



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

**Τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση και
αποκατάσταση αντικειμένων πολιτιστικής
κληρονομιάς: εφαρμογή σε μαρμάρινη φιάλη**



Διπλωματική εργασία

Γαβρά Θεοδώρα-Ιουλία

Επιβλέπων: Χρ. Προβατίδης

Αθήνα 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου

**Τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση και
αποκατάσταση αντικειμένων πολιτιστικής
κληρονομιάς: εφαρμογή σε μαρμάρινη φιάλη**

Διπλωματική εργασία

Γαβρά Θεοδώρα-Ιουλία

Επιβλέπων: Χρ. Προβατίδης

Αθήνα 2016

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Χριστόφορο Προβατίδη αλλά και στον κ. Γιώργο Καϊσαρλή, Διδάκτορα Μηχανολόγο Μηχανικό και στέλεχος του παραπάνω Εργαστηρίου, για την αρωγή και την κατανόησή τους.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον για τη στήριξη που μου παρείχαν.

Περίληψη

Στη σημερινή κοινωνία, η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αποτελεί μια μέθοδο αποτύπωσης και γεωμετρικής τεκμηρίωσης αντικειμένων και χώρων, η οποία είναι χρήσιμη για τη δημιουργία ψηφιακών βιβλιοθηκών, την κατασκευή αντιγράφων ορισμένων αντικειμένων, την αποτύπωση του χρώματος αλλά και της ακριβούς γεωμετρίας ενός αντικειμένου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με τη χρήση μεθόδων Αντίστροφης Μηχανικής, η περαιτέρω επεξεργασία τους με τη βοήθεια τρισδιάστατων πακέτων λογισμικού και τέλος, η τρισδιάστατη εκτύπωσή τους.

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, διαπιστώθηκε πως η τρισδιάστατη μοντελοποίηση ενός αντικειμένου δεν μπορεί να γίνει με πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες, καθώς πολλές φορές ο χρήστης καλείται να πάρει αποφάσεις μοντελοποίησης. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση ενός ανασχηματισμού, για παράδειγμα, ενός αντικειμένου, ή μιας επιδιόρθωσης.

Πίνακας εύρεσης εικόνων

Εικόνα 1	Η χρονολογική πρόοδος των μεθοδολογικών διαστάσεων	13
Εικόνα 2	Τρισδιάστατος σαρωτής χειρός σε λειτουργία	16
Εικόνα 3	Βασικός διαχωρισμός τεχνικών οπτικής τρισδιάστατης σάρωσης	21
Εικόνα 4	Συσκευή εκτύπωσης με εναπόθεση υλικού (δεξιά) και δείγμα εκτύπωσης (αριστερά)	22
Εικόνα 5	Συσκευές στερεολιθογραφίας με δείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης	24
Εικόνα 6	Τρισδιάστατος σαρωτής FARO	26
Εικόνα 7	Βραχίονας FARO PLATINUM APM Model P083D	27
Εικόνα 8	Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού Geomagic Studio 9	29
Εικόνα 9	Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων μοναδικής σάρωσης	30
Εικόνα 10	Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων πολλαπλών σαρώσεων	31
Εικόνα 11	Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού Rhino 3d v.5	32
Εικόνες 12-18	Μαρμάρινη φιάλη	33-36
Εικόνα 19	Σαρωτής	37
Εικόνες 20-22	Σάρωση μαρμάρινης φιάλης	38-40
Εικόνα 23	Αρχική μορφή διπλού νέφους σημείων	41
Εικόνες 24-25	Select disconnected components	42-43
Εικόνα 26	Delete	43
Εικόνα 27	Αποτέλεσμα εντολής uniform	44
Εικόνα 28	Reduce noise	45
Εικόνες 29-32	Manual registration	46-47
Εικόνα 33	Αποτέλεσμα manual registration	48
Εικόνα 34	Global registration	48
Εικόνα 35	wrap	49
Εικόνα 36	Αποτέλεσμα wrap	50
Εικόνα 37-38	Mesh doctor	51
Εικόνα 39-40	Αποτέλεσμα mesh doctor	52
Εικόνα 41	Εσωτερική μορφολογία αντικειμένου	54
Εικόνες 42-69	Απεικόνιση διαδικασίας προσθήκης	55-69

Εικόνες 70-77	Τελική επεξεργασία στο Geomagic Studio	70-73
---------------	--	-------

Περιεχόμενα

Πίνακας εύρεσης εικόνων.....	1
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή.....	5
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Αντικείμενο και στόχοι της διπλωματικής εργασίας.....	5
1.3 δομή της διπλωματικής εργασίας.....	6
Κεφάλαιο 2 – Η αποκατάσταση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς και η σημασία της.....	7
2.1 Ο δεσμός της τεχνολογίας με τον πολιτισμό και την αρχαιολογία.....	7
2.2 Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση – η σημασία της για την πολιτιστική κληρονομιά.....	11
Κεφάλαιο 3 – Αντίστροφη μηχανική, σάρωση και 3d printing.....	12
3.1 Αντίστροφη μηχανική.....	12
3.1.1 Ιστορική αναδρομή αντίστροφης μηχανικής.....	12
3.1.2 Λόγοι χρήσης της αντίστροφης μηχανικής.....	15
3.1.3 Ορισμός της τρισδιάστατης ψηφιοποίησης.....	16
3.1.4 Βασικά χαρακτηριστικά της αντίστροφης μηχανικής.....	17
3.2 Σάρωση.....	19
3.2.1 Εισαγωγή.....	19
3.2.2 Μεθοδολογίες τρισδιάστατης σάρωσης.....	20
3.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση.....	22
Κεφάλαιο 4 – Παρουσίαση εξοπλισμού.....	25
4.1 Τρισδιάστατος σαρωτής FARO.....	25

4.2 Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης Geomagic Studio.....	28
4.3 Λογισμικό CAD μοντελοποίησης Rhinoceros 3d.....	32
Κεφάλαιο 5 – Εφαρμογή στη μαρμάρινη φιάλη.....	31
5.1 Παρουσίαση αντικειμένου.....	31
5.2 Περιγραφή της διαδικασίας σάρωσης.....	37
5.3 Μεταφορά στο λογισμικό Geomagic Studio v.12.....	41
5.4 Μεταφορά στο λογισμικό Rhino 3d v.5.....	53
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα και προοπτικές της διπλωματικής εργασίας.....	74
6.1 Συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.....	74
6.2 Κατευθύνσεις/προτάσεις για συνέχεια της διπλωματικής εργασίας.....	75
Κεφάλαιο 7 – Βιβλιογραφία.....	76

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Σε μια εποχή που όλα τείνουν να γίνουν ψηφιακά, η τρισδιάστατη ψηφιακή σάρωση έρχεται να καλύψει το χάσμα μεταξύ του υλικού κόσμου και του ψηφιακού. Κάποια αντικείμενα είναι μοναδικά στον κόσμο (π.χ. εκθέματα μουσείων), κάποια άλλα είναι εξαιρετικά πολύπλοκα για να σχεδιαστούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (π.χ. ανθρώπινες μορφές) και κάποια άλλα απλώς χρειάζεται να μετατραπούν σε ψηφιακή μορφή για κάποιο λόγο (π.χ. έλεγχος της γεωμετρίας ενός χυτού αντικειμένου.)

Όσον αφορά στα αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς, προκύπτει η ανάγκη ψηφιοποίησης τους για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς άλλες μέθοδοι όπως είναι η φωτογραφία, η σχεδίαση ή η ζωγραφική, δεν πληρούν τις ανάγκες της αρχαιολογίας και της ιστορίας της τέχνης. Οι μέθοδοι αυτές είτε πάσχουν από έλλειψη της απαιτούμενης ακρίβειας είτε είναι αρκετά χρονοβόρες και άρα μη αποτελεσματικές.

1.2 Αντικείμενο και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του επιπέδου πιστότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ψηφιακή αποτύπωση και την 3D-CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς μέσω της τεχνολογίας σάρωσης με λέιζερ κάμερα προσαρτημένης σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα. Επιπλέον, στην παρούσα διπλωματική, εξετάζονται οι δυνατότητες ψηφιακής αποκατάστασης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με τη χρήση εργαλείων 3D-CAD.

Πιο συγκεκριμένα, στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση μιας μαρμάρινης φιάλης η οποία αποτελεί έκθεμα του Αρχαιολογικού Μουσείου Αθηνών, και η αποκατάστασή της, καθώς έχει υποστεί σημαντική φθορά σε ένα κομμάτι της.

Τελικό στάδιο της εργασίας αυτής, είναι η τρισδιάστατη εκτύπωση της μαρμάρινης φιάλης, στην κατάσταση που βρισκόταν, προτού υποστεί την εν λόγω φθορά.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 1: σύντομη περιγραφή του προβλήματος που πραγματεύεται η διπλωματική εργασία, οριοθέτηση του αντικειμένου και καθορισμός στόχων.

Κεφάλαιο 2: αναφορά στη σχέση της τεχνολογίας με τον πολιτισμό και την αρχαιολογία, και πιο συγκεκριμένα της τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης.

Κεφάλαιο 3: εισαγωγή στην αντίστροφη μηχανική, και ανάλυση της διαδικασίας σάρωσης αντικειμένων και τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Κεφάλαιο 4: παρουσίαση του υπάρχοντος στο εργαστήριο εξοπλισμού και των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των δεδομένων.

Κεφάλαιο 5: βηματική ανάλυση της διαδικασίας ψηφιοποίησης του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας και επεξήγηση των εντολών που εκτελέστηκαν για την περαιτέρω επεξεργασία στα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 6: παρουσίαση των συμπερασμάτων της διπλωματικής εργασίας και ιδέες και κατευθύνσεις για πιθανή συνέχισή της.

Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 2

Η αποκατάσταση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς και η σημασία της

2.1 Ο δεσμός της τεχνολογίας με τον πολιτισμό και την αρχαιολογία

Ο πολιτισμός και ιδιαίτερα η αρχαιολογία βρίσκεται μονίμως αντιμέτωπη με την ανάγκη καταγραφής και μελέτης αντικειμένων ανυπολόγιστης αξίας. Τα δεδομένα που καταγράφονται προκειμένου να διεξαχθεί μια αρχαιολογική έρευνα, έχουν ως σκοπό τη δημιουργία ενός μέσου που θα επιτρέπει την υψηλής πιστότητας δημοσίευση του εν λόγω αντικειμένου, αλλά και την εικονική διατήρησή του ακόμα και στο απλούστερο επίπεδο της διάσωσης της πολιτιστικής πληροφορίας που αυτό εμπεριέχει.

Από τη στιγμή της ανασκαφής ακόμα, τα αντικείμενα δέχονται καταπονήσεις και παραμορφώσεις οι οποίες καμιά φορά μπορεί να οδηγήσουν και στην ολική τους καταστροφή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εκκίνηση μιας ανασκαφής, καταστρέφεται ο περιβάλλον χώρος του αντικειμένου, έπειτα το αντικείμενο ανασύρεται και τέλος υφίσταται περεταίρω φθορές εξαιτίας του «νέου» περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκεται (φυσικοχημική και τουριστική μόλυνση). Επομένως η φθορά που θα υποστεί είναι αναπόφευκτη και σε πολλές περιπτώσεις συμβαίνει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα σε σχέση με την ηλικία του.

Προκειμένου να αντιμετωπίσουν την επικείμενη αυτή φθορά οι αρχαιολόγοι, χρησιμοποιούν διάφορες μεθόδους καταγραφής και αρχειοθέτησης των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Μια από τις μεθόδους αυτές είναι η φωτογραφία. Δυστυχώς όμως, δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες της Αρχαιολογίας και της Ιστορίας της Τέχνης, καθώς τα αντικείμενα προβάλλονται πάντα από μια συγκεκριμένη οπτική γωνία και μειώνεται ο όγκος τους στις δύο διαστάσεις εισάγοντας συχνά

οπτικές παραμορφώσεις. Επίσης, μια παραδοσιακή φωτογραφία, αναπόφευκτα ξεθωριάζει με το πέρασμα του χρόνου.

Για τους λόγους αυτούς, οι αρχαιολόγοι και οι ιστορικοί τέχνης βασίζονται σε άλλες μεθόδους αποτύπωσης αντικειμένων, όπως είναι η σχεδίαση και η ζωγραφική. Το πρόβλημα στην περίπτωση αυτή είναι ότι προκειμένου να είναι πιστή μια αναπαράσταση, τα σχέδια αυτά γίνονται με αργούς ρυθμούς, γεγονός που αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τη διεξαγωγή μιας έρευνας.

Επομένως, η αρχειοθέτηση στην Αρχαιολογία και στην Ιστορία της Τέχνης έχει να αντιμετωπίσει δύο προβλήματα, άμεσα συνδεδεμένα μεταξύ τους:

- Την αντικειμενικότητα περιγραφής του αντικειμένου και
- Την ταχύτητα και την προσαρμοστικότητα της πραγματοποίησης της καταγραφής.

Η τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς επιβάλλει την καταγραφή των αντικειμένων από κοντινές αποστάσεις. Τα αντικείμενα αυτά έχουν ποικίλες διαστάσεις, ακανόνιστα σχήματα και μορφολογική πολυπλοκότητα στις επιφάνειές τους. Καθώς ο διαθέσιμος χρόνος για μετρήσεις είναι συνήθως περιορισμένος, έρχονται νέες τεχνολογίες να συνδράμουν στην καταγραφή, την τεκμηρίωση και την προβολή της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η ψηφιακή αναπαράσταση είναι ένα κομμάτι των νέων αυτών τεχνολογιών. 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 λέιζερ 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.

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.

2.2 Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση – η σημασία της για την πολιτιστική κληρονομιά

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.

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 την 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.

Αντίστροφη μηχανική, σάρωση και 3D printing

3.1 Αντίστροφη μηχανική

3.1.1 Ιστορική αναδρομή αντίστροφης μηχανικής

Στο τέλος του 20ου αιώνα, η βιομηχανική κοινότητα κατείχε στα χέρια της ένα νέο εργαλείο για τη μέτρηση διαστάσεων, το δομημένο φως. Αυτή η τεχνολογία είχε εισχωρήσει στο εμπόριο και δημιούργησε μια κατηγορία οργάνων μέτρησης, τα οποία κοινώς ονομάζονται τρισδιάστατοι σαρωτές ή ψηφιοποιητές (3d ή 3-Dimension scanners / Digitizers), οι οποίοι συγκεντρώνουν πολλά διακριτικά σημεία από την επιφάνεια των προς σάρωση αντικειμένων με σκοπό την απεικόνιση του φυσικού μοντέλου σε τρισδιάστατα προγράμματα. Το σύνολο των πολλαπλών αυτών μετρήσεων, περιγράφει το εκάστοτε σχήμα του αντικειμένου από όπου μπορούν να εξαχθούν ποικίλες διαστάσεις. Ωστόσο, η επεξεργασία αυτής της πληθώρας των δεδομένων απαιτούσε νέες μεθόδους και καινοτόμες τεχνολογίες ώστε να μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε χρήσιμα.

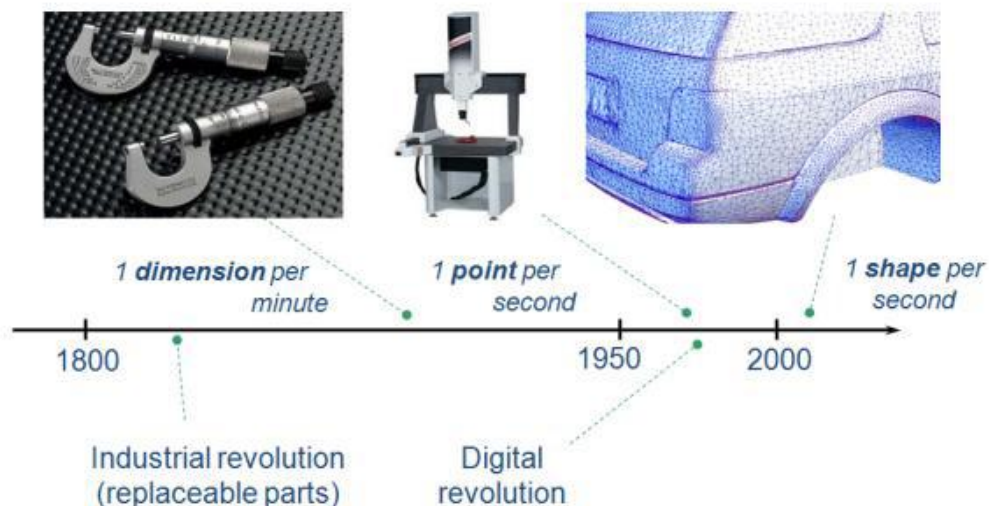
Κατά την περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης του 19ου αιώνα, έως και σήμερα, με τη βοήθεια συγχρόνων τεχνολογικών μέσων, καθίσταται πλέον ικανή η σύλληψη πλήρων σχημάτων, αποτελούμενων από εκατομμύρια διαστάσεις, σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο, ενώ στις απαρχές αυτών των τεχνολογιών, η σύλληψη μίας μονάχα διάστασης απαιτούσε αρκετά λεπτά. Ο Scott Ackerson, ιδρυτής γνωστής εταιρίας μέτρησης με εξοπλισμούς λέιζερ, παρατήρησε ότι η ταχύτητα με την οποία γίνονται οι μετρήσεις έχει αυξηθεί ραγδαία με την πάροδο του χρόνου.

Είναι όμως γεγονός ότι απαιτούνται παράλληλα, εξειδικευμένα εργαλεία λογισμικού, έτσι ώστε να μπορεί ο χρήστης να χειριστεί αυτή την πληθώρα δεδομένων με σκοπό τη περαιτέρω δημιουργία χρήσιμων για αυτόν πληροφοριών. Συνεπώς, όπως και οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές επωφελούνται από το «ψηφιακό σκοτεινό δωμάτιο - digital dark

room», αλλά και από ποικίλα προγράμματα επεξεργασίας όπως είναι το Adobe Photoshop , έτσι και οι τρισδιάστατοι ψηφιοποιητές (3D scanners) χρειάζονται το δικό τους λογισμικό, το οποίο να δέχεται δεδομένα από τις συσκευές μετρήσεων, των οποίων η δυναμική κυμαίνεται από εργαλεία μέτρησης μίας διάστασης, σε όργανα μέτρησης πλήρους κάλυψης. Τα συγκεκριμένα εργαλεία λογισμικού, γενικά κατασκευάζονται για να ικανοποιήσουν είτε ανάγκες μοντελοποίησης είτε επιθεώρησης διαστάσεων.

Historical perspective: Dimensional metrology

From the 19th century...



ΕΙΚΟΝΑ 1 Η ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΡΟΟΔΟΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

Στην επιθεώρηση διαστάσεων, συγκρίνονται τα δεδομένα σάρωσης με το τελικό μοντέλο CAD (Computer Aided Design). Για να επιβεβαιωθούν οι διαστάσεις του αντικειμένου, τα δεδομένα από το σαρωμένο αντικείμενο ευθυγραμμίζονται και συγκρίνονται με το ψηφιακό πρότυπο αναφοράς το οποίο συνήθως αποτελεί ένα CAD μοντέλο. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο είναι αποτέλεσμα σάρωσης ενός υφιστάμενου φυσικού αντικειμένου. Η

μοντελοποίηση αυτή, μπορεί να υποδιαιρεθεί περαιτέρω, στις εξής κατηγορίες:

- Μοντελοποίηση αντίστροφης μηχανικής

Μοντελοποίηση η οποία έχει ως στόχο την καταγραφή των σχεδιαστικών προθέσεων του σχεδιαστή, δηλαδή τη μορφή του αντικειμένου, τα μεμονωμένα χαρακτηριστικά του αλλά και τη λειτουργική αλληλεπίδραση τους, με σκοπό την εισαγωγή τους σε περιβάλλον CAD ως ένα πλήρως λειτουργικό, παραμετρικό, στερεό μοντέλο. Το συγκεκριμένο είδος μοντελοποίησης έχει σε μεγάλο βαθμό εφαρμογή στην βιομηχανική παραγωγή.

- Μοντέλα οπτικοποίησης

Μοντέλα για την προβολή και επικοινωνία των ψηφιακών μέσων. Για παράδειγμα, τα μοντέλα οπτικοποίησης δίνουν τη δυνατότητα σε ένα μουσείο να παρουσιάσει τα γλυπτά του σε τρισδιάστατη μορφή μέσω διαδικτύου καθώς και σε έναν κινηματογραφιστή να δημιουργήσει ταινίες που εμπεριέχουν τρισδιάστατες ψηφιακές μορφές.

