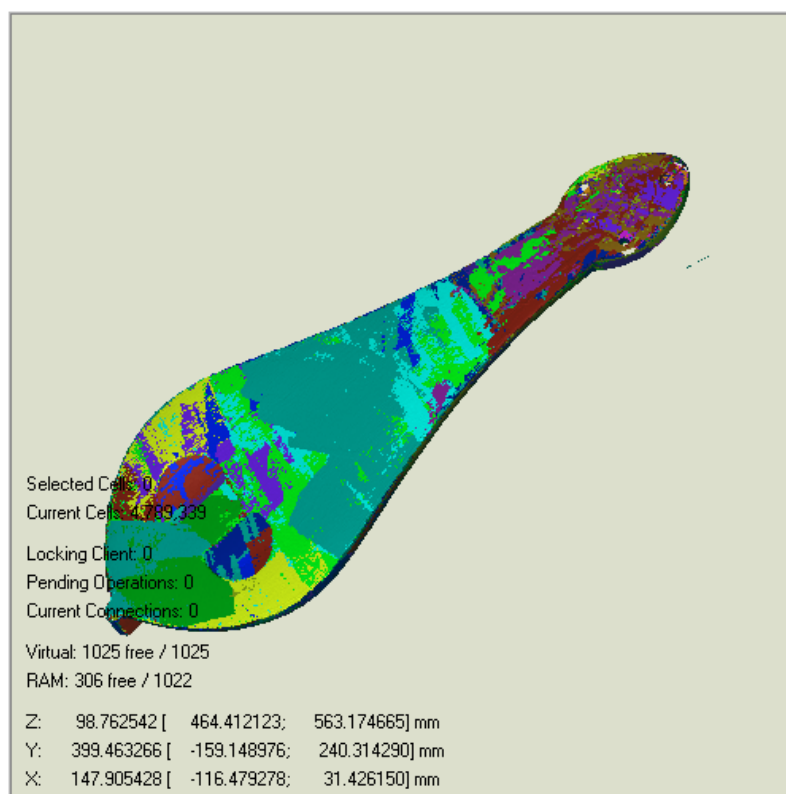


Registered

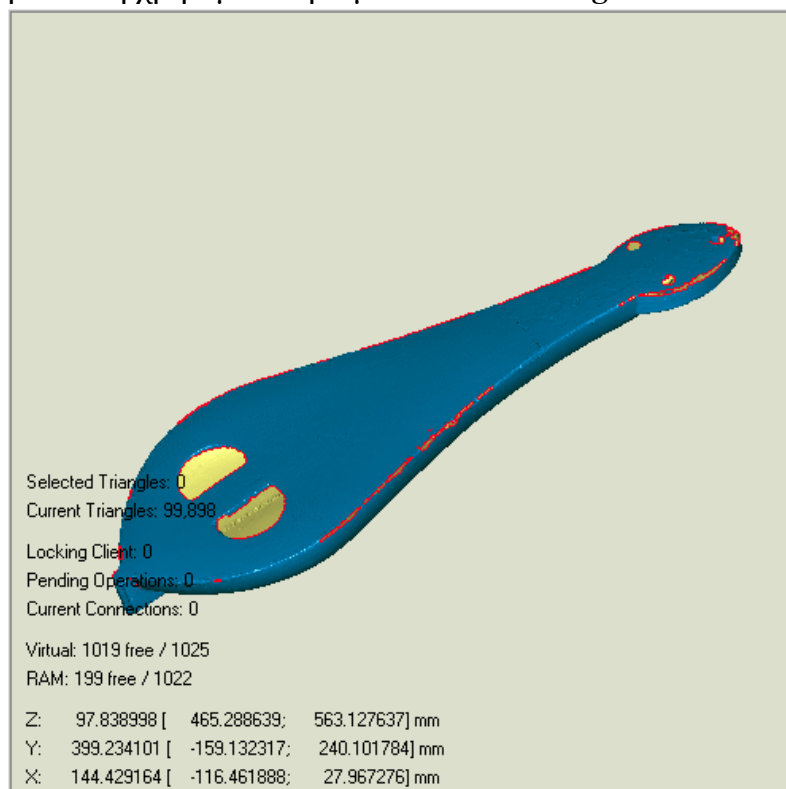




3)Global Registration. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα διαφορετικά scans που έχουν γίνει.

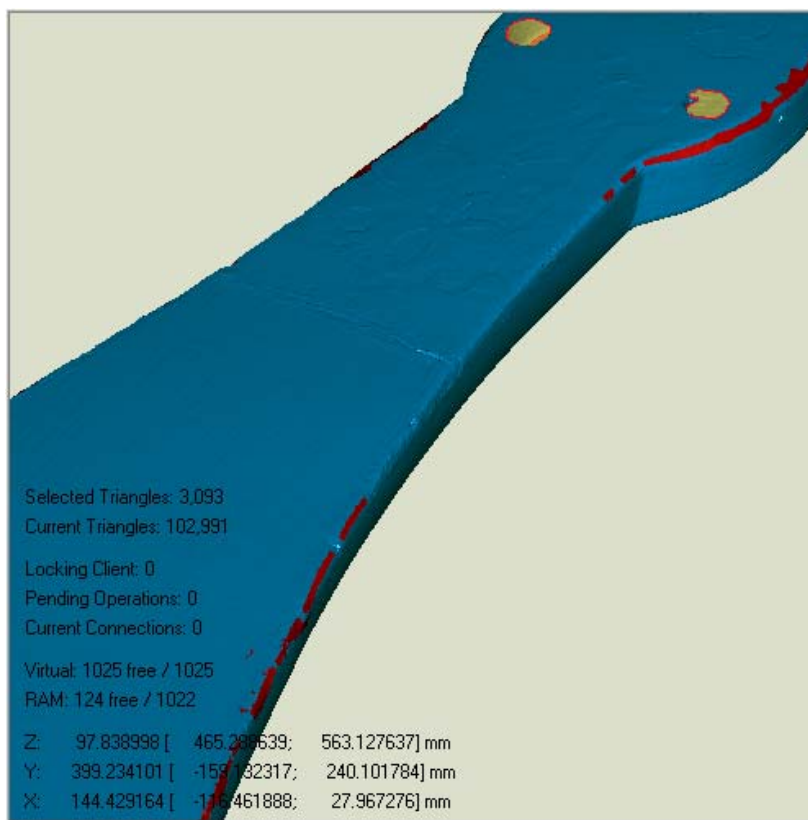


4)Merge. Ακολούθως φαίνεται το μοντέλο μας μετά την μίξη των scans. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήσαμε 100.000 triangles.