- Μοντέλα πιστής αντιγραφής

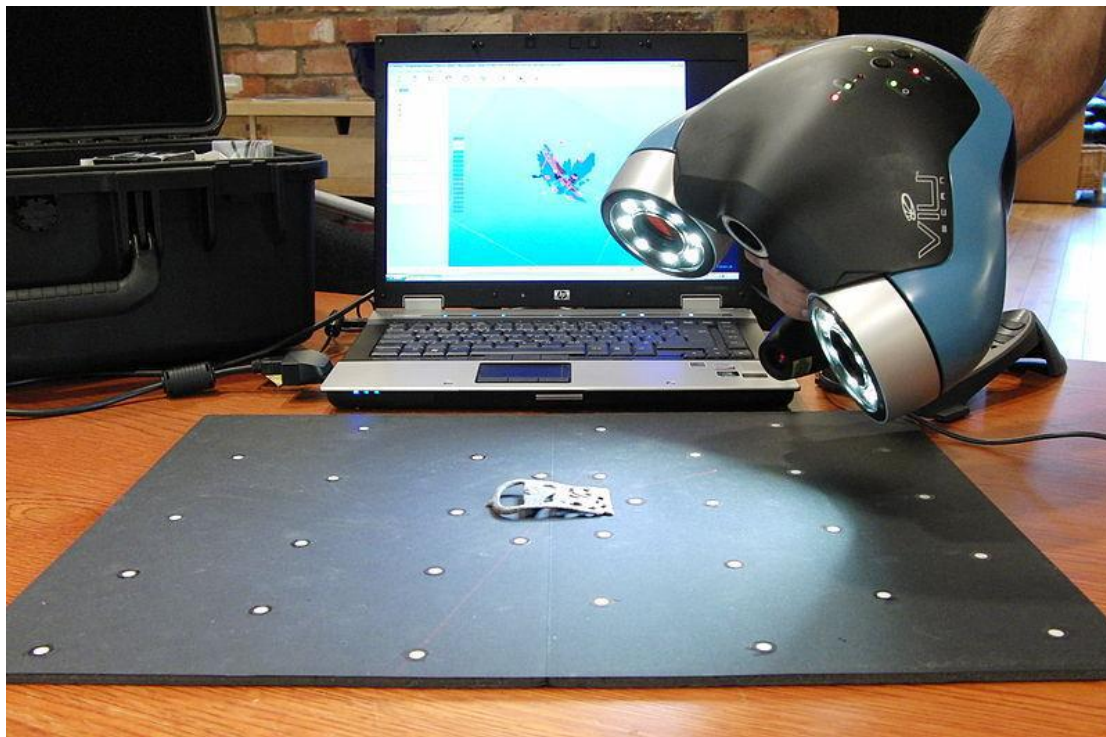
Μοντέλα που προορίζονται για την ανακατασκευή φυσικών-πρότυπων αντικειμένων, για τα οποία δεν απαιτείται σχεδόν καθόλου περαιτέρω επεξεργασία για την επίτευξη του τελικού προϊόντος, όπως για παράδειγμα αποτελούν τα πρόσθετα τεχνητά ανθρώπινα μέλη.

3.1.2 Λόγοι χρήσης της αντίστροφης μηχανικής

- Ο αρχικός κατασκευαστής δεν υπάρχει πια , αλλά ένας πελάτης χρειάζεται το προϊόν, π.χ. ανταλλακτικά αεροσκαφών που απαιτούνται συνήθως μετά από ένα αεροσκάφος έχει τεθεί σε κυκλοφορία για αρκετά χρόνια.
- Ο αρχικός κατασκευαστής του προϊόντος δεν παράγει πλέον το προϊόν , π.χ. το αρχικό προϊόν έχει καταστεί άνευ αντικειμένου .
- Ο αρχικός φάκελος τεκμηρίωσης του σχεδιασμού του προϊόντος έχει χαθεί ή δεν υπήρξε ποτέ.
- Δημιουργία δεδομένων για την ανακαίνιση ή την κατασκευή ενός κομματιού για το οποίο δεν υπάρχουν δεδομένα CAD, ή για το οποίο τα δεδομένα έχουν καταστεί άνευ αντικειμένου ή έχουν χαθεί.
- Επιθεώρηση ή / και ποιοτικός έλεγχος. Συγκρίνοντας βιομηχανικά μέρη σε σχέση με την αντίστοιχη CAD περιγραφή του ή με ένα πρότυπο αντικείμενο.
- Εξάλειψη ορισμένων αρνητικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος, π.χ., υπερβολική φθορά μπορεί να σημαίνει όταν ένα προϊόν πρέπει να βελτιωθεί.
- Ενίσχυση των χαρακτηριστικών ενός προϊόντος με βάση τη μακροπρόθεσμη χρήση του.
- Αναλύοντας τα θετικά και τα αρνητικά χαρακτηριστικά των ανταγωνιστικών προϊόντων.
- Διερεύνηση νέων τρόπων βελτίωσης των επιδόσεων και των χαρακτηριστικών του προϊόντος.
- Δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων από ένα μοντέλο ή γλυπτό για τα κινούμενα σχέδια σε παιχνίδια και ταινίες.
- Δημιουργία τρισδιάστατων δεδομένων από ένα άτομο , ένα μοντέλο ή γλυπτό για τη δημιουργία , την κλιμάκωση , ή την αναπαραγωγή ενός έργου τέχνης.
- Αρχιτεκτονική - κατασκευαστική καταγραφή και μέτρηση.

3.1.3 Ορισμός της τρισδιάστατης ψηφιοποίησης

Ένας τρισδιάστατος σαρωτής είναι μια συσκευή που αναλύει ένα πραγματικό αντικείμενο ή το περιβάλλον με σκοπό τη συλλογή δεδομένων σχετικά με το σχήμα του και, ενδεχομένως, την εμφάνισή του (π.χ. χρώμα) . Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή ψηφιακών τρισδιάστατων μοντέλων.



ΕΙΚΟΝΑ 2 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΣ ΣΑΡΩΤΗΣ ΧΕΙΡΟΣ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Πολλές διαφορετικές τεχνολογίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αυτών των συσκευών τρισδιάστατης σάρωσης. Κάθε τεχνολογία έρχεται με τα δικά της όρια , τα δικά της πλεονεκτήματα και το δικό της κόστος . Πολλοί περιορισμοί ως προς το είδος των αντικειμένων που μπορούν να ψηφιοποιηθούν, εξακολουθούν να υπάρχουν. Τα τρισδιάστατα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούν χρήσιμα στοιχεία για μία ευρεία ποικιλία εφαρμογών. Οι ψηφιακοί σαρωτές χρησιμοποιούνται ευρέως από τη βιομηχανία του θεάματος στην παραγωγή ταινιών και video games . Άλλες κοινές εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας περιλαμβάνουν τον τομέα του βιομηχανικού σχεδιασμού, την ιατρική επιστήμη, την αντίστροφη μηχανική, τη προτυποποίηση, τον

έλεγχο της ποιότητας / επιθεώρησης και την τεκμηρίωση πολιτιστικών αντικειμένων.

3.1.4 Βασικά χαρακτηριστικά αντίστροφης μηχανικής

Η αντίστροφη μηχανική και η ανακατασκευή επιφανειών είναι νέοι τομείς οι οποίοι έγιναν πολύ δημοφιλείς στις αρχές της δεκαετίας του '80 με την ταχεία ανάπτυξη των συσκευών σάρωσης αντικειμένων.

Υπάρχει ένα τεράστιο ποσό αντικειμένων από καθημερινά αντικείμενα μέχρι μηχανικά μέρη, παιχνίδια, κλπ., για τα οποία η αναπαράσταση με υπολογιστή δεν είναι γνωστή, όπως είναι για τα πρωτότυπα ανθρώπινων μελών ή δεν είναι διαθέσιμη. Ο σκοπός της επιφανειακής ανοικοδόμησης είναι να μετατρέψει ένα τέτοιο αντικείμενο σε ψηφιακή αναπαράσταση, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω απεικόνιση, επεξεργασία, κατασκευή κ.λπ.

Μέθοδοι τρισδιάστατης ανακατασκευής και περαιτέρω επεξεργασίας νέφους σημείων έχουν ήδη εισαχθεί σε όλους σχεδόν τους τομείς της ανθρώπινης ζωής, όπως η ιατρική, η αρχιτεκτονική, η κατασκευή μηχανών, ο σχεδιασμός αυτοκινήτων, τη βιομηχανία παιχνιδιών, καθώς και τα είδη ένδυσης. Η βιομηχανία του θεάματος (βιομηχανία κινηματογράφου), η βιομηχανία επιστημονικής απεικόνισης, καθώς και της εικονικής πραγματικότητας μπορεί επίσης να αναφερθούν ως πεδία που απαιτούν τρισδιάστατα ψηφιοποιημένα αντικείμενα.

Η αναλογία μεταξύ δυσδιάστατης και τρισδιάστατης ανακατασκευής αντικειμένων απεικονίζεται στην εικόνα 8. Αναφορικά με τη δισδιάστατη "ανασυγκρότηση", τα ανεπεξέργαστα δεδομένα είναι τα έγγραφα σε χαρτί (κείμενο ή εικόνες), τα οποία έχουν ψηφιοποιηθεί με έναν συνηθισμένο οπτικό σαρωτή, επεξεργαστεί, και προαιρετικά τροποποιηθεί ούτως ώστε να είναι έτοιμα για εκτύπωση ή αποτύπωση. Με ανάλογο τρόπο, ένα τρισδιάστατο αντικείμενο σαρώνεται από μια συσκευή σάρωσης, το οποίο μπορεί προαιρετικά να ανακατασκευαστεί.

Η όλη διαδικασία μπορεί να υποδιαιρεθεί σε ακόλουθα βήματα :

- Απόκτηση δεδομένων/αντικειμένων σάρωσης
- Ευθυγράμμιση των σαρωμένων εικόνων
- Ανακατασκευή επιφάνειας δημιουργώντας ένα μοντέλο ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD , πολυγωνική προσέγγιση κ.λπ.)
- Βιομηχανική Παραγωγή - [προαιρετικό]

3.2 Σάρωση

3.2.1 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.

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).

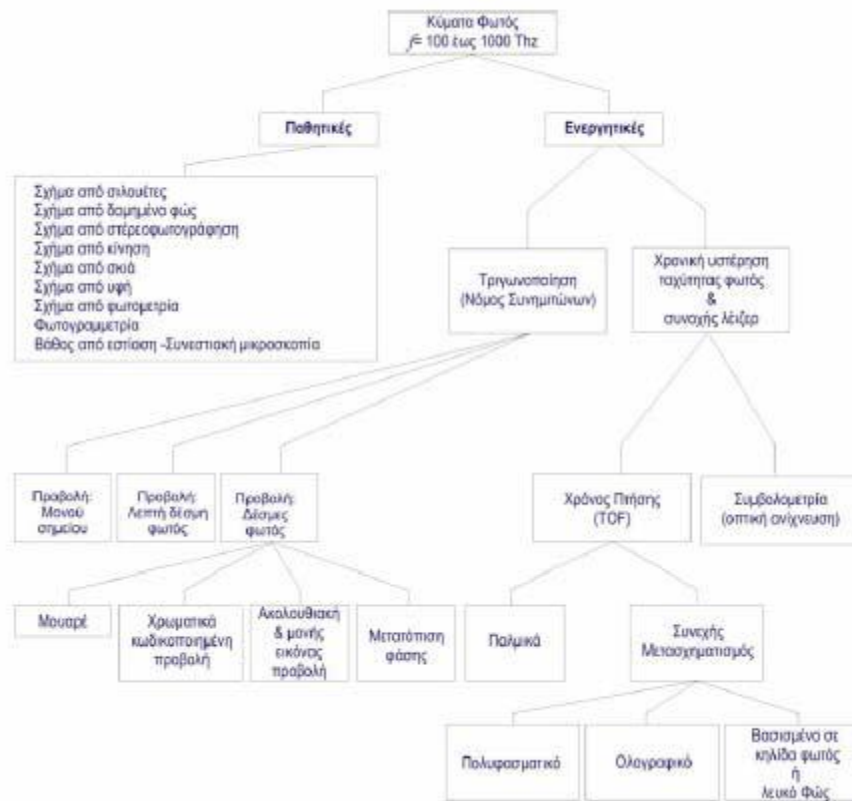
3.2.2 Μεθοδολογίες τρισδιάστατης σάρωσης

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 3 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 υφής, 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 αντιστοιχισή εφαρμόζεται στην συνέχεια για την ανάκτηση της τρίτης διάστασης όλων των σημείων που εμφανίζονται μέσα στις φωτογραφίες.



Εικόνα 3. Βασικός διαχωρισμός τεχνικών οπτικής τρισδιάστατης σάρωσης

3.3 Τρισδιάστατη εκτύπωση

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

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.



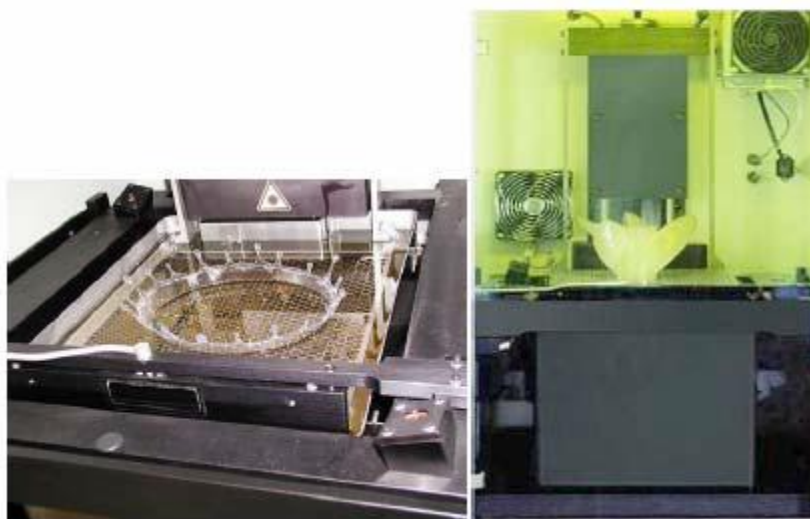
Εικόνα 4. Συσκευή εκτύπωσης με εναπόθεση υλικού (δεξιά) και δείγμα εκτύπωσης (αριστερά)

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 5. Συσκευές στερεολιθογραφίας με δείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης

Παρουσίαση εξοπλισμού

4.1 Τρισδιάστατος σαρωτής FARO

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα FARO PLATINUM ARM Model P083D. Πρόκειται για έναν χειροκίνητο φορητό μετρητικό βραχίονα τελευταίας τεχνολογίας κατασκευασμένο από την εταιρία FARO Technologies Inc (έτος κατασκευής 2007) που διαθέτει 7 βαθμούς ελευθερίας και διάμετρο εργόσφαιρας 2,4 μέτρα. Με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές επίδοσης του κατασκευαστή, η ακρίβεια του συστήματος είναι πιστοποιημένη σύμφωνα με το πρότυπο ANSI B89 (2 Sigma Single Point Accuracy) $\pm 0.030\text{mm}$. Εκτός από τον μηχανικό αισθητήρα επαφής (ακίδα επαφής), η εν λόγω ΜΜΣ-ΑΒ διαθέτει επιπροσθέτως 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. Για την λέιζερ κάμερα, ο κατασκευαστής δίνει ακρίβεια $\pm 0.050\text{mm}$, βάθος πεδίου 85mm, ωφέλιμο πλάτος δέσμης σάρωσης 34mm έως 60mm ανάλογα με την απόσταση από την μετρούμενη επιφάνεια, 640 σημεία ανά δέσμη σάρωσης, 30 σαρώσεις ανά δευτερόλεπτο (frames per second), άρα 19200 σημεία ανά δευτερόλεπτο, και μήκος κύματος λέιζερ 660nm (CDRH Class II/IEC Class 2M).

Για το σύστημα βραχίονα-κάμερας η ακρίβεια προδιαγράφεται στα $\pm 0.080\text{mm}$. [24]

Η ΜΜΣ-ΑΒ Faro Arm επικοινωνεί μέσω θύρας USB με Η/Υ στον οποίο είναι εγκατεστημένο κατάλληλο εξειδικευμένο λογισμικό για τη διεκπεραίωση των παραπάνω εργασιών. Σημειώνεται ότι τα δεδομένα της μέτρησης/ ψηφιακής αποτύπωσης αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο στον Η/Υ.



Εικόνα 6. Τρισδιάστατος σαρωτής FARO

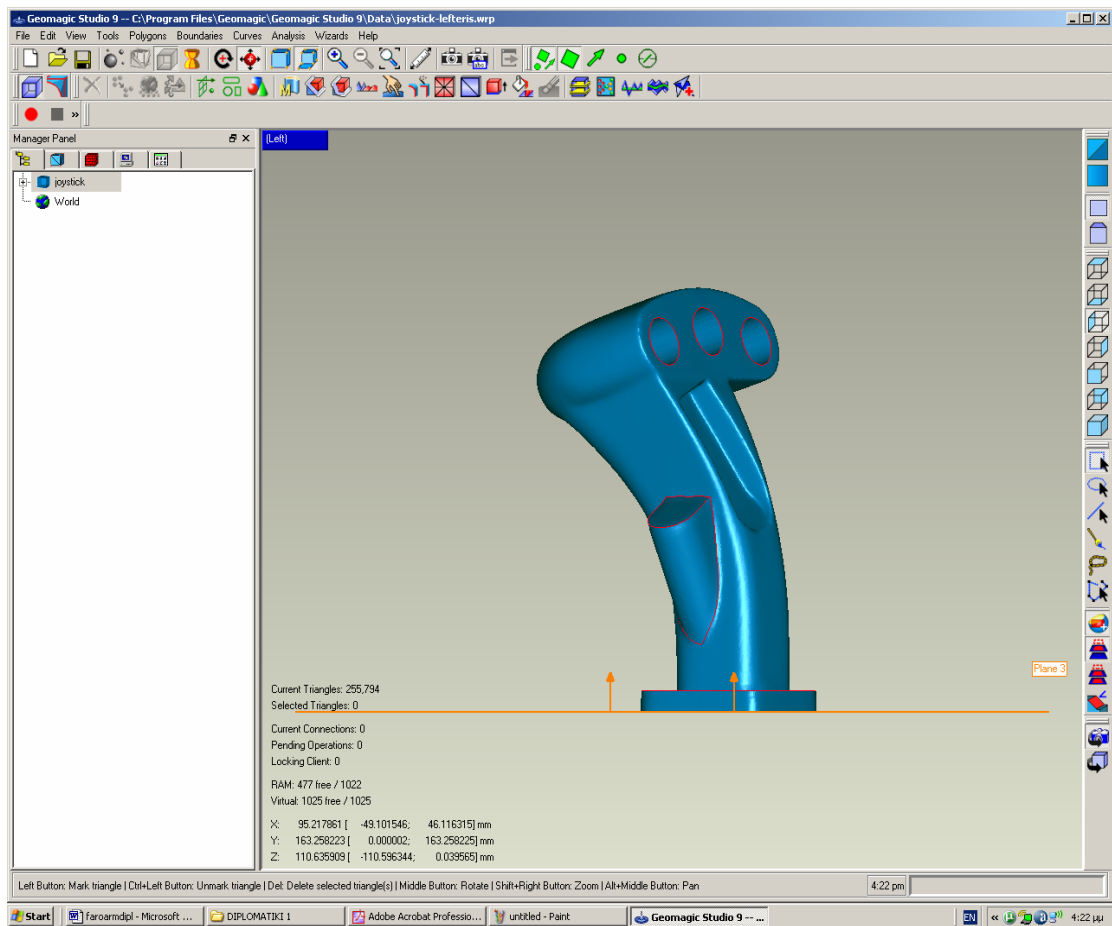


Εικόνα 7: Βραχίονας FARO PLATINUM ARM Model P083D

4.2 Λογισμικό ψηφιακής αποτύπωσης Geomagic Studio

Η Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα Faro Arm υποστηρίζεται από το λογισμικό Geomagic Studio v.9 της εταιρίας Raindrop, [22]. Το λογισμικό αυτό παρέχει υψηλής ποιότητας υπολογιστικά εργαλεία ψηφιακής αποτύπωσης, συλλογής νέφους σημείων καθώς και μετατροπής πολύπλοκων πολυγωνικών αντικειμένων σε ακριβή NURBS μοντέλα συμβατά με συστήματα CAD/CAM / CAE/ RP (δυνατότητα εξαγωγής αρχείων τύπου igs, step, stl κ.α). Η κυρίαρχη θέση που κατέχει στη διεθνή αγορά το έχει ήδη καταξιώσει ως το κατεξοχήν χρησιμοποιούμενο υπολογιστικό εργαλείο για τέτοιου είδους εργασίες.