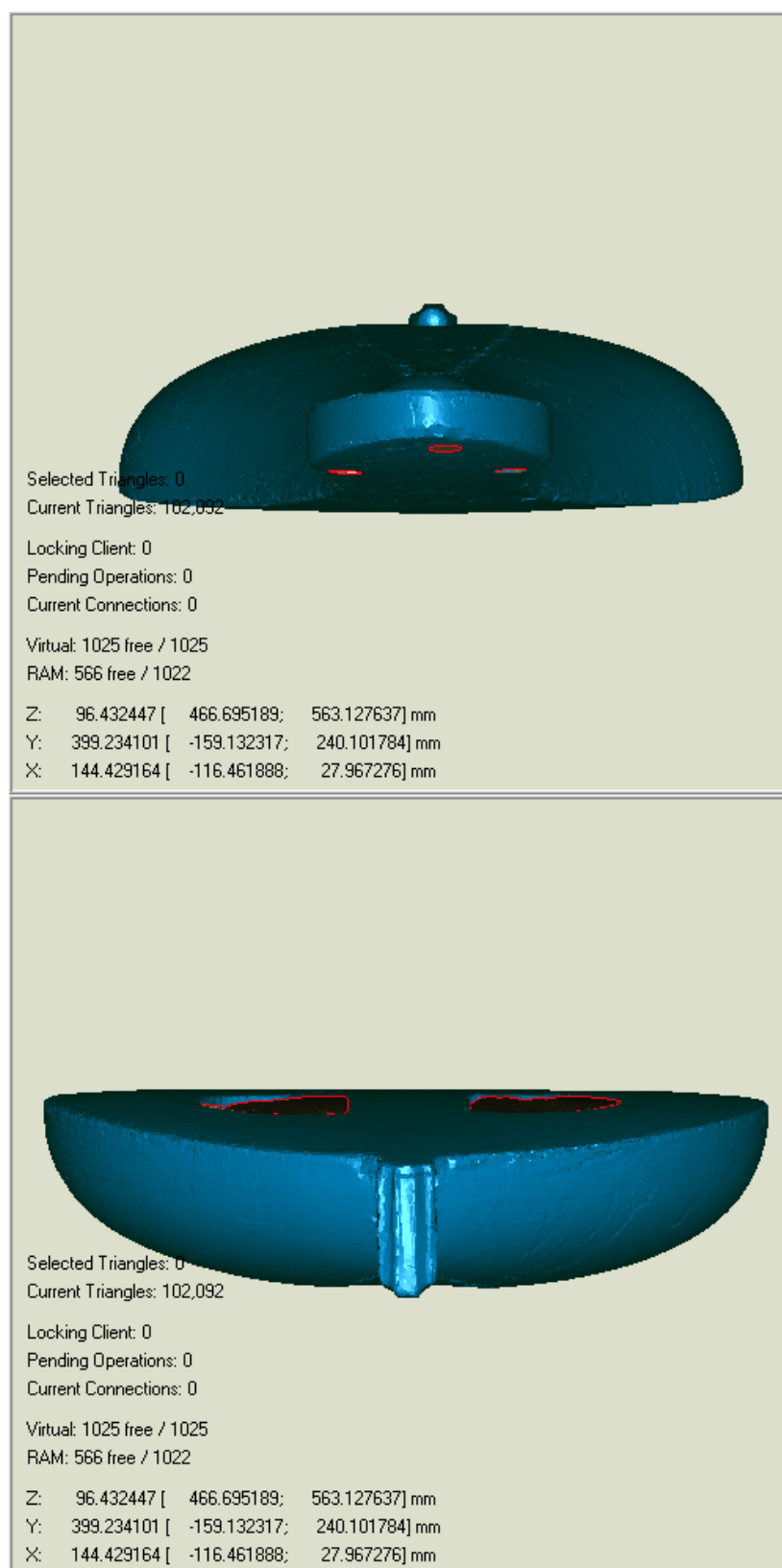


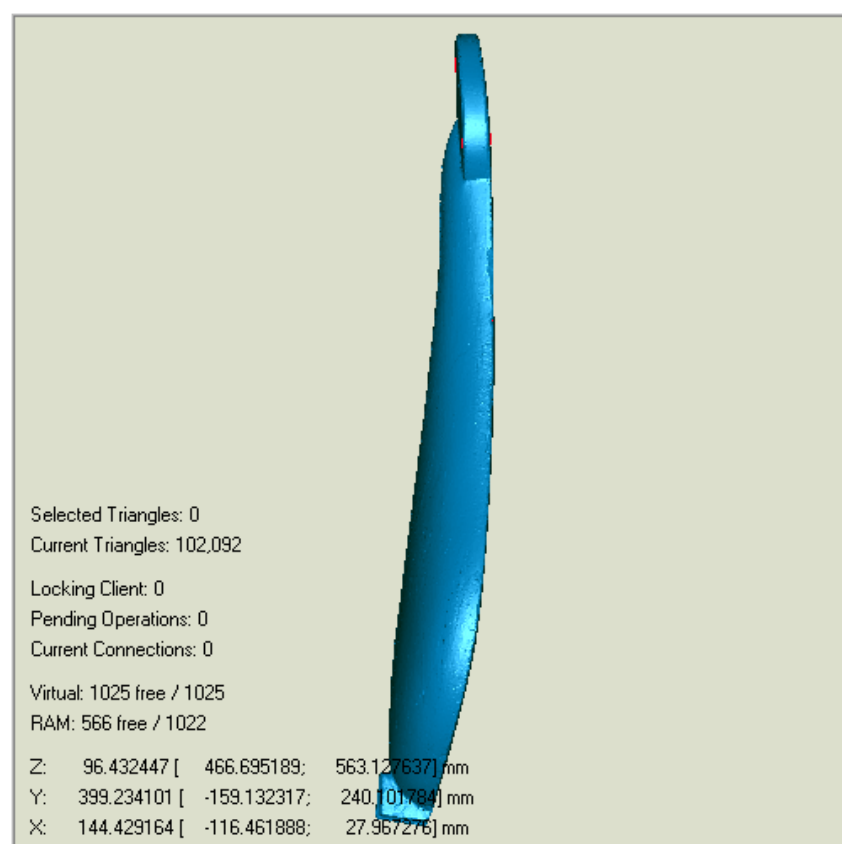
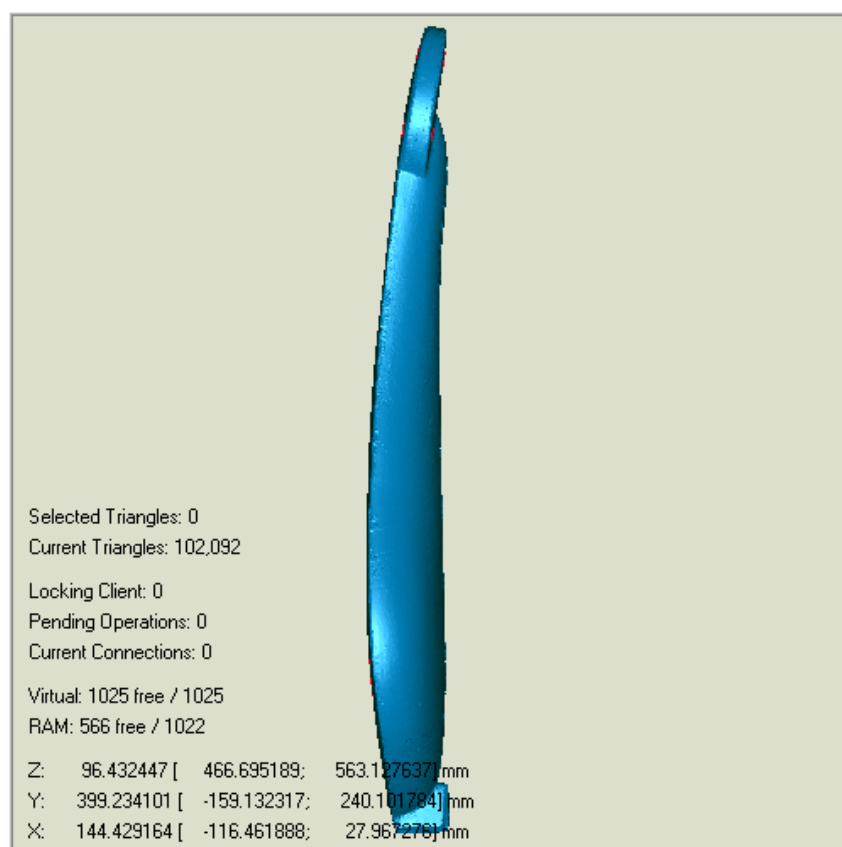