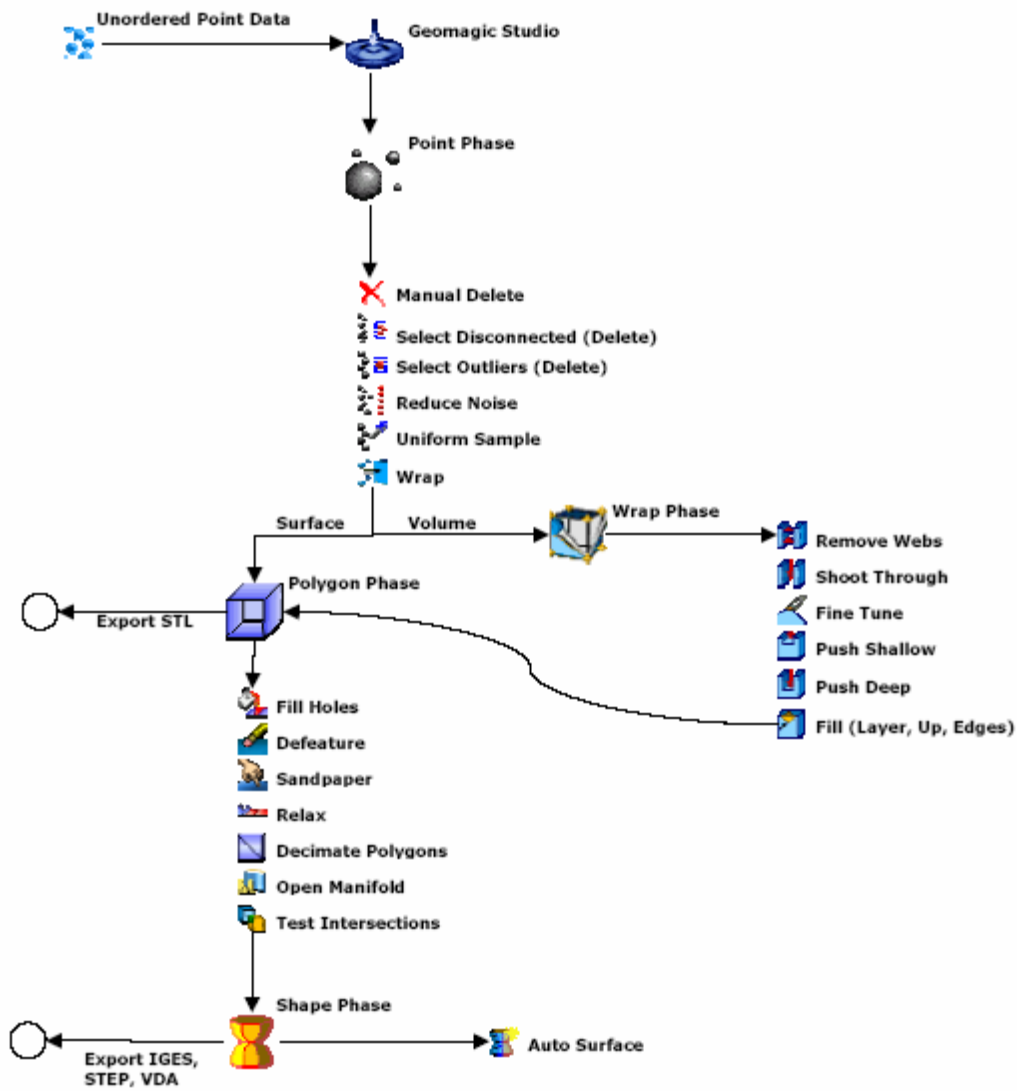
Στην παρακάτω Εικόνα 32 παρουσιάζεται η τυπική μορφή της επιφάνειας εργασίας του εν λόγω λογισμικού όπου διακρίνονται οι γραμμές με τα βασικά εργαλεία επεξεργασίας και το βασικό παράθυρο του μοντέλου. Στην Εικόνα 33 και στην Εικόνα 34 παρουσιάζονται τα τυπικά διαγράμματα ροής εργασιών κατά την επεξεργασία νέφους σημείων που έχει προκύψει από μοναδική και από πολλαπλές σαρώσεις αντίστοιχα.



Εικόνα 8: Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού Geomagic Studio 9

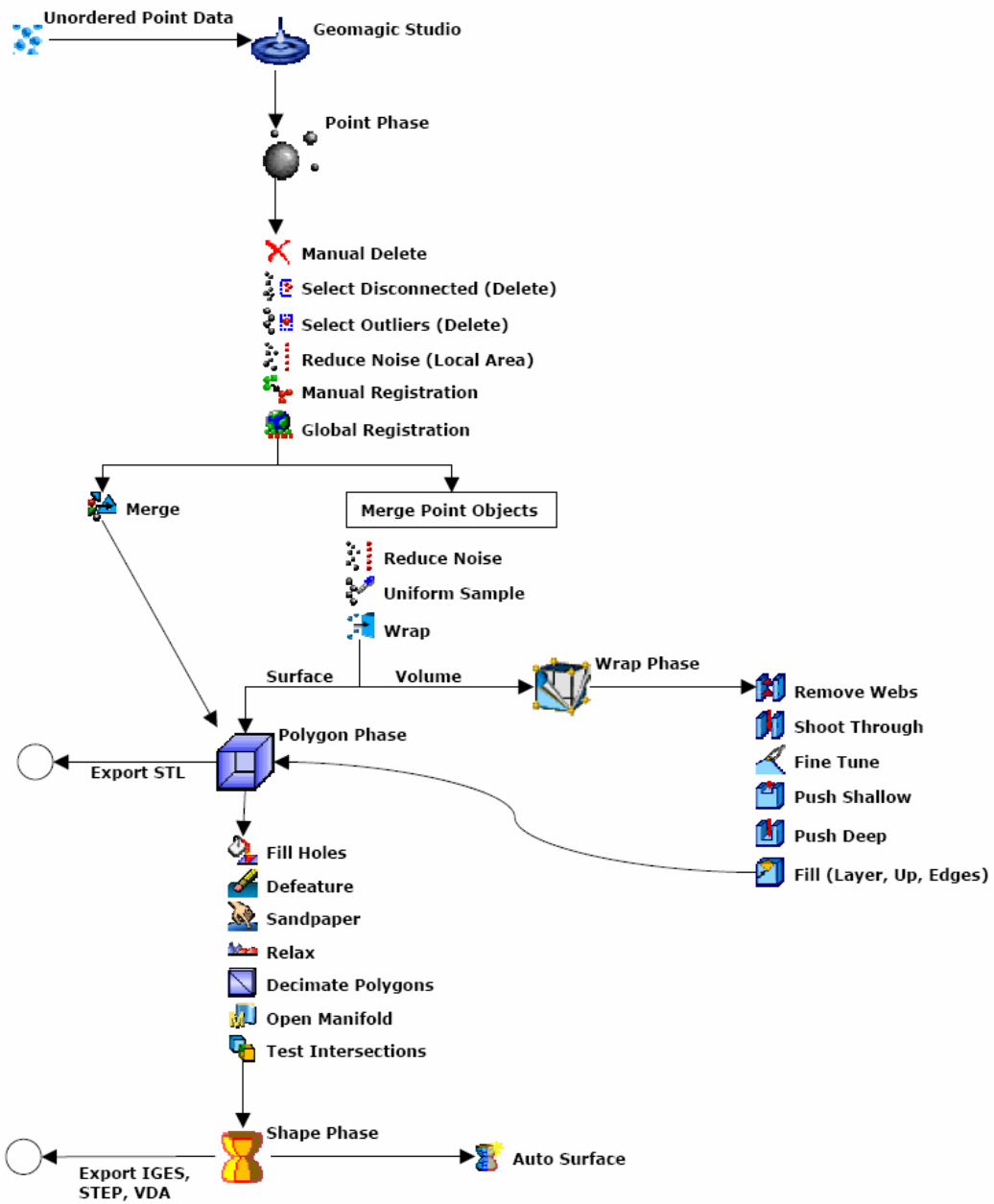
Single Scan Workflow

Unordered Point Data



Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων μοναδικής σάρωσης

Multiple Scans Workflow Unordered Point Data

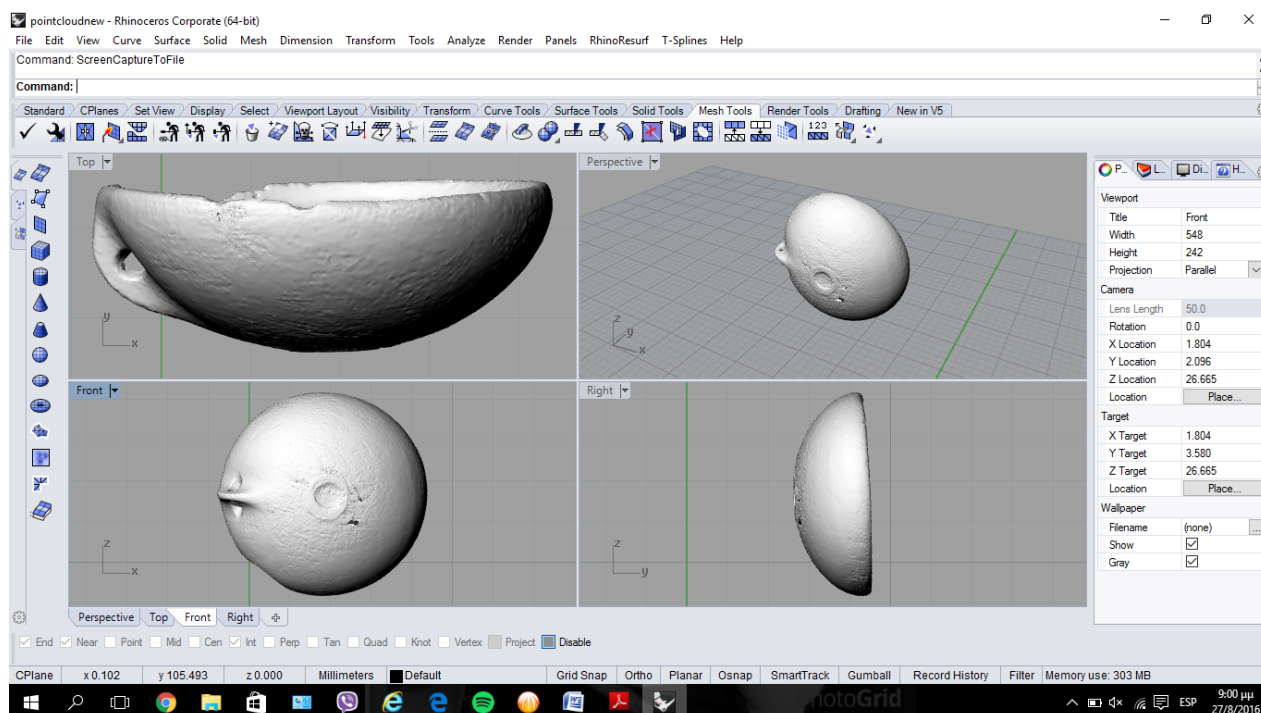


Εικόνα 10: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας νέφους σημείων πολλαπλών σαρώσεων

4.3 Λογισμικό CAD μοντελοποίησης Rhinoceros 3D

Το λογισμικό Rhinoceros 3D v.5.0 είναι ένα ευέλικτο κι εύχρηστο εργαλείο επεξεργασίας τρισδιάστατων μοντέλων CAD. Χρησιμοποιείται σε ευρύτατο πλήθος εφαρμογών: βιομηχανικός σχεδιασμός, εφαρμογές αρχιτεκτονικής με απαιτήσεις σε ελεύθερες μορφές, ναυπηγική, κοσμηματοποιία, αυτοκινητοβιομηχανία, CAD/CAM, ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων (*rapid prototyping*), αντίστροφος μηχανολογικός σχεδιασμός, ψηφιακή διασκέδαση, γραφιστική.

Στην παρακάτω Εικόνα 32 παρουσιάζεται η τυπική μορφή της επιφάνειας εργασίας του εν λόγω λογισμικού όπου διακρίνονται οι γραμμές με τα βασικά εργαλεία επεξεργασίας και το βασικό παράθυρο του μοντέλου.



Εικόνα 11. Επιφάνεια εργασίας λογισμικού Rhino 3d v.5

Εφαρμογή στη μαρμάρινη φιάλη

5.1 Παρουσίαση αντικειμένου

Το αντικείμενο επεξεργασίας στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι η μαρμάρινη φιάλη, από το Αρχαιολογικό Μουσείο Αθηνών, η οποία φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (12 – 18) .



Εικόνα 12



Εικόνα 13



Εικόνα 14



Εικόνα 15



Εικόνα 16



Εικόνα 17



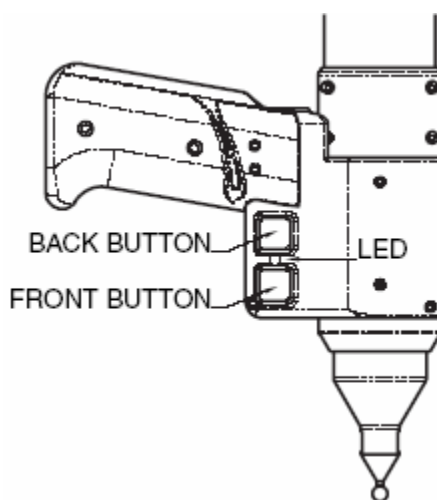
Εικόνα 18

5.2 Περιγραφή της διαδικασίας σάρωσης

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

Για τη σάρωση των ζητούμενων επιφανειών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Faro-Plug-in.

Ακολουθώντας πατώντας το πράσινο κουμπί FRONT BUTTON ξεκίνησε η διαδικασία σάρωσης του αντικειμένου. Κινώντας την ακτίνα λέιζερ πάνω στο αντικείμενο σαρώθηκαν όλες οι επιφάνειες του αντικειμένου ενώ πατώντας το κόκκινο κουμπί BACK BUTTON σταματούσε προσωρινά η σάρωση του αντικειμένου προκειμένου να μετακινηθεί το αντικείμενο έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη γωνία λήψης.



Εικόνα 19. Σαρωτής

Παρακάτω φαίνονται ορισμένες εικόνες από τη διαδικασία σάρωσης της μαρμάρινης φιάλης (εικόνες 20 -22) .



Εικόνα 20



Εικόνα 21

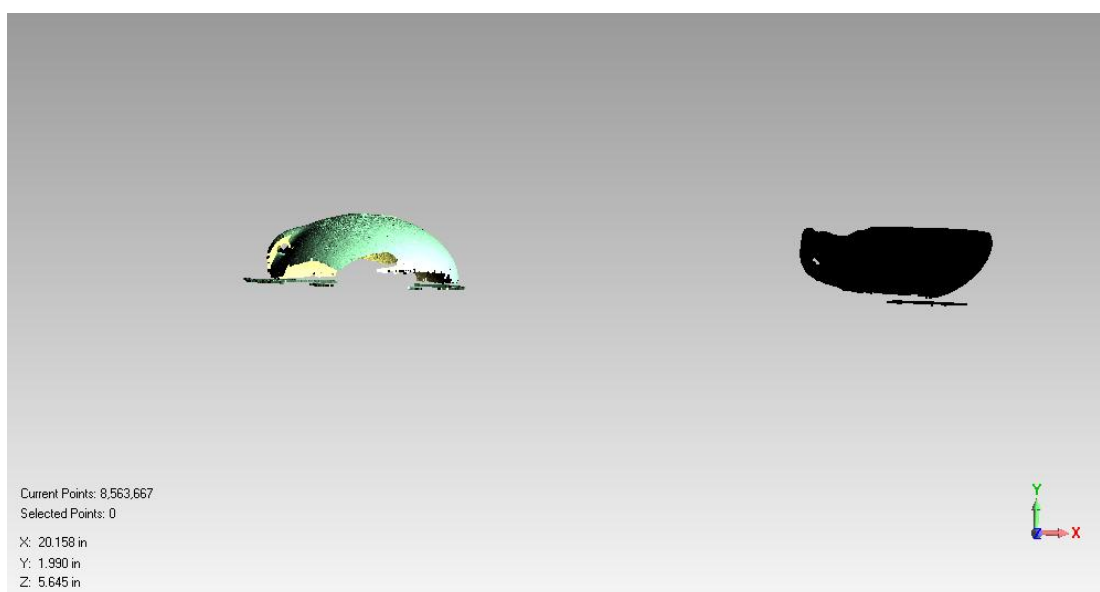


Εικόνα 22

5.3 Μεταφορά στο λογισμικό Geomagic Studio v.12

Από τη διαδικασία σάρωσης, προέκυψε ένα νέφος σημείο το οποίο υπέστη επεξεργασία στο λογισμικό Geomagic Studio 12, προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα μοντέλο CAD το οποίο θα επεξεργαστούμε αργότερα στο λογισμικό Rhino 3d v.5.

Η αρχική μορφή του εν λόγω νέφους σημείων απεικονίζεται παρακάτω:

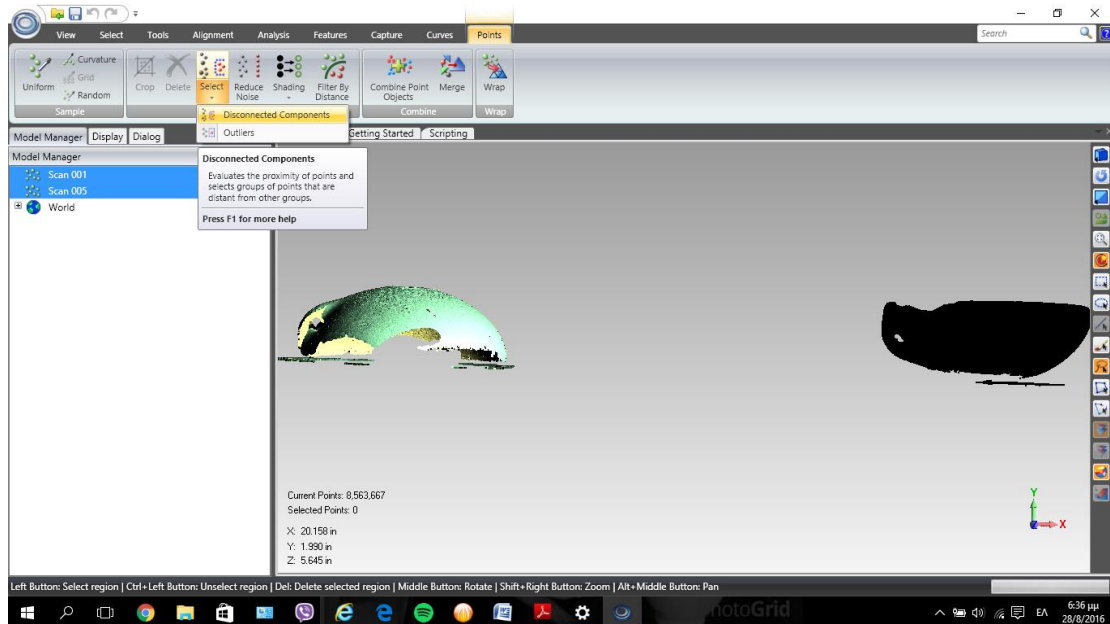


Εικόνα 23. Αρχική μορφή διπλού νέφους σημείων

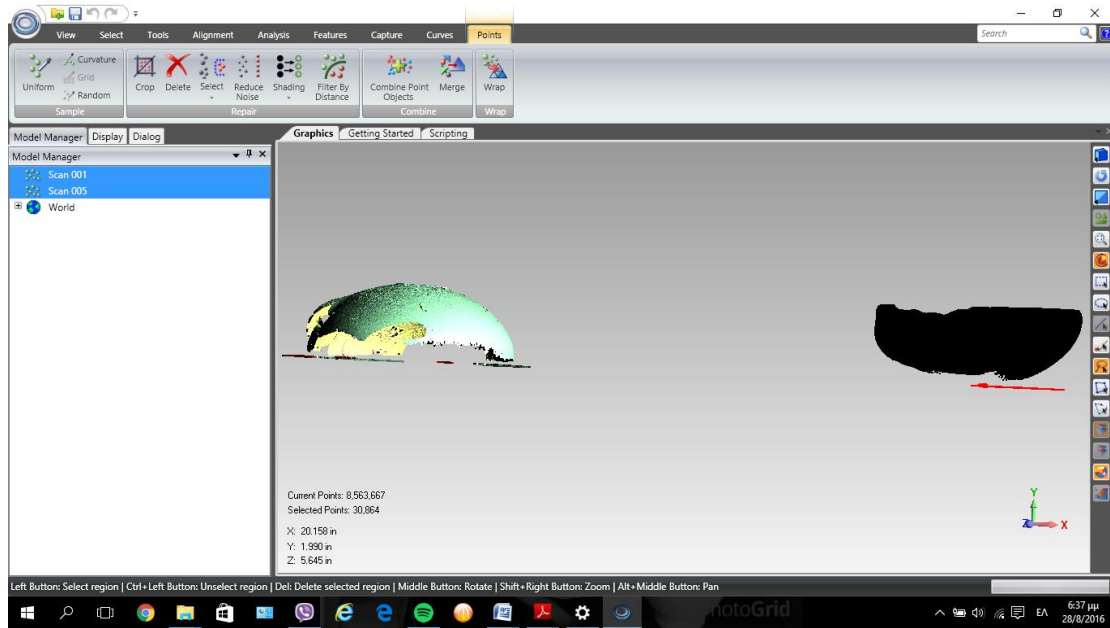
Στην εικόνα φαίνονται δύο scans τα οποία είναι απαραίτητα καθώς κατά τη διαδικασία της σάρωσης δεν είναι δυνατόν να σαρωθεί το κομμάτι της φιάλης που ακουμπά στην επιφάνεια που την έχουμε τοποθετήσει. Για το λόγο αυτό, αφού πραγματοποιήθηκε η πρώτη σάρωση, η φιάλη τοποθετήθηκε ανάποδα, και έγινε μια δεύτερη σάρωση προκειμένου να αποτυπωθούν τα σημεία που απεικονίζουν το κάτω μέρος της. Στη διαδικασία που ακολουθεί τα δύο αυτά scans θα ενωθούν για να προκύψει ένα ενιαίο μοντέλο.