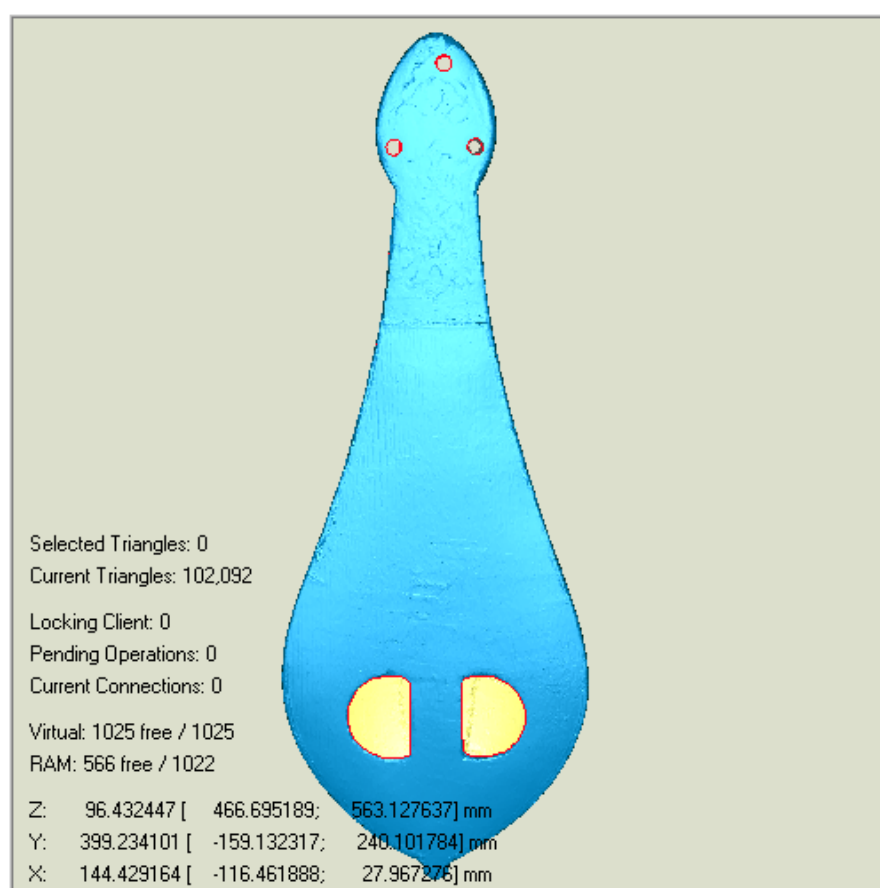
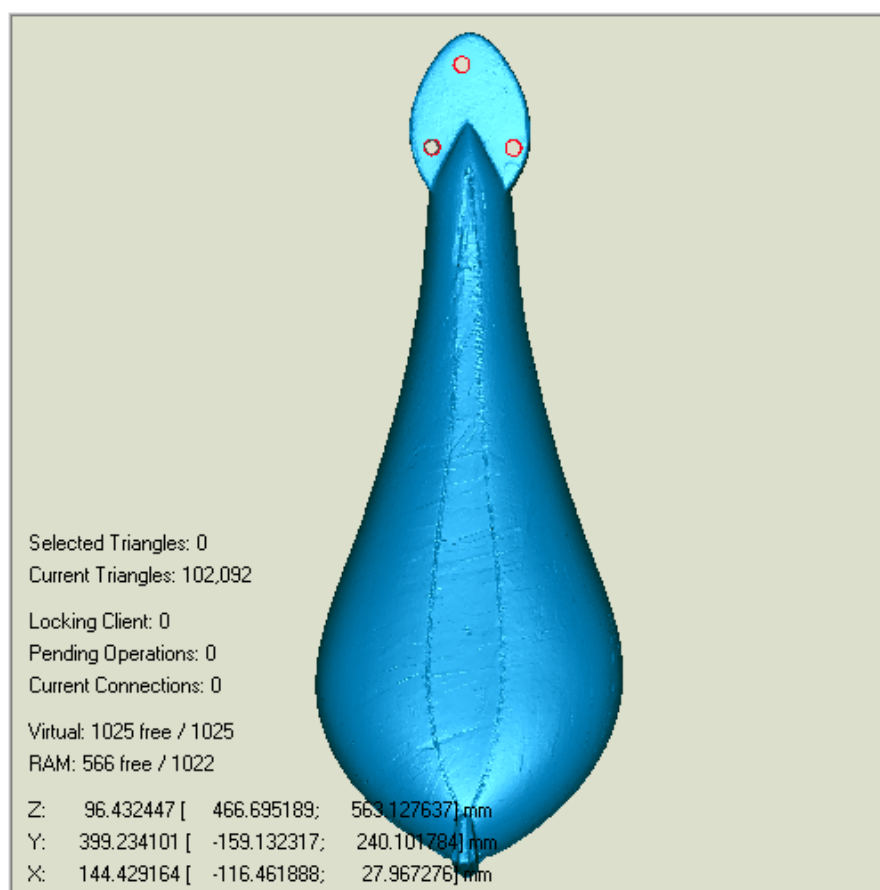
5) Fill Holes. Εν συνεχεία «κλείσαμε» τις οπές που είχαν δημιουργηθεί (κόκκινο χρώμα).