Όπως είναι φανερό αλλά και αναμενόμενο, στο παράθυρο του προγράμματος φαίνονται αρκετά σημεία της επιφάνειας στην οποία ήταν τοποθετημένη η φιάλη, προκειμένου να γίνει η σάρωση. Τα σημεία αυτά είναι τα πρώτα που πρέπει να αφαιρεθούν.

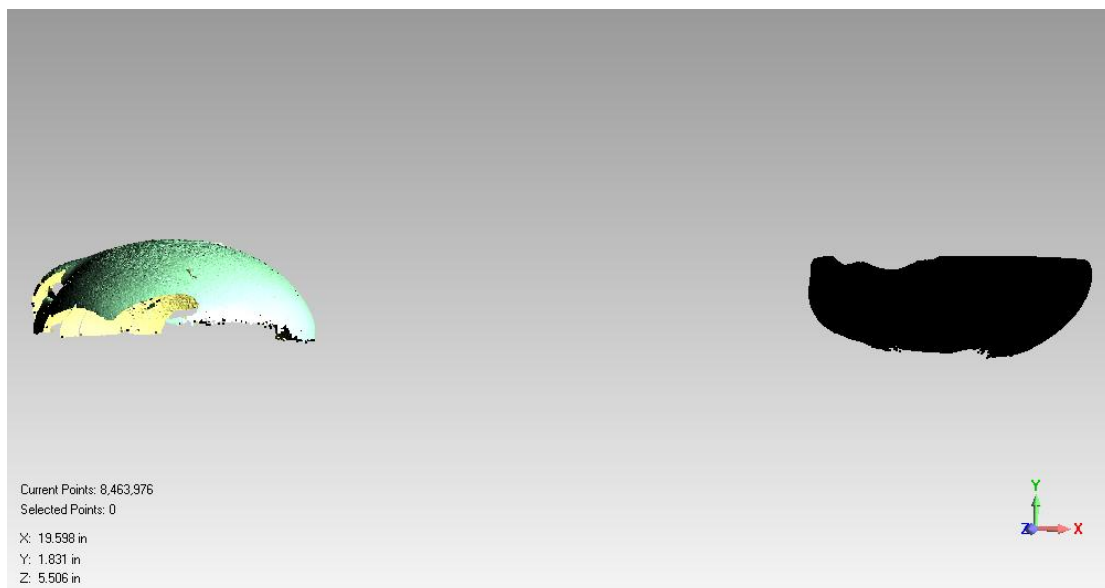
Αυτό γίνεται επιλέγοντας τα συγκεκριμένα σημεία με την εντολή **Select disconnected components**, από την καρτέλα **Points** του προγράμματος, η οποία επιλέγει τα σημεία που βρίσκονται εκτός του κυρίως νέφους και με την εντολή **delete** διαγράφονται.



Εικόνα 24. Select disconnected components



Εικόνα 25. Select disconnected components

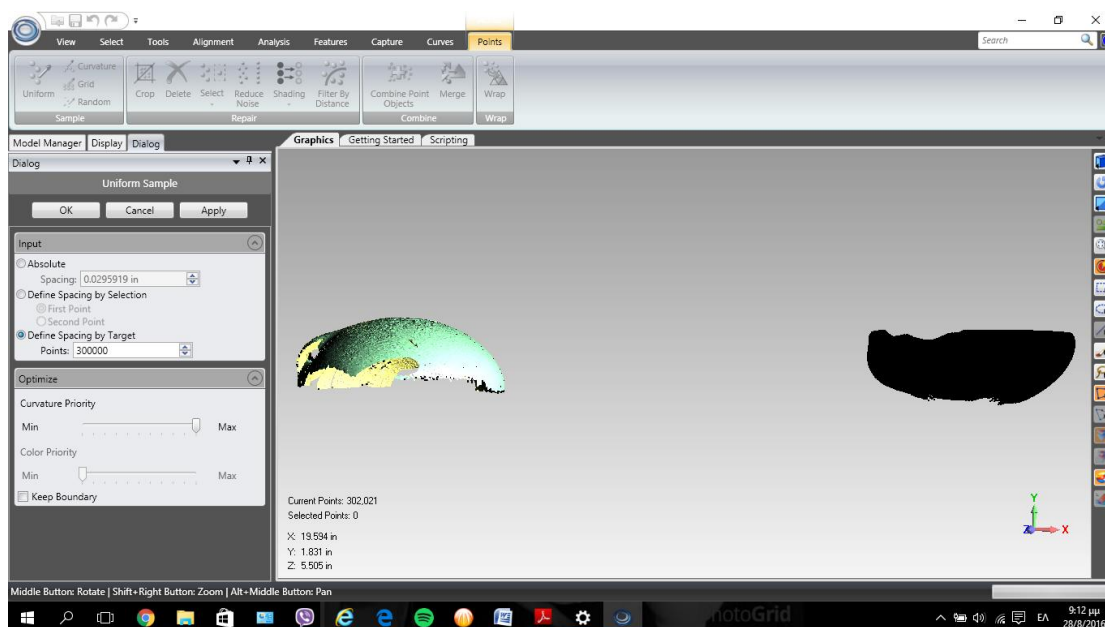


Εικόνα 26. Delete

Αφού αφαιρέθηκαν τα σημεία που βρίσκονταν εκτός του αντικειμένου, μέσω της εντολής **Uniform**, μειώνουμε τον αριθμό των σημείων προκειμένου να εκτελούνται οι εργασίες με μεγαλύτερη ταχύτητα. Έπειτα από αρκετές δοκιμές, βγήκε το συμπέρασμα ότι ένας αριθμός σημείων που προσφέρει μια ικανοποιητική ταχύτητα εκτέλεσης των εντολών αλλά και αρκετά σημεία για να μη χαθούν οι ιδιαιτερότητες που

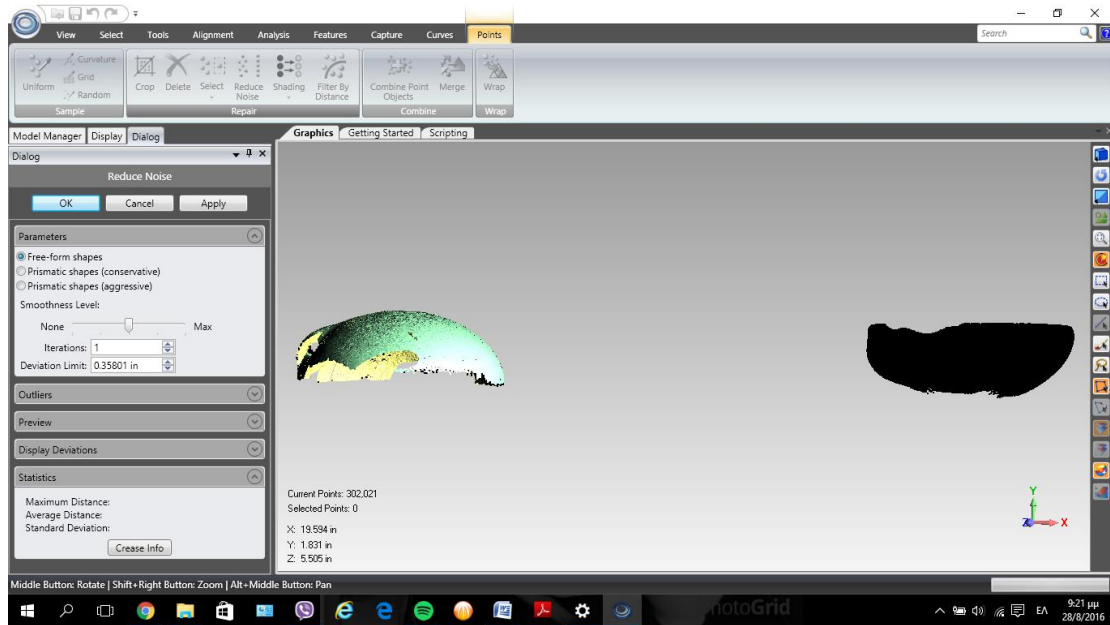
υπάρχουν στην επιφάνεια της μαρμάρινης φιάλης, είναι τα 300.000 σημεία.

Στο παράθυρο που εμφανίζεται όταν επιλέγουμε την εντολή, τσεκάρουμε την επιλογή **Define Spacing by Target** και πληκτρολογούμε 300.000 σημεία. Επίσης, καθώς έχουμε ένα αντικείμενο το οποίο αποτελεί ελεύθερη επιφάνεια και η επιφάνεια αυτή αποτελείται από καμπύλες, τοποθετούμε το δείκτη της μπάρας **curvature priority** στο **max**. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι 302.021 σημεία.



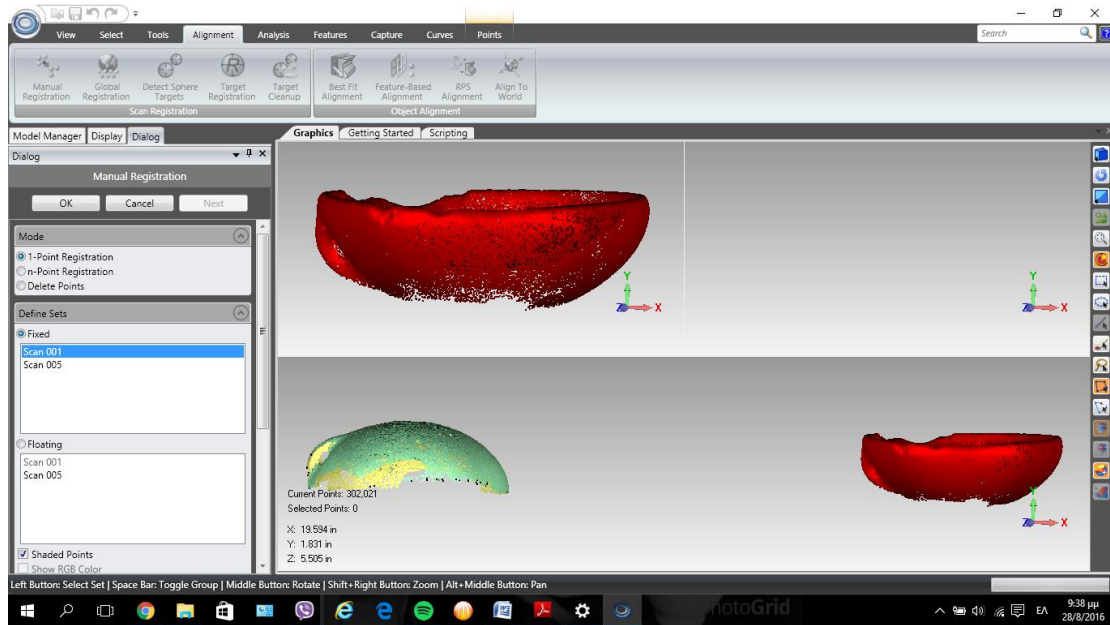
Εικόνα 27. Αποτέλεσμα εντολής uniform

Έπειτα χρησιμοποιούμε την εντολή **Reduce noise**, η οποία μετακινεί τα σημεία στις στατιστικά σωστές θέσεις τους, δίνοντας ένα πιο ομοιόμορφο αποτέλεσμα. Εδώ, τσεκάρουμε την επιλογή **free-form shapes** καθώς πρόκειται περί ελεύθερης επιφάνειας, και τοποθετούμε το δείκτη της μπάρας του **smoothness level** στη μέση.

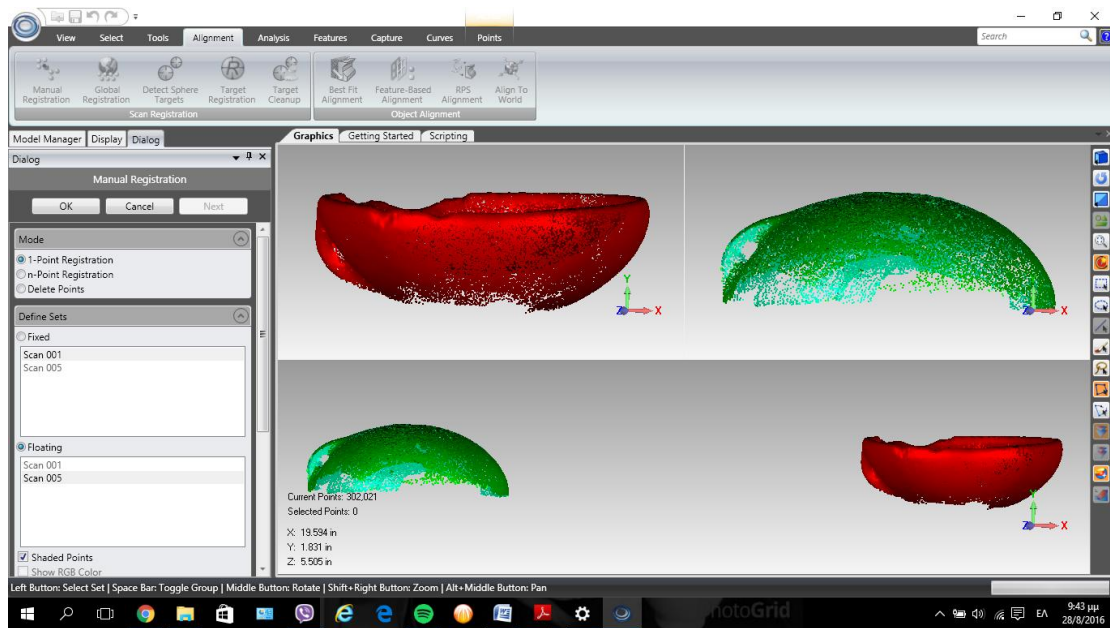


Εικόνα 28. Reduce noise

Επόμενο βήμα είναι η ένωση των δύο νεφών σημείων ώστε να προκύψει ένα νέο νέφος το οποίο θα απεικονίζει τη μαρμάρινη φιάλη. Η διαδικασία αυτή θα πραγματοποιηθεί μέσω της εντολής **Manual Registration** από την καρτέλα **Alignment**. Τσεκάρουμε την επιλογή 1-point registration, καθώς πρόκειται να ενώσουμε τα δύο νέφη σε ένα βρίσκοντας ένα κοινό σημείο και στα δύο. Στην επιλογή Fixed τσεκάρουμε το scan 001 και το χρησιμοποιούμε σα βάση, ενώ στην επιλογή Floating τσεκάρουμε το scan 005 το οποίο θα προσαρμόσουμε πάνω στο πρώτο.

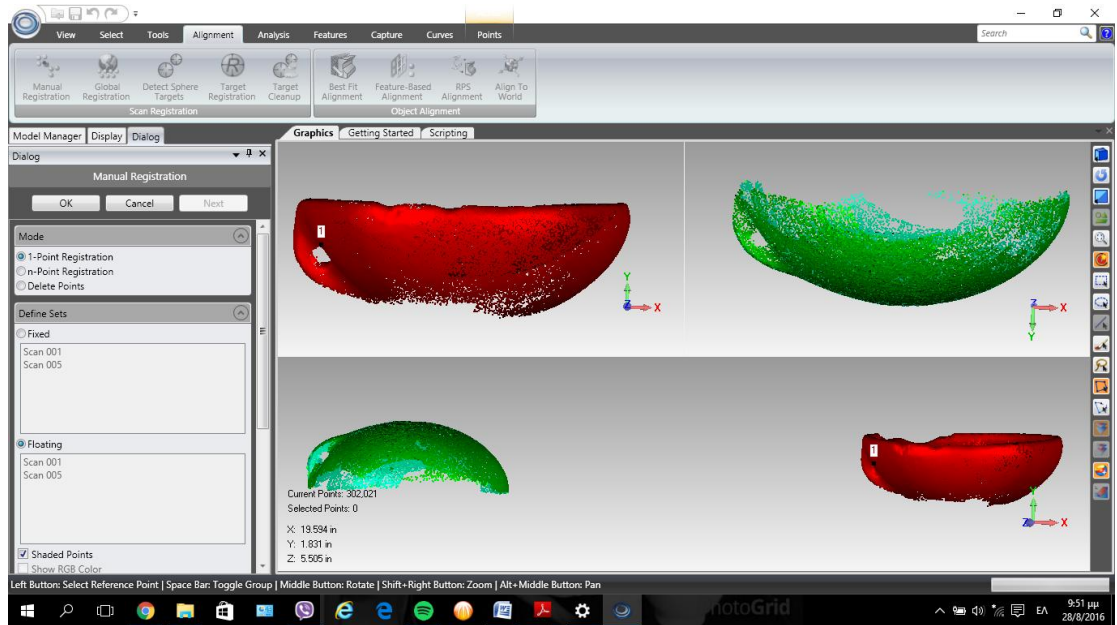


Εικόνα 29. Manual registration

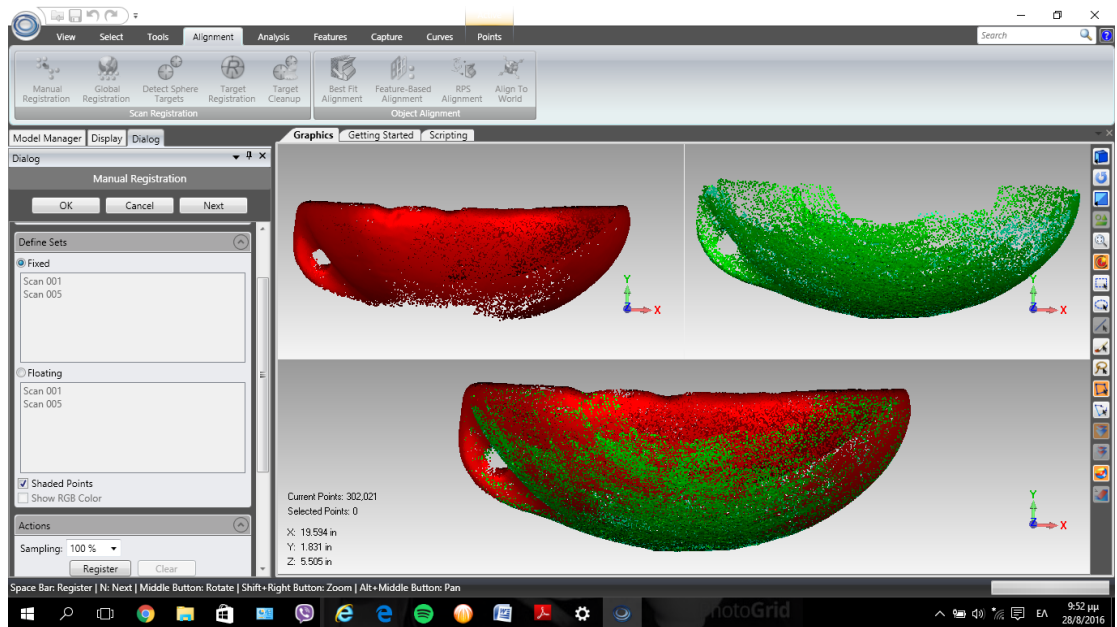


Εικόνα 30. Manual registration

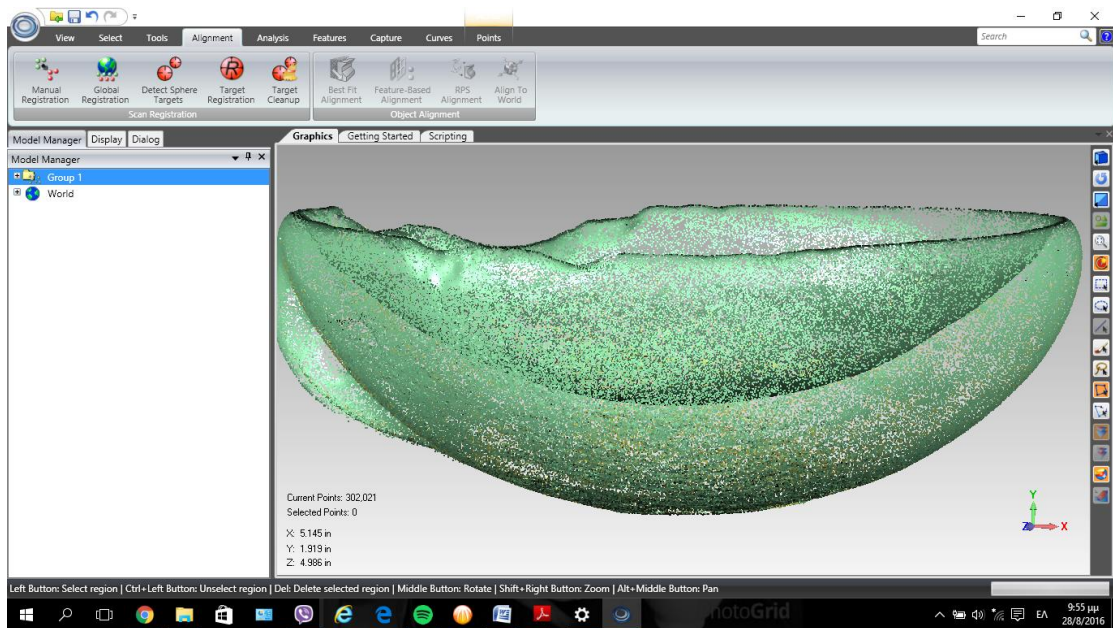
Τώρα γίνεται η προσαρμογή της θέσης του δεύτερου scan ώστε να είναι όσο το δυνατόν στην ίδια θέση με το πρώτο, ώστε να γίνει η επιλογή του κοινού σημείου.