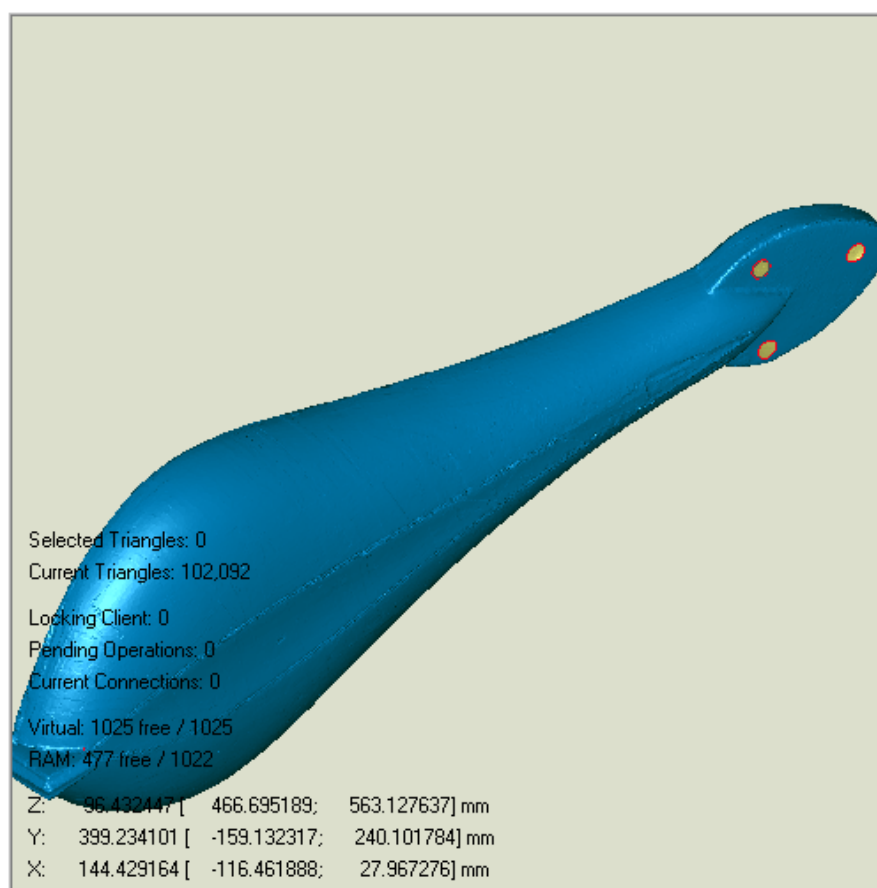


6) Το αντικείμενο μας φαίνεται παρακάτω αναλυτικά από όλες τις όψεις









Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα–Μελλοντικές Προοπτικές Έρευνας

Για τη σάρωση των αντικειμένων που παρουσιάστηκαν στις εφαρμογές κάναμε χρήση δύο διαφορετικών μεθόδων αποτύπωσης μια και τα δεδομένα τα οποία συλλέξαμε είναι δύο διαφορετικών τύπων (raw data, ordered data). Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα raw data ουσιαστικά εμφανίζονται στην οθόνη του H/Y σαν νέφος σημείων (cloud of points) εν αντιθέσει με τα ordered data τα οποία εμφανίζονται σαν κελιά (cells). Βέβαια το ότι χρησιμοποιήσαμε διαφορετικά είδη δεδομένων για κάθε περίπτωση δεν σημαίνει ότι δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν οι εφαρμογές μας. Ωστόσο η επιλογή σάρωσης των αντικειμένων με το συγκεκριμένο τύπο δεδομένων κατά περίπτωση δεν έγινε τυχαία.

Το κάθε είδος δεδομένων έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του. Η σάρωση-συλλογή δεδομένων raw data πλεονεκτεί από πλευράς ταχύτητας μια και η ακτίνα λέιζερ δεν είναι απαραίτητο να σαρώσει όλη την επιφάνεια εν αντιθέσει με την περίπτωση των ordered data όπου η σάρωση είναι αρκετά πιο χρονοβόρα. Ωστόσο η μετέπειτα επεξεργασία των raw data είναι αρκετά πιο χρονοβόρα σε σχέση με τη διαδικασία αποτύπωσης των ordered data ανεξάρτητα από το ότι η δεύτερη έχει περισσότερα βήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση των raw data έχουμε πολύ περισσότερο θόρυβο και κατά συνέπεια πολύ περισσότερη εργασία από των χρήστη μιας και ο θόρυβος αυτός δεν μπορεί να αφαιρεθεί αυτοματοποιημένα αλλά χειροκίνητα.

Η επιλογή της μεθόδου σάρωσης-επεξεργασίας δεν αφορά μόνο στην ταχύτητα διεκπεραίωσης της εκάστοτε εφαρμογής όσο την αποτελεσματικότητα - λειτουργικότητα της.

Τα ordered data αφορούν αντικείμενα μεγάλου μεγέθους (π.χ. αγάλματα) ή μεγάλης πολυπλοκότητας ως προς το σχεδιασμό όπως είναι η κεφαλή του Ηρακλή τα οποία είναι αρκετά δύσκολο να σαρώσουμε χωρίς να μετακινήσουμε το αντικείμενο έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη γωνία λήψης. Μετακινώντας βέβαια τα αντικείμενα αυτά χάνεται προσωρινά ο προσανατολισμός των επιφανειών αλλά επανέρχεται με την τεχνική της «ευθυγράμμισης» (registration) των επιφανειών που αναφέραμε παραπάνω. Αυτή η διαδικασία δεν μας διευκολύνει σε αντικείμενα που αποτελούνται από απλούστερες επιφάνειες όπως είναι το ειδώλιο καθώς δεν υπάρχουν κοινά ιδιαίτερα χαρακτηριστικά σημεία. Έτσι σε αυτή περίπτωση γίνεται χρήση της μεθόδου των raw data.

Σε περίπτωση αντικειμένων με κοίλα και εσωτερικές διαμορφώσεις όπως είναι η πολιτική λύρα δεν είναι εφικτή η σάρωση των συγκεκριμένων επιφανειών με το Faro Arm. Για το λόγω αυτό κάναμε χρήση άλλων τεχνολογιών όπως είναι οι ακτίνες X-ray.

Εν κατακλείδι οι μέθοδοι που ακολουθήσαμε πραγματοποιώντας τις εφαρμογές που αναφέραμε είναι πιο συμφέρουσες σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους αποτύπωσης όπως είναι τα εκμαγεία.

Οι λόγοι είναι ότι μπορεί τα εκμαγεία να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια αποτύπωσης όπως είναι υφές των αντικειμένων πράγμα που δεν συμβαίνει με την ψηφιακή αποτύπωση αλλά υστερούν σε άλλους τομείς. Το κυριότερο είναι ότι το υλικό εκμάγευσης έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο και μάλιστα ιδιαίτερης πολιτιστικής αξίας υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης φθοράς εν αντιθέσει με την ψηφιακή αποτύπωση όπου το αντικείμενο παραμένει ανέπαφο και η αποτύπωση και αναπαραγωγή του είναι πιο εύκολη και λιγότερο χρονοβόρα με τις σύγχρονες μεθόδους ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων.

Από τη συνολική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι διαμορφώνεται ένα ευρύ επιστημονικό/ ερευνητικό πεδίο με αντικείμενο τη συστηματική μελέτη και αξιολόγηση όλων των φάσεων της διαδικασίας της ψηφιακής τεκμηρίωσης πολιτιστικών αντικειμένων, από την αποτύπωση και τη δημιουργία του στερεού ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD έως την παραγωγή και τον έλεγχο των παραγόμενων αρχείων τεκμηρίωσης, πιστών αντιγράφων, σχεδιασμού εναλλακτικών λύσεων στήριξης, συσκευασίας, κλπ. στο οποίο ο ρόλος και η εμπλοκή του μηχανολόγου μηχανικού είναι καθοριστικές.