Εικόνα 31. Manual registration

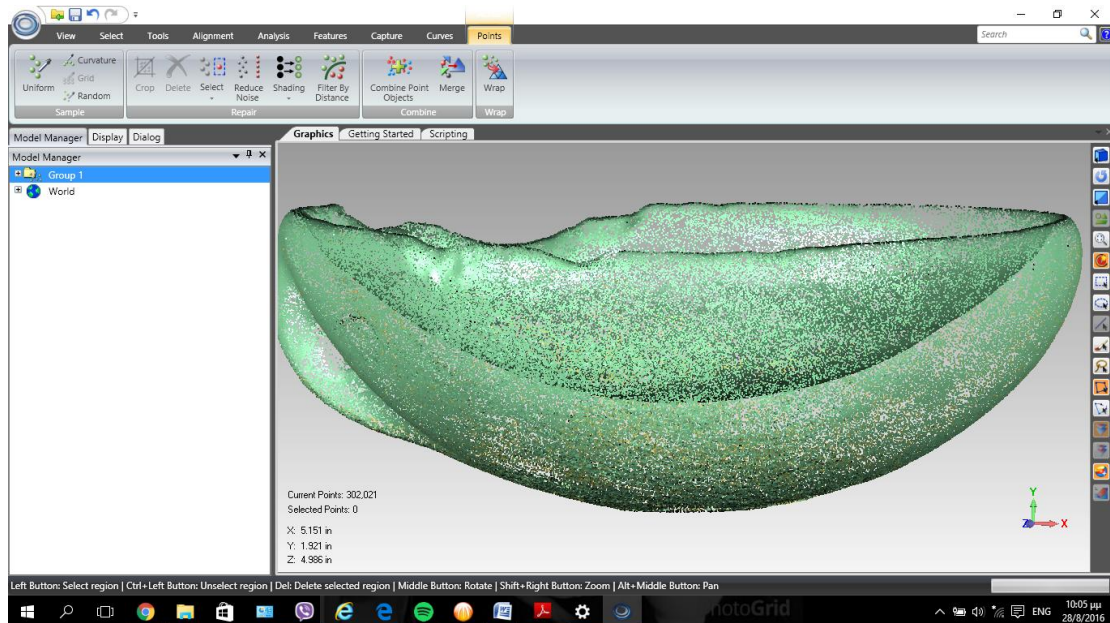


Εικόνα 32. Manual registration



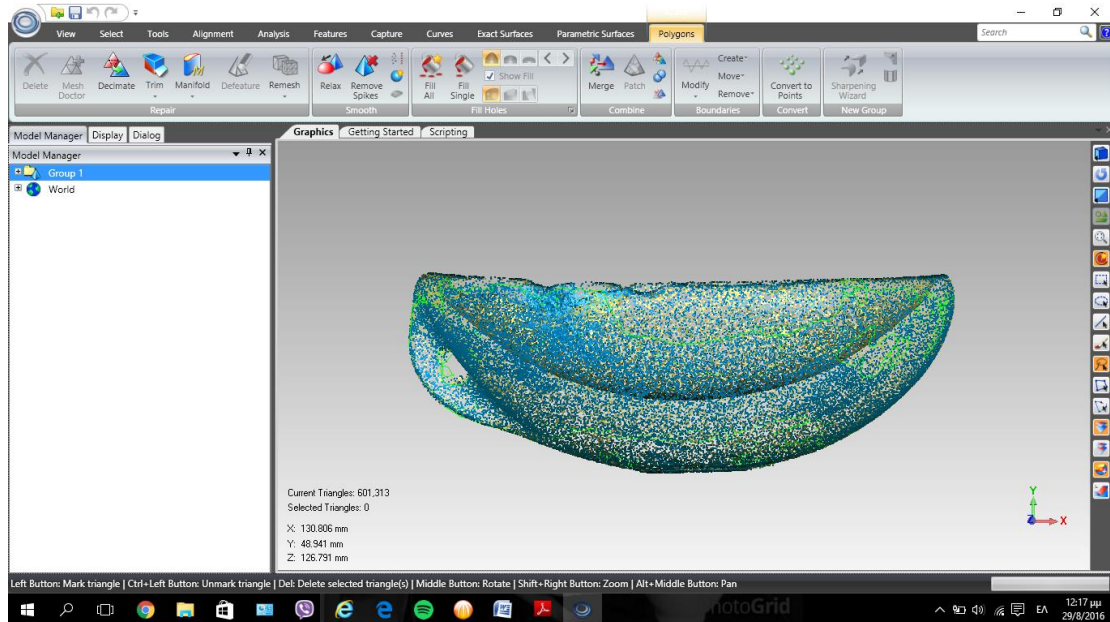
Εικόνα 33. Αποτέλεσμα manual registration

Για ένα ακόμα καλύτερο αποτέλεσμα χρησιμοποιούμε την εντολή **Global Registration** του μενού Alignment, η οποία κάνει καλύτερη ενοποίηση των δύο νεφών με βάση τις θέσεις όλων των σημείων.



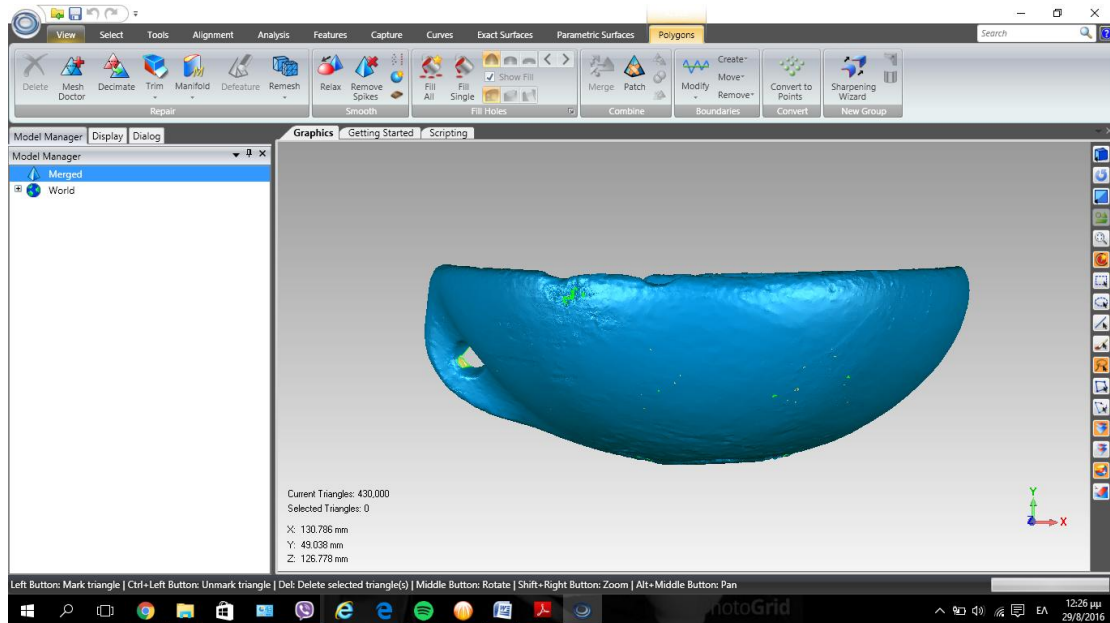
Εικόνα 34. Global registration

Στη φάση αυτή το νέφος σημείων θα περάσει σε φάση πολυγώνων με χρήση της εντολής **Wrap**, η οποία από τα σημεία που απεικονίζουν το αντικείμενο παράγει τριγωνικό πλέγμα.



Εικόνα 35. Wrap

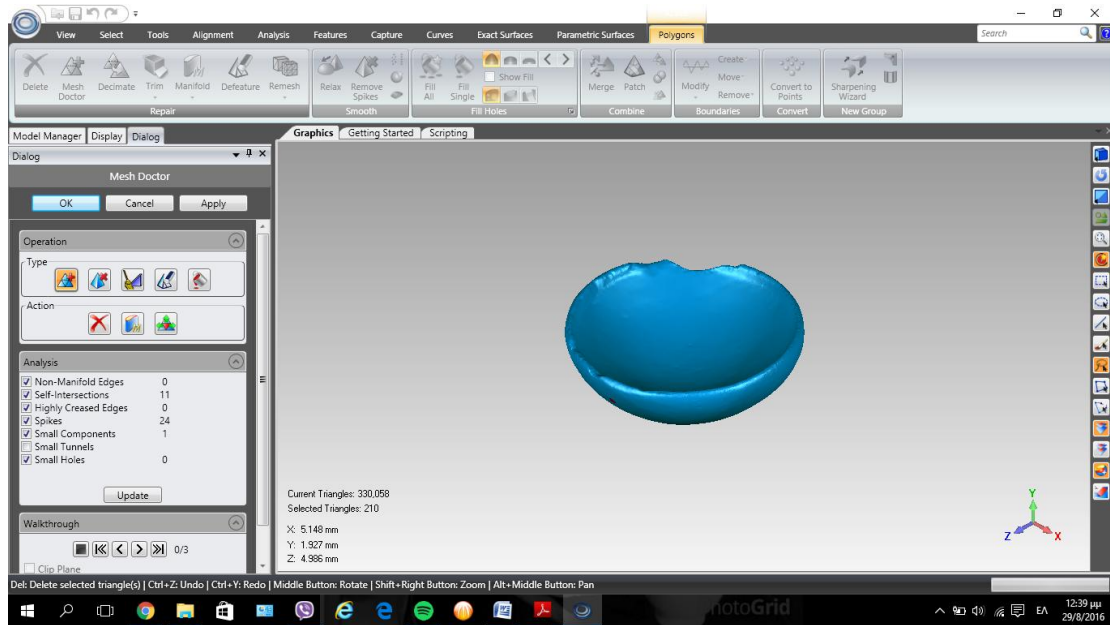
Έπειτα, συνθέτουμε το αντικείμενο στην τελική του μορφή, διαδικασία η οποία πραγματοποιείται μέσω της εντολής **Merge**, η οποία κάνει ταυτόχρονα μείωση θορύβου και διορθώνει τα τρίγωνα προκειμένου να έχουμε ένα πιο άρτιο αποτέλεσμα, βάσει στατιστικών. Στις παραμέτρους της εντολής, ύστερα από δοκιμές το καλύτερο αποτέλεσμα προκύπτει ορίζοντας το μέγιστο αριθμό τριγώνων στα 430000.



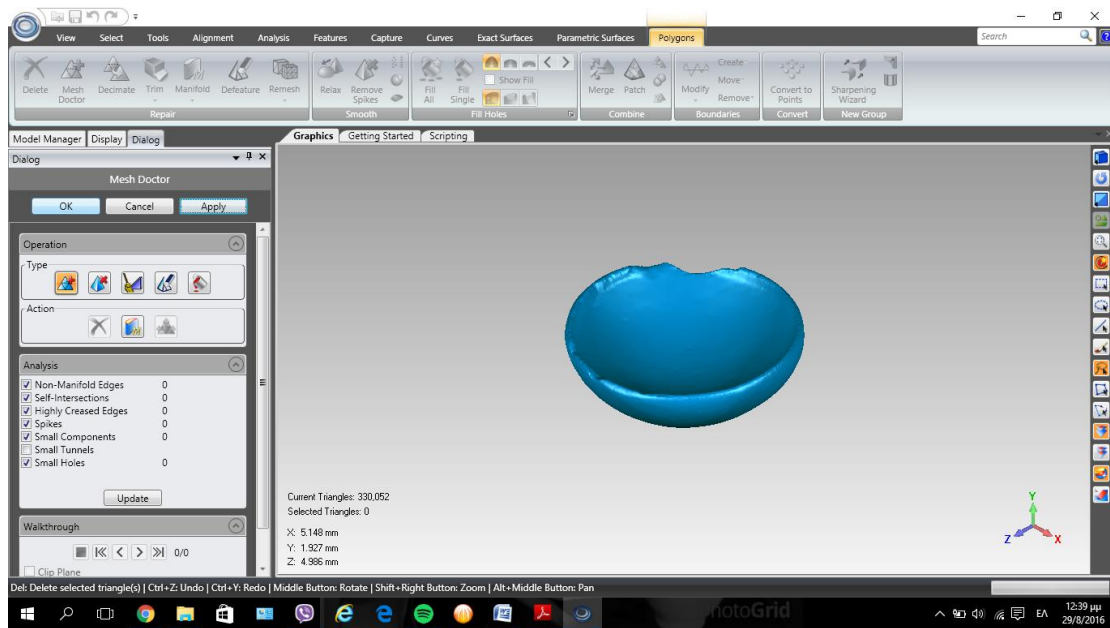
Εικόνα 36. Αποτέλεσμα wrap

Παρατηρούμε ότι στο μοντέλο έχουν προκύψει κάποιες τρύπες οι οποίες είναι εμφανείς με πράσινο περίγραμμα. Οι τρύπες αυτές κλείνουν με χρήση της εντολής **Fill Holes** με σκοπό να έχουμε ένα τελικό water-tight μοντέλο, κλειστό δηλαδή, ώστε να γίνει αποθήκευση του αρχείου σε μορφή .stl, προκειμένου να προχωρήσουμε σε επεξεργασία του μοντέλου στο πρόγραμμα Rhino.

Τέλος, μια τελική επεξεργασία της μαρμάρινης φιάλης γίνεται με την εντολή **Mesh Doctor**, η οποία δείχνει τις ατέλειες που υπάρχουν στο mesh το οποίο έχουμε καταλήξει και τελικά τις διορθώνει.

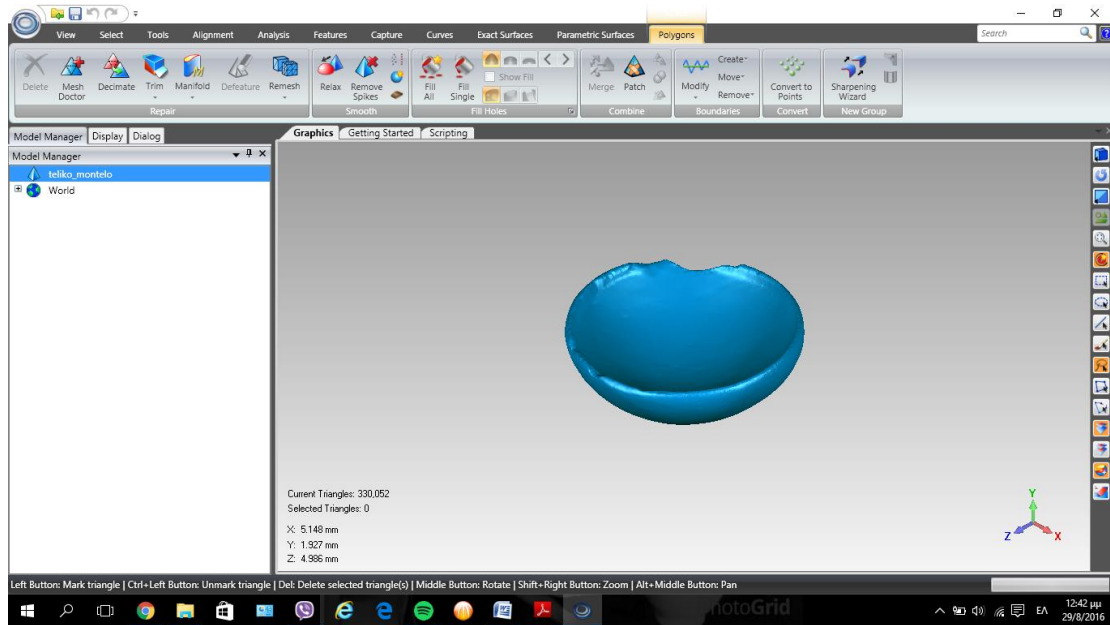


Εικόνα 37. Mesh doctor

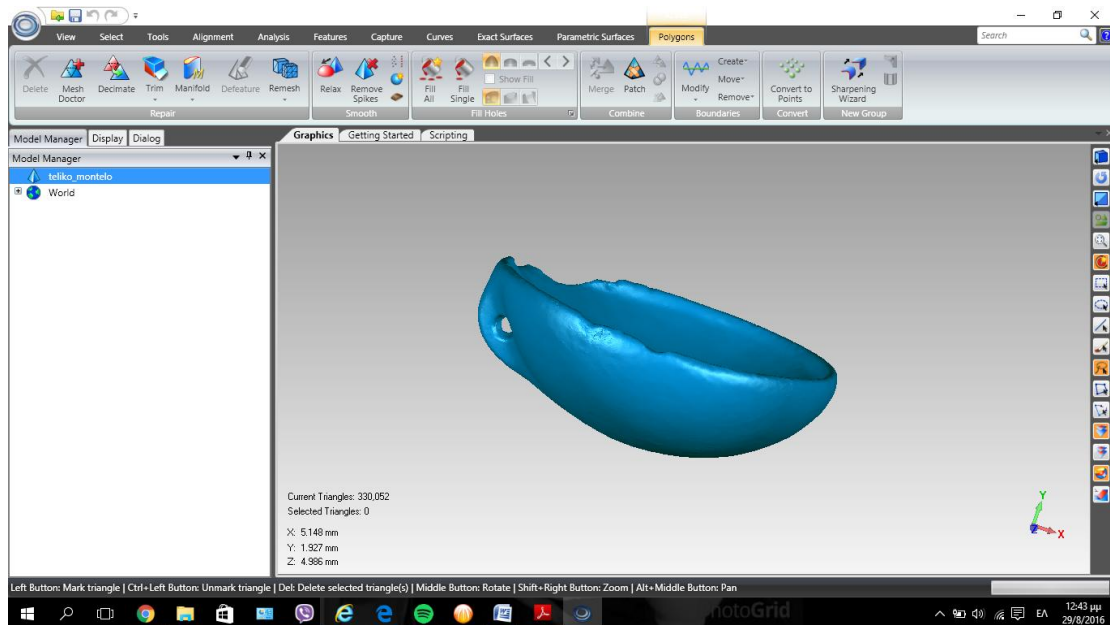


Εικόνα 38. Mesh doctor

Το τελικό αποτέλεσμα της επεξεργασίας του νέφους σημείων που προέκυψε από τη σάρωση της μαρμαρίνης φιάλης, είναι ένα πλέγμα το οποίο αποτελείται από 330.052 τρίγωνα.



Εικόνα 39. Αποτέλεσμα mesh doctor



Εικόνα 40. Αποτέλεσμα mesh doctor

5.4 Μεταφορά στο λογισμικό Rhino 3d v.5

Ύστερα από την επεξεργασία στο λογισμικό Geomagic του νέφους σημείων που προέκυψε από τη σάρωση της μαρμάρινης φιάλης προκειμένου να προκύψει αρχείο CAD, ήρθε η ώρα για τη μεταφορά του αρχείου αυτού στο λογισμικό Rhino, ώστε να ξεκινήσει η αποκατάσταση του τεμαχίου.

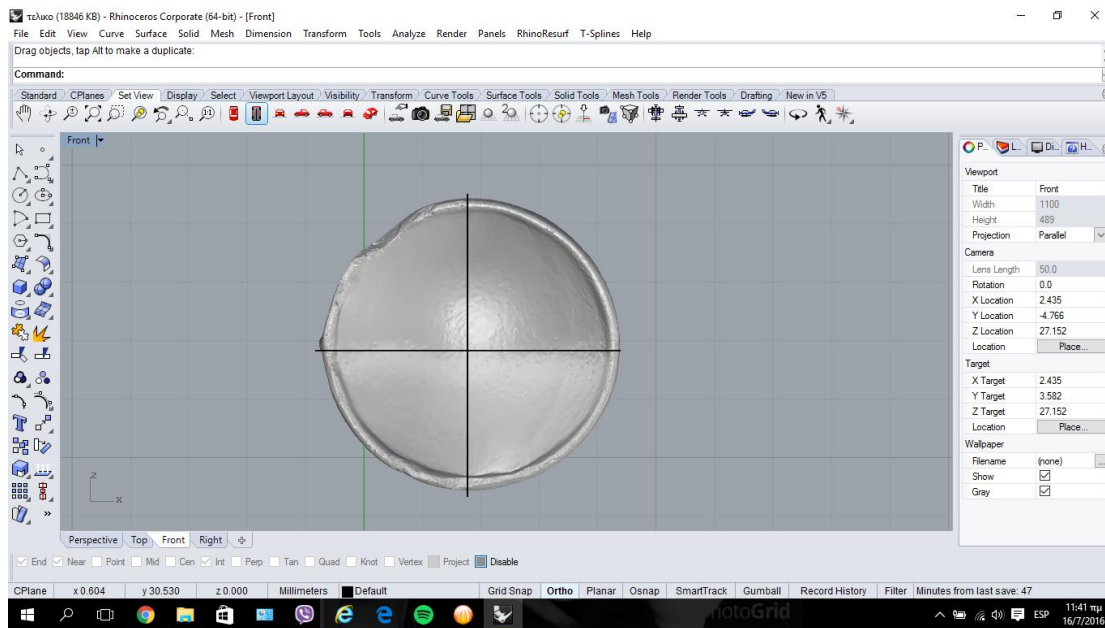
Όταν ξεκίνησε η επεξεργασία αυτή, η αρχική ιδέα ήταν να σχεδιαστεί ακριβώς το τμήμα εκείνο το οποίο έχει αποκοπεί. Ύστερα όμως από πολλές προσπάθειες, έγινε αντιληπτό πως δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί κάτι τέτοιο κάνοντας χρήση κάποιου μαθηματικού μοντέλου που θα έκανε χρήση καμπυλών, καθώς η μαρμάρινη φιάλη αποτελεί ένα αντικείμενο το οποίο αν και φαίνεται με μια πρώτη ματιά συμμετρικό, παρατηρώντας κανείς τη μορφολογία του ειδικότερα στο εσωτερικό κομμάτι του, συμπεραίνει πως δεν ισχύει κάτι τέτοιο.