Για την ποσοτική έκφραση της πιστότητας του λαμβανόμενου ψηφιακού μοντέλου, της ακρίβειάς του, ή – με τους όρους της σύγχρονης μετρολογίας – της συνολικής αβεβαιότητάς του είναι απαραίτητος ο συνυπολογισμός όλων αυτών των παραγόντων και η χρήση μεθοδολογιών που βασίζονται στις γενικές κατευθύνσεις του «Οδηγού για τον υπολογισμό της Αβεβαιότητας Μετρήσεων» (*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement – GUM*) του διεθνούς οργανισμού προτύπων ISO. Η σημασία του επιστημονικά τεκμηριωμένου υπολογισμού του παραπάνω μεγέθους είναι προφανής για την ποιότητα και την επιτυχία της ψηφιακής τεκμηρίωσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Η διερεύνηση του σημαντικού αυτού πεδίου ανήκει στις προτεινόμενες κατευθύνσεις συνέχισης της Διπλωματικής Εργασίας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Γ.-Φοίβος Σαργέντης, *Η χρήση και η συμπεριφορά των υλικών στην γλυπτική*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2005.
- [2] Μ.Μ. Σφαντζικόπουλος, *Σχεδιασμός Μηχανολογικών Κατασκευών II*, Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.
- [3] Θ. Βασιλόπουλος, *Αντίστροφος Σχεδιασμός Αντικειμένων Πολύπλοκης Γεωμετρίας σε περιβάλλον CMM – CAD*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2003.
- [4] Massimiliano Pieraccini, Gabriele Guidi, Carlo Atzeni, *3D digitizing of cultural heritage*, Journal of Cultural Heritage, (2), pp. 63-70, 2001.
- [5] G. Godin, J.-A. Beraldin, J. Taylor et al., *Active Optical 3D Imaging for Heritage Applications*, IEEE Computer Graphics and Applications, 22 (5), pp. 24-34, 2002.
- [6] F. Bernardini, H. E. Rushmeier, I. M. Martin, J. Mittleman, G. Taubin, *Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta*, IEEE Computer Graphics and Applications, 22 (1), pp.59-67, 2002.
- [7] Raffaella Fontana, Marinella Greco, Marzia Materazzi, Enrico Pampaloni, Luca Pezzati, Claudio Rocchini, Roberto Scopigno, *Three-dimensional modelling of statues: the Minerva of Arezzo*, Journal of Cultural Heritage 3 (2002) pp.325-331
- [8] C.G.Provatidis, M.M. Sfantsikopoulos, *An approach for computational NDT of Archaeological Structures*, 3rd Intern. Conf. NDT (HSNDT), 15 – 17 OCT 2003.
- [9] Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., *The potential of non – contact close range laser scanners for cultural heritage recording*, Proceedings of CIPA International Symposium, Potsdam, September 18-21, 2001.
- [10] F.Berbardini H. Rushmeier. *The 3D Model acquisition pipeline*, Computer Graphics Forum, 21(2):149-172, June 2002.
- [11] W. Bohler, M. Bordas Vicent, G. Heinz, A. Marbs and H.Muller, *High quality Scanning and modeling of Monuments and Artifacts*, FIG, Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004.
- [12] Henz G., *Pharaoh Pepi I: Documentation of the oldest known life-size metal sculpture using laser scanning in surveying and photogrammetry*. In proceedings of CIPA WG6 International Workshop, September 1-2, Corfu, Greece

- [13] G. Vozikis, A. Haring, E. Vozikis and K.Kraus, *Laser Scanning: A new method for recording and documentation in Archaeology*, FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004.
- [14] M.Ioannides, A.Wehr, *3D Reconstruction & Re-production in Archaeology*, Scanning for Cultural Heritage Recording, September 1-2, 2002.
- [15] Kaisarlis, G.J., Diplaris, S.C. and Sfantsikopoulos, M.M., Size scale in 3D Digital Documentation of cultural heritage objects, *Proc. of 6th International Conference for MESOMECHANICS*, Patras, Greece, May 31 – June 4, 2004, pp.169 – 173.
- [16] Kaisarlis, G.J., Diplaris, S.C. and Sfantsikopoulos, M.M., Identifying and Quantifying accuracy requirements for cultural heritage digital 3D object documentation, *Proc. of ITECOM Conference*, Athens, Greece, 16 – 17 Dec., 2003, ITECOM CD Proceedings.
- [17] <http://www.faro.com/>
- [18] <http://forum.geomagic.com/>