Πέρα από το γεγονός αυτό, δεν ήταν δυνατό να κατασκευαστεί με μαθηματικό μοντέλο ένα σχέδιο του οποίου η μορφολογία θα ήταν η «αρνητική» του θραυσμένου τμήματος προκειμένου αυτό να ταιριάζει.

Η επόμενη ιδέα ήταν η σχεδίαση ενός στερεού (solid) αντικείμενου, το οποίο θα χρησιμοποιούνταν προκειμένου να πάρουμε το «αποτύπωμα» του τμήματος που έχει υποστεί θραύση, και με περαιτέρω επεξεργασία λαμβάνοντας υπόψη την καμπυλότητα της φιάλης, θα ολοκληρωνόταν το σχέδιο του τμήματος που λείπει από το τεμάχιο μας.

Ούτε κάτι τέτοιο όμως ήταν δυνατόν, καθώς το πρόγραμμα Rhino, λειτουργεί βάσει περιγραμμάτων, όπως και οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές. Επομένως, αν και το δεύτερο αντικείμενο που σχεδιάστηκε προκειμένου να πάρουμε το «αποτύπωμα» ήταν στερεό και όχι επιφάνεια, το πρόγραμμα ουσιαστικά το αντιλαμβάνεται ως ένα κλειστό περίγραμμα και όχι ως ένα αντικείμενο συμπαγές. Έτσι, δεν ήταν δυνατό να γίνει μια τομή του στερεού αυτού από τη μαρμάρινη φιάλη ώστε να προκύψει το ζητούμενο «αρνητικό» κομμάτι.

Τελικά, παρατηρώντας το εσωτερικό τμήμα του αντικειμένου, έγινε αντιληπτό πως ταιριάζουν μορφολογικά το πρώτο και το τέταρτο τεταρτημόριο, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

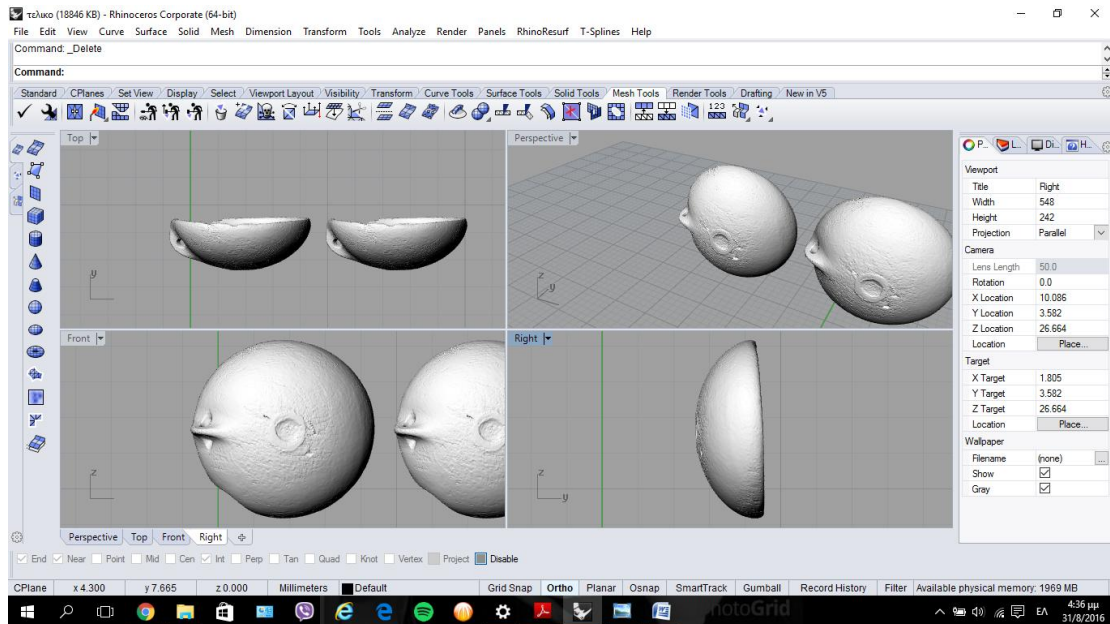


Εικόνα 41. Εσωτερική μορφολογία αντικειμένου

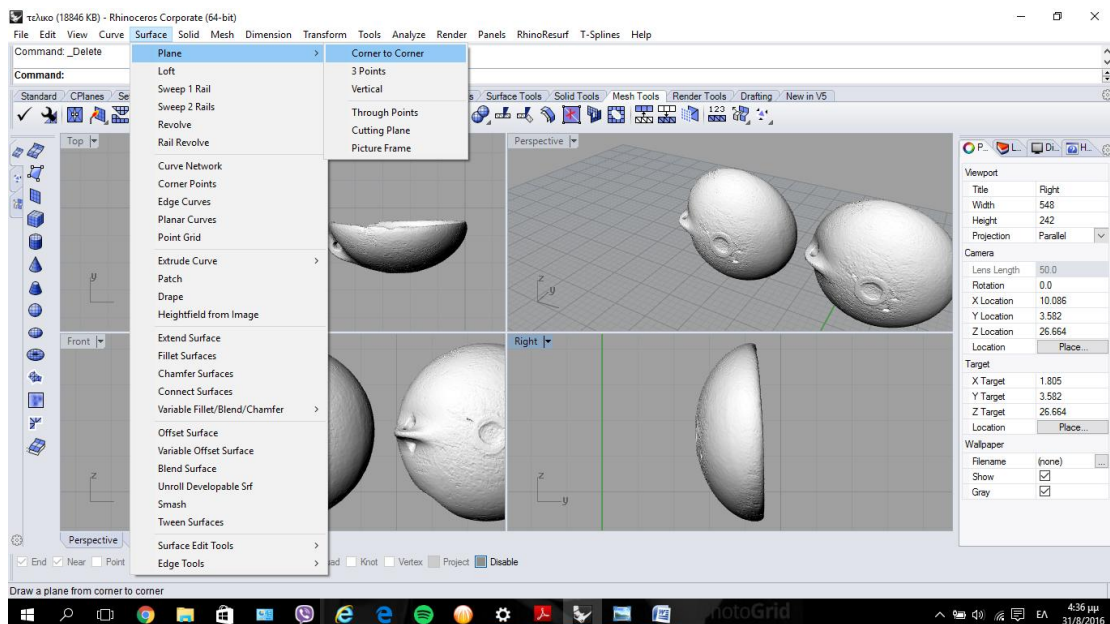
Έτσι, προέκυψε η ιδέα της κατασκευής του ζητούμενου κομματιού χρησιμοποιώντας τμήμα της ίδιας της φιάλης. Η ιδέα αυτή ξεκίνησε να υλοποιείται με εντολές τύπου mirror. Καθώς όμως το αντικείμενο δεν είναι πλήρως συμμετρικό όπως έχει προαναφερθεί, το αποτέλεσμα δεν ήταν καθόλου ικανοποιητικό.

Ένας άλλος τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ο παραπάνω στόχος, ήταν η κοπή ενός τμήματος του πρώτου τεταρτημορίου το οποίο θα αποτελέσει ουσιαστικά τη ζητούμενη προσθήκη. Η κοπή αυτή θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση επιπέδων τα οποία θα σχεδιάζονται κάθε φορά ανάλογα με το κομμάτι που θέλουμε να κόψουμε. Η διαδικασία φαίνεται παρακάτω.

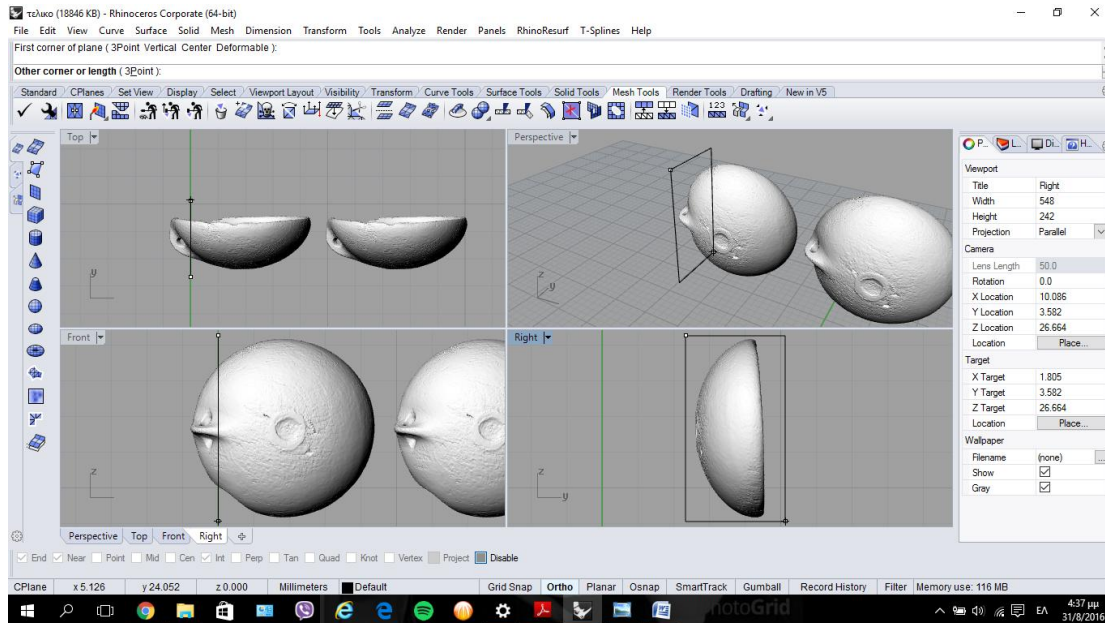
Αρχικά, μέσω της εντολής **Copy** αντιγράφουμε τη μαρμάρινη φιάλη και έπειτα με τις εντολές **Surface** → **Plane** → **Corner to Corner** σχεδιάζουμε το πρώτο επίπεδο προκειμένου να κόψουμε τη φιάλη στη μέση.



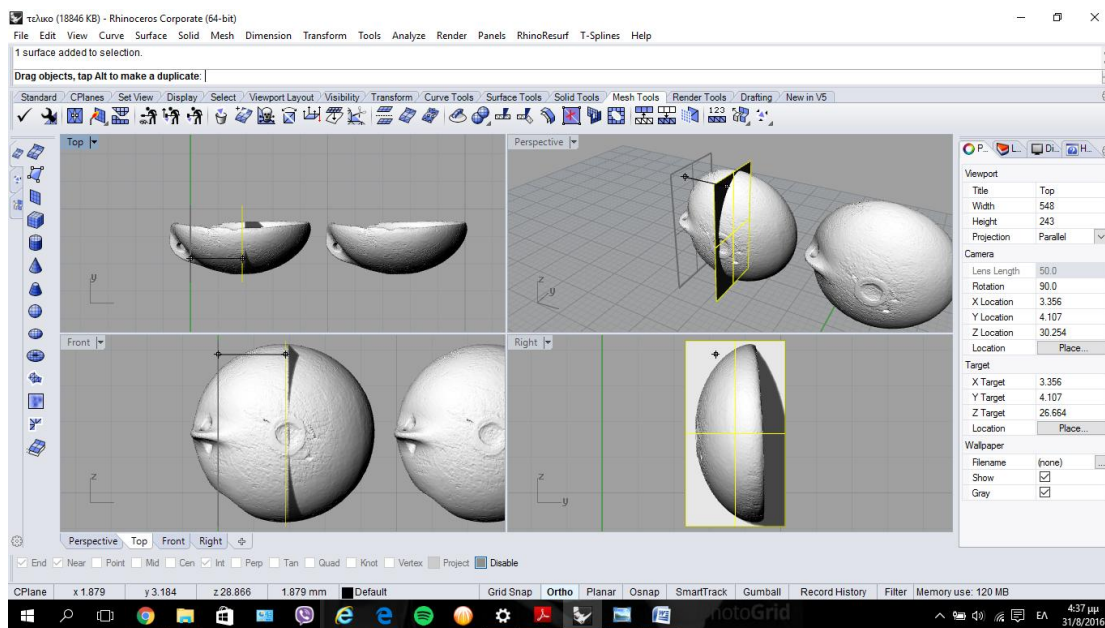
Εικόνα 42



Εικόνα 43

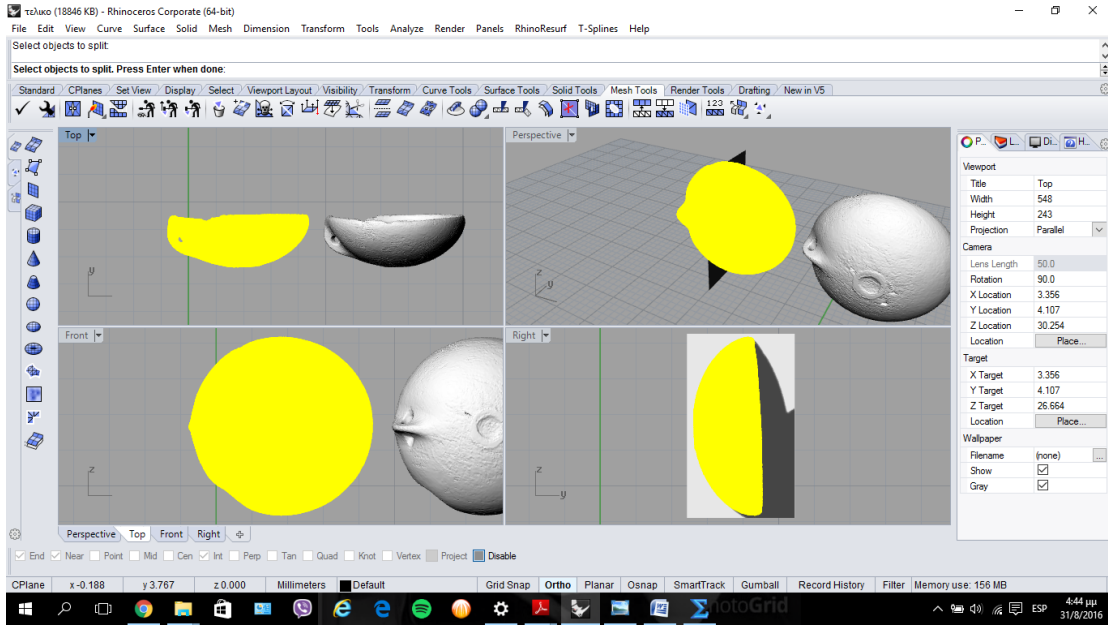


Εικόνα 43

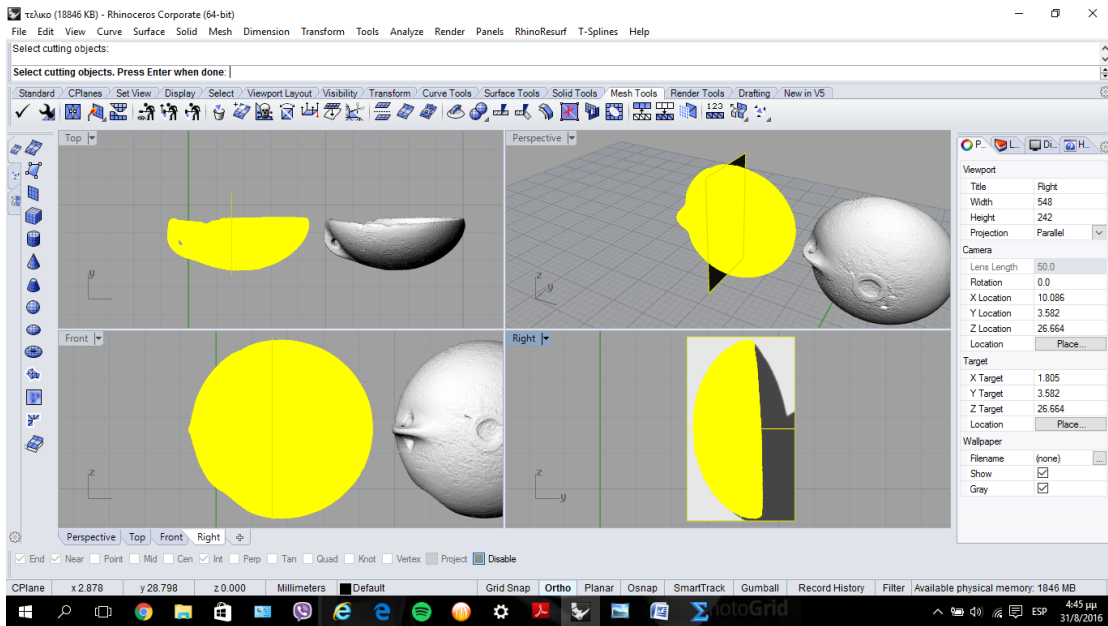


Εικόνα 44

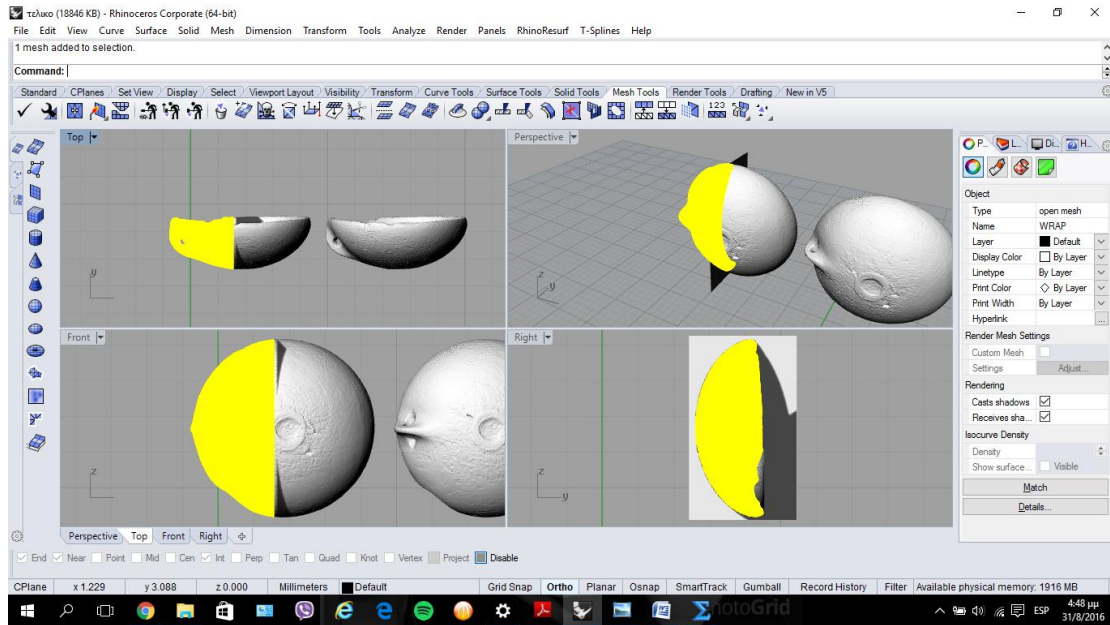
Τώρα, με τη εντολή **Meshsplit** χωρίζουμε το πλέγμα σε δύο πλέγματα με βάση το επίπεδο που σχεδιάσαμε και έπειτα διαγράφουμε εκείνο το κομμάτι που δε χρειαζόμαστε. Όταν στη μπάρα εντολών εμφανίζεται **select objects to split** επιλέγουμε όλο το πλέγμα, ενώ όταν εμφανίζεται **select cutting objects** επιλέγουμε το επίπεδο και τελικά πατάμε enter.



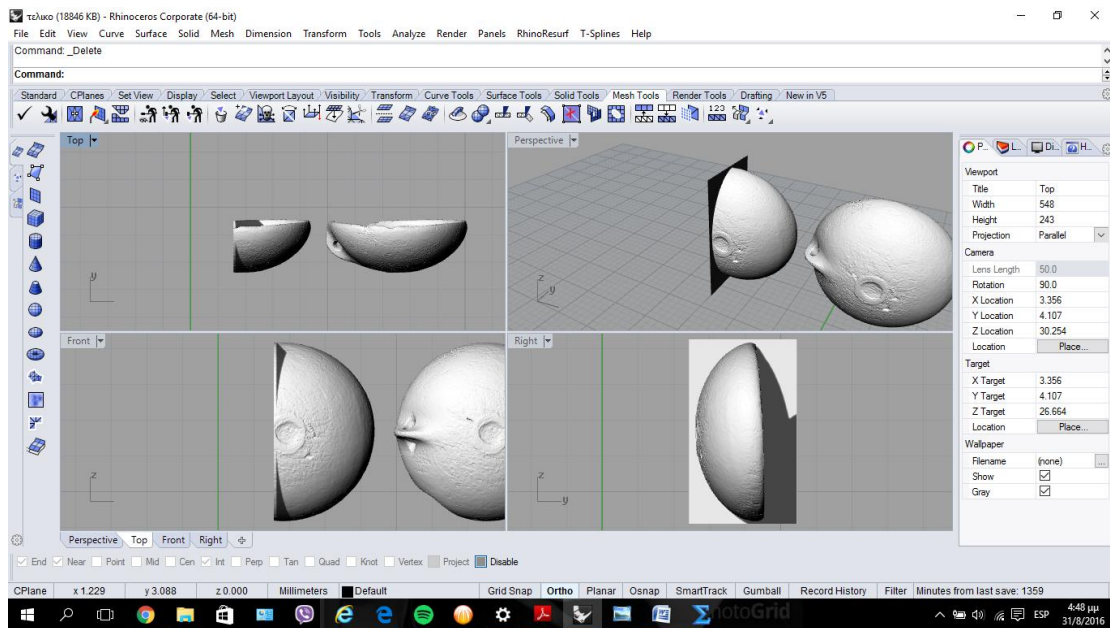
Εικόνα 45



Εικόνα 46

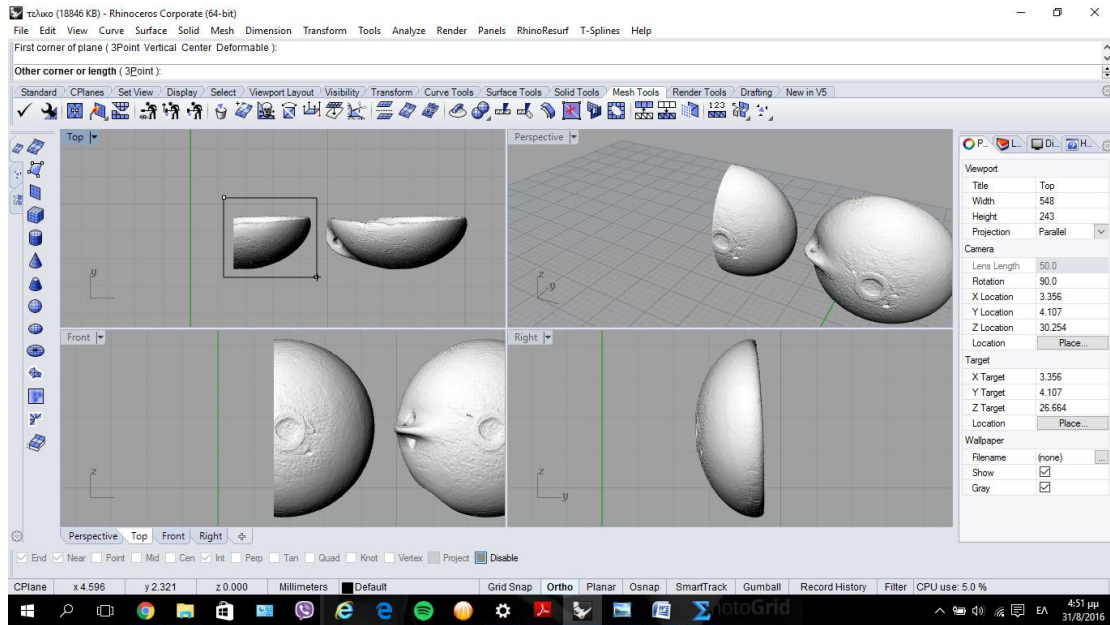


Εικόνα 47

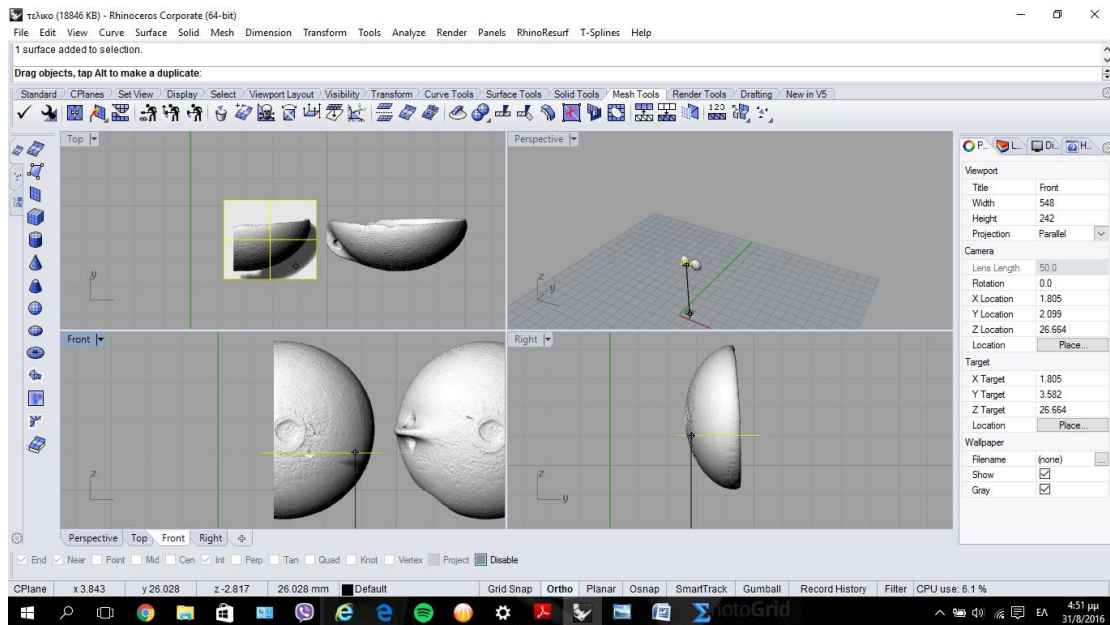


Εικόνα 48

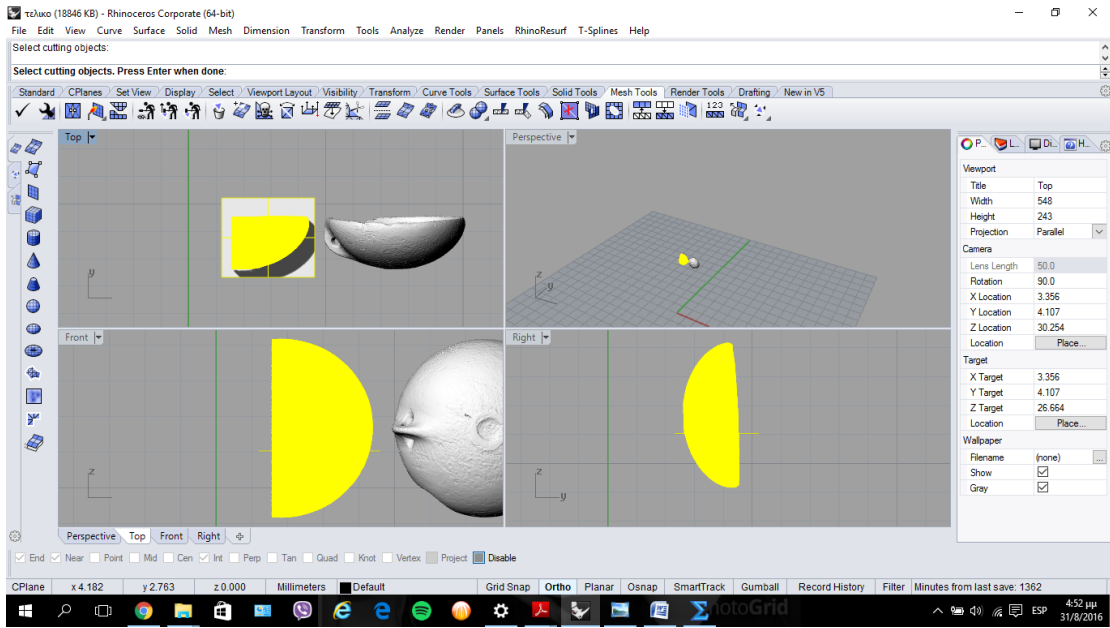
Συνεχίζεται η ίδια διαδικασία σχεδιάζοντας κάθε φορά το αντίστοιχο επίπεδο ανάλογα με το τμήμα που θέλω να κόψω, μέχρι να μείνει το κομμάτι που θέλουμε.



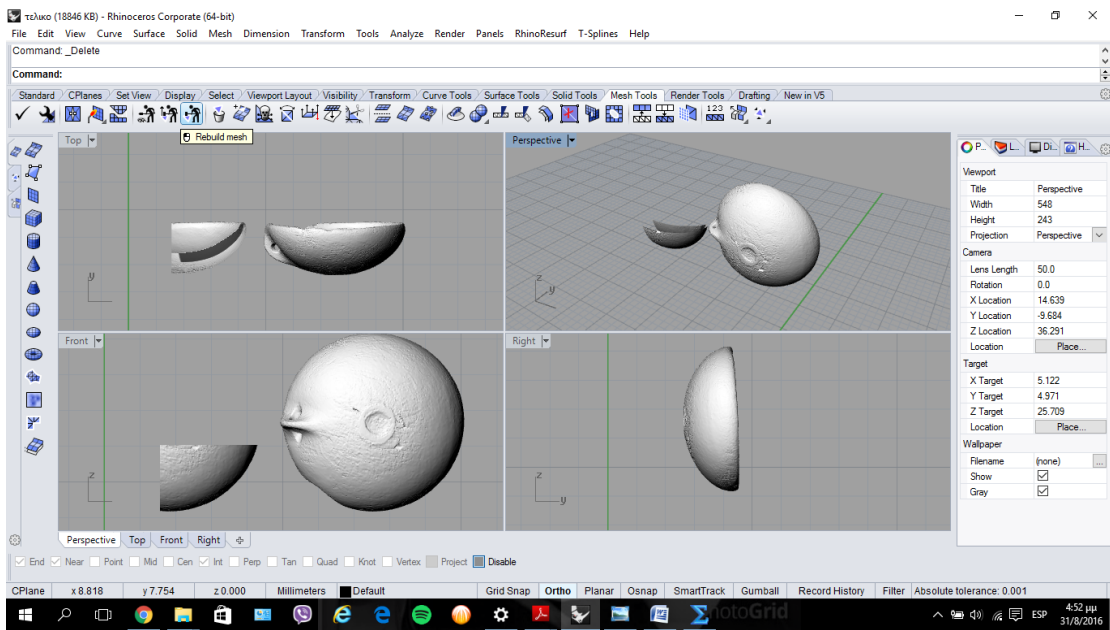
Εικόνα 49



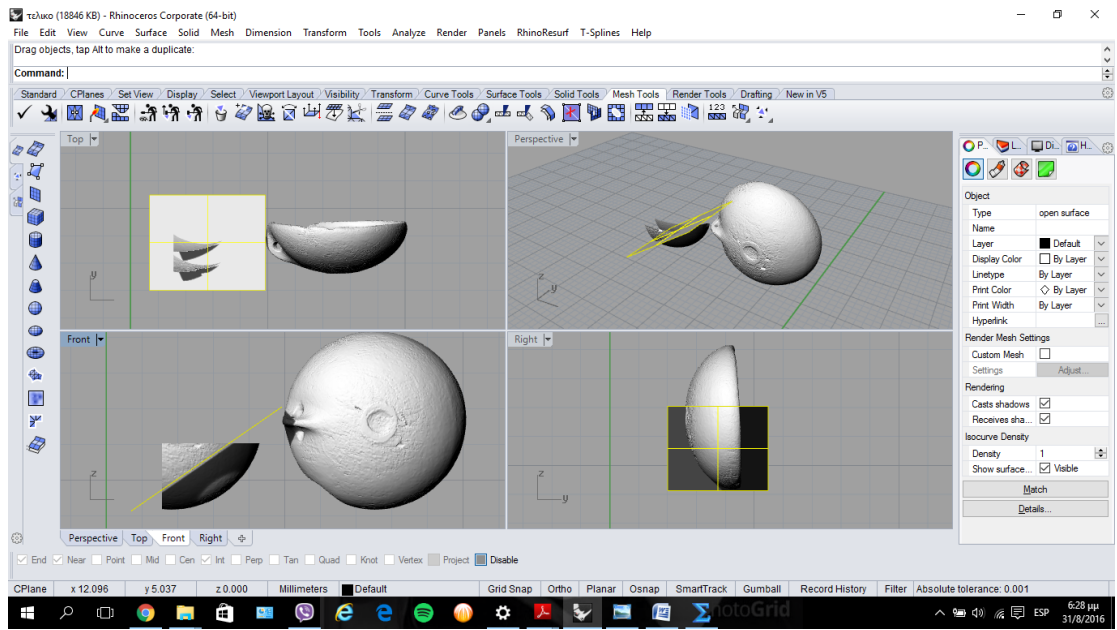
Εικόνα 50



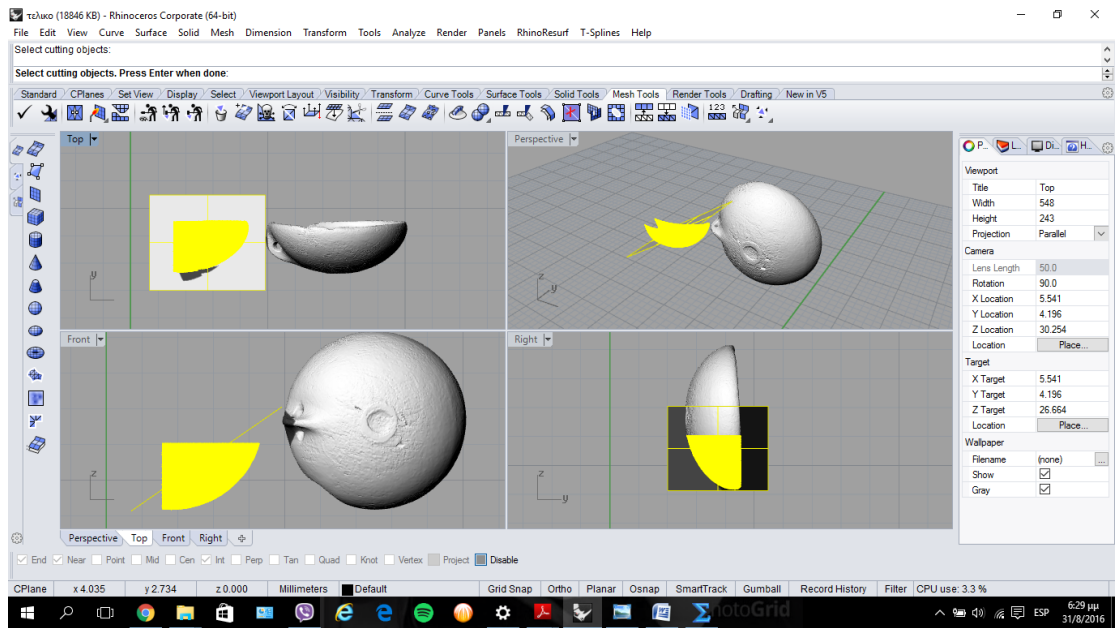
Εικόνα 51



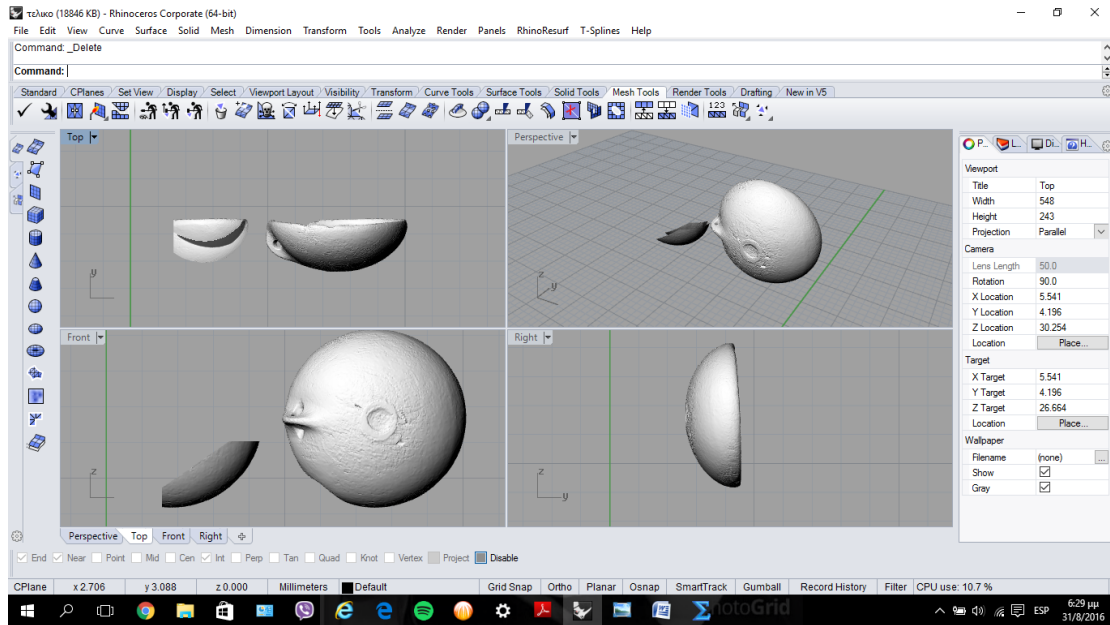
Εικόνα 52



Εικόνα 53

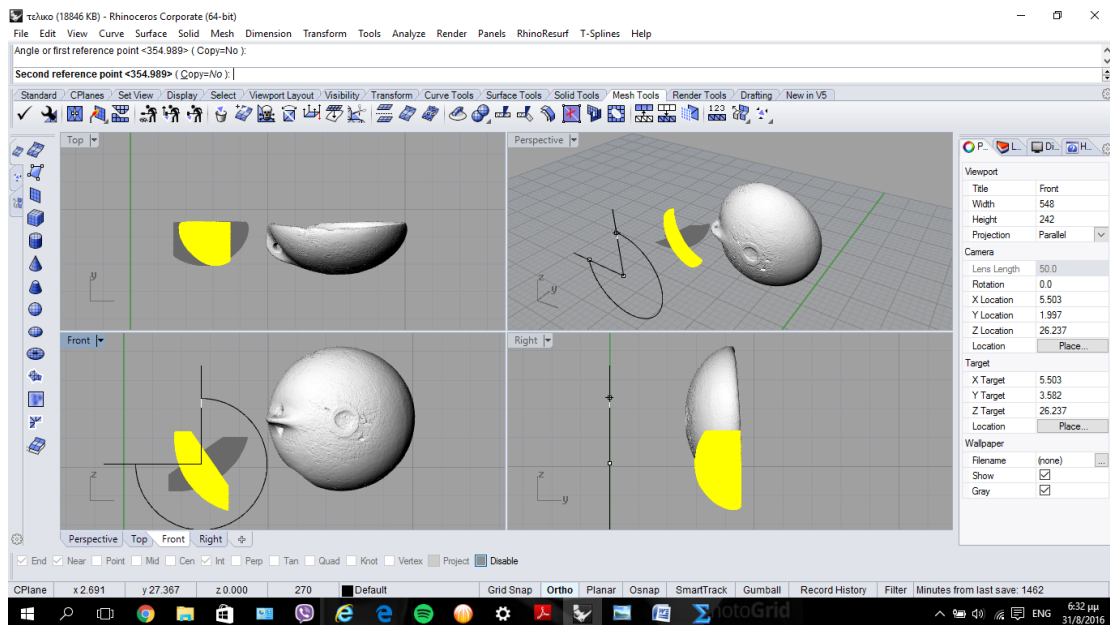


Εικόνα 54



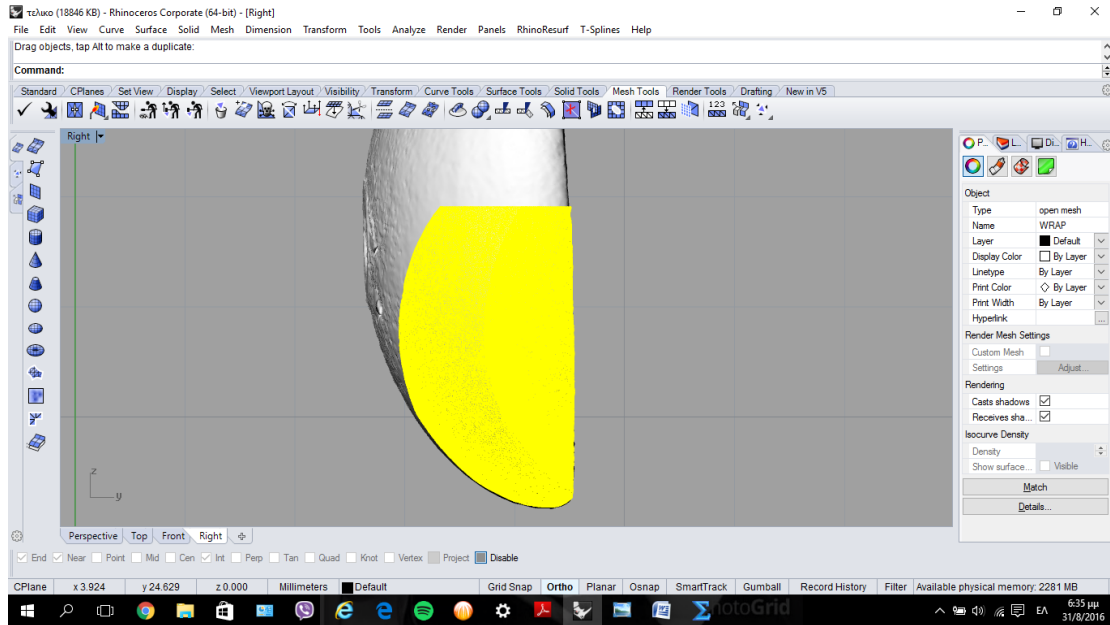
Εικόνα 55

Τώρα, περιστρέφουμε το κομμάτι που αποτελεί την προσθήκη ώστε να έχει το ζητούμενο προσανατολισμό με την εντολή **rotate**.

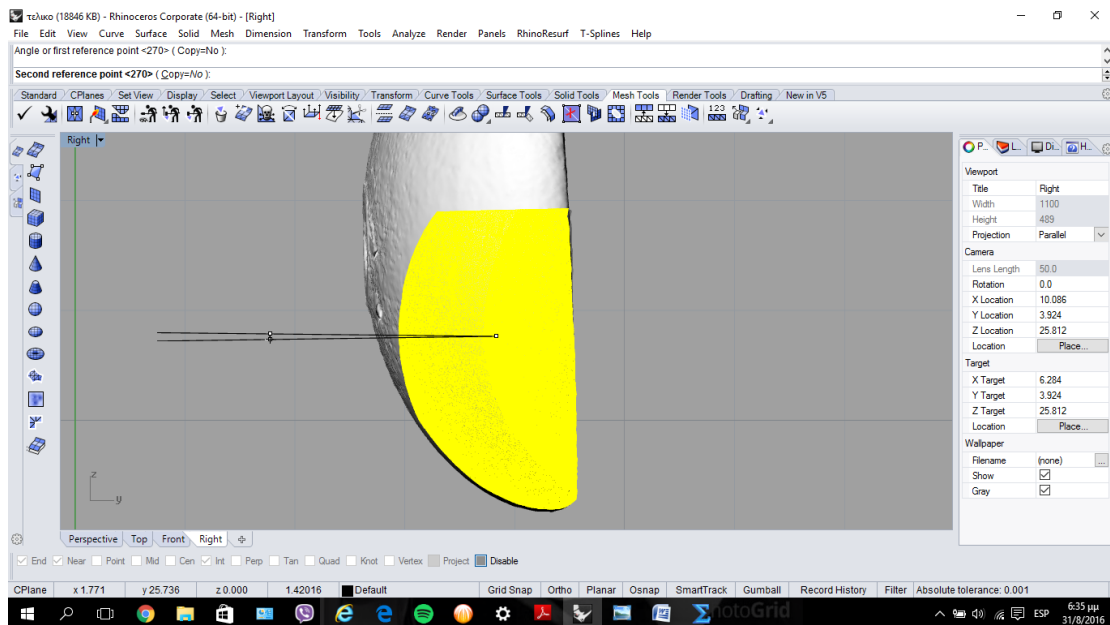


Εικόνα 56

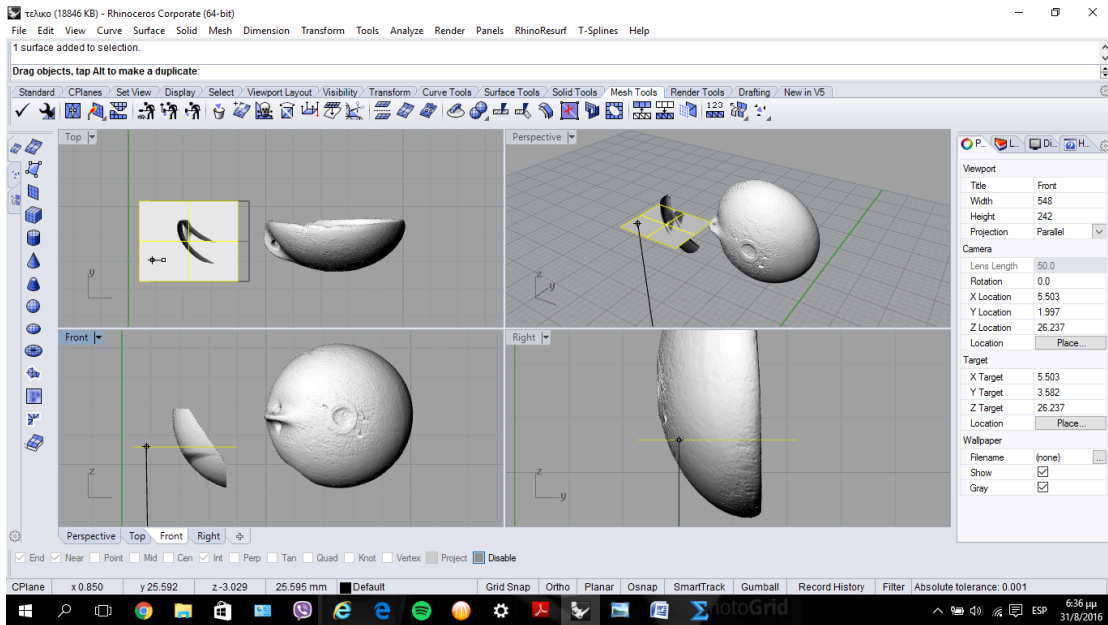
Συνεχίζουμε τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω ώστε να προσαρμοστεί όσο το δυνατόν καλύτερα η προσθήκη στη φιάλη.



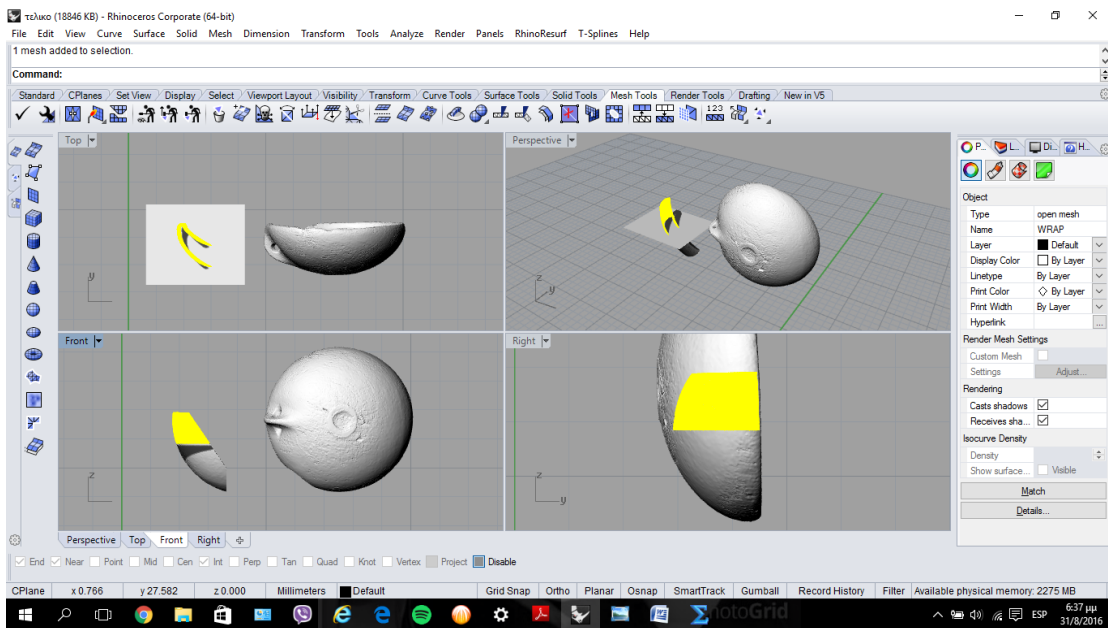
Εικόνα 57



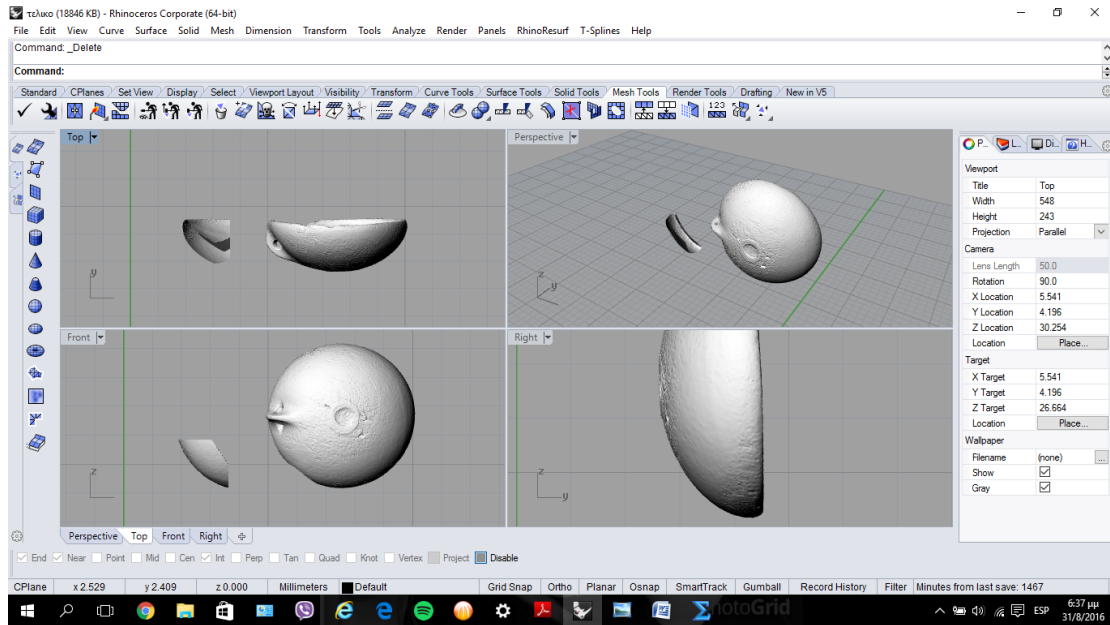
Εικόνα 58



Εικόνα 59

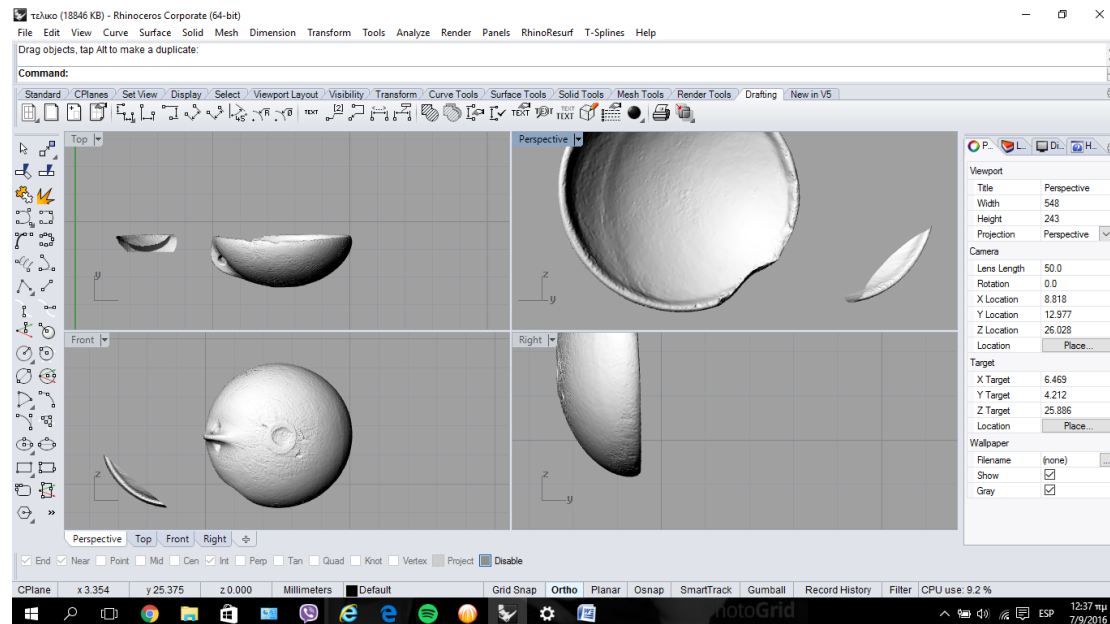


Εικόνα 60

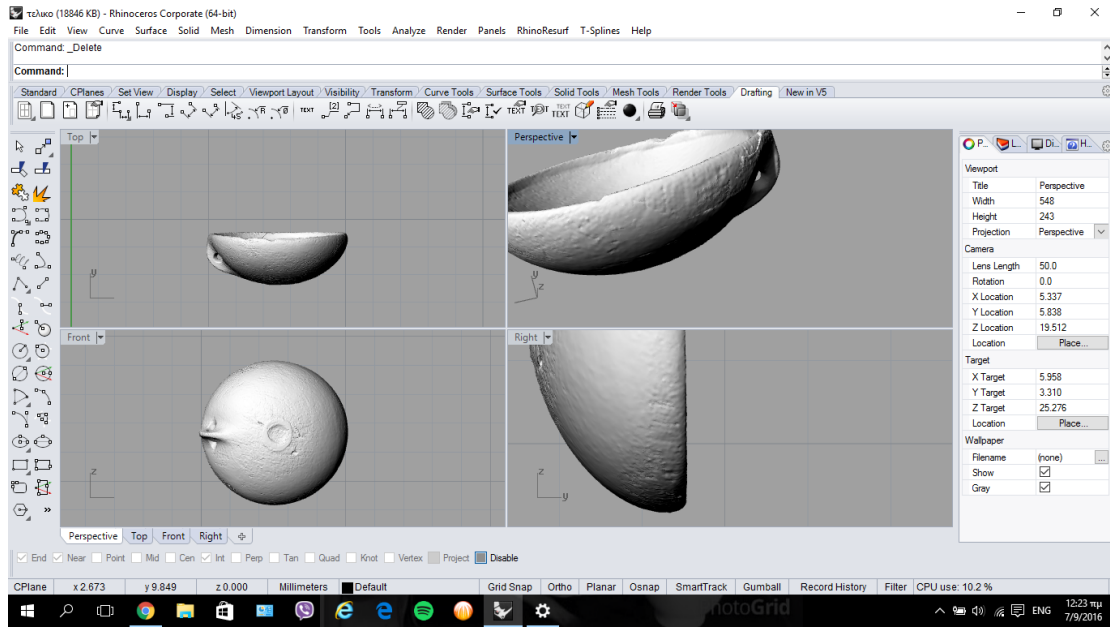


Εικόνα 61

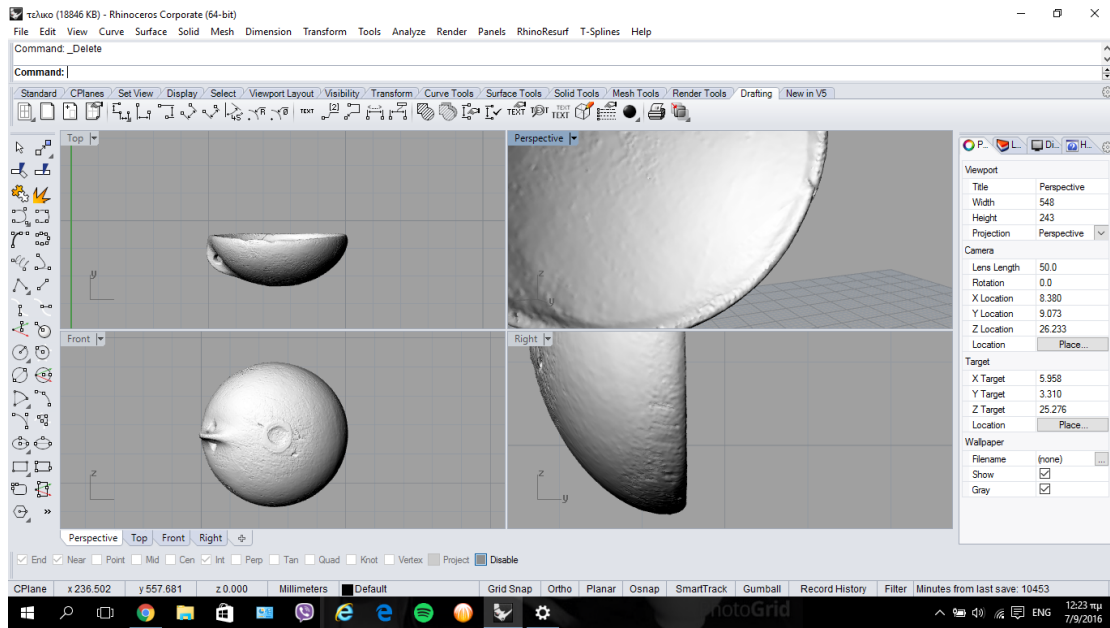
Τοποθετούμε την προσθήκη στο ολόκληρο κομμάτι και την περιστρέφουμε προκειμένου τα όρια να χαθούν στο ολόκληρο τεμάχιο και να ταιριάζει μορφολογικά.



Εικόνα 62

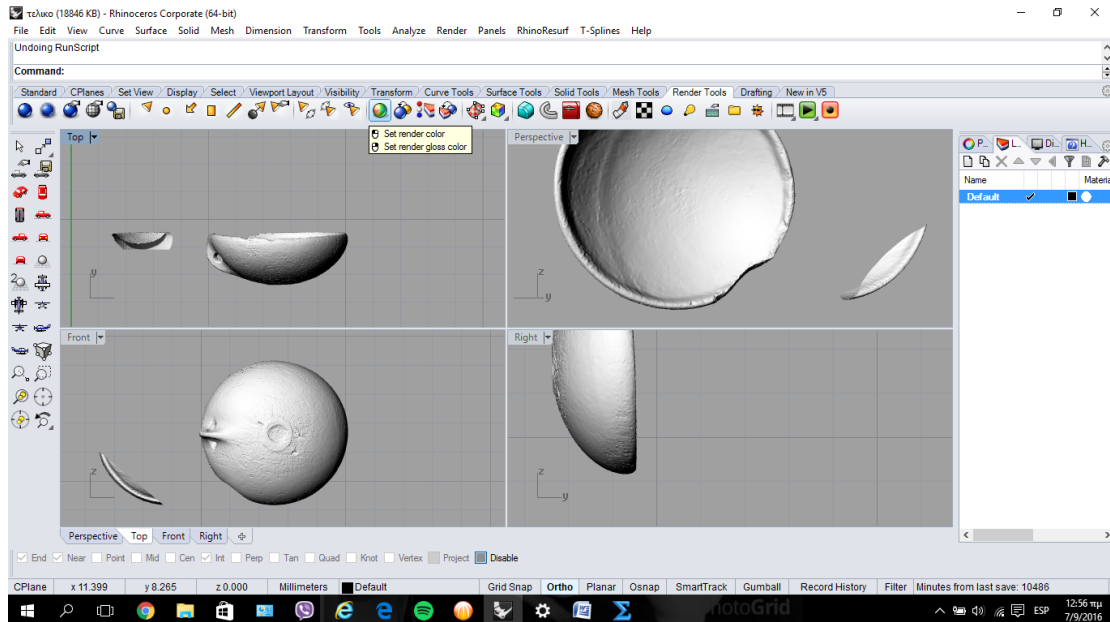


Εικόνα 63

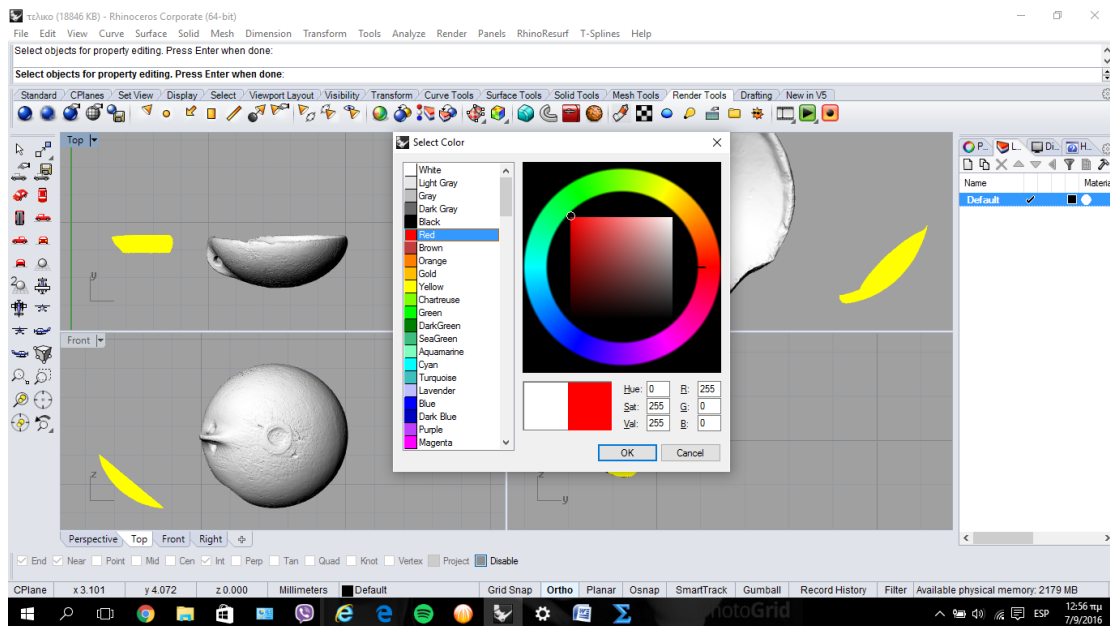


Εικόνα 64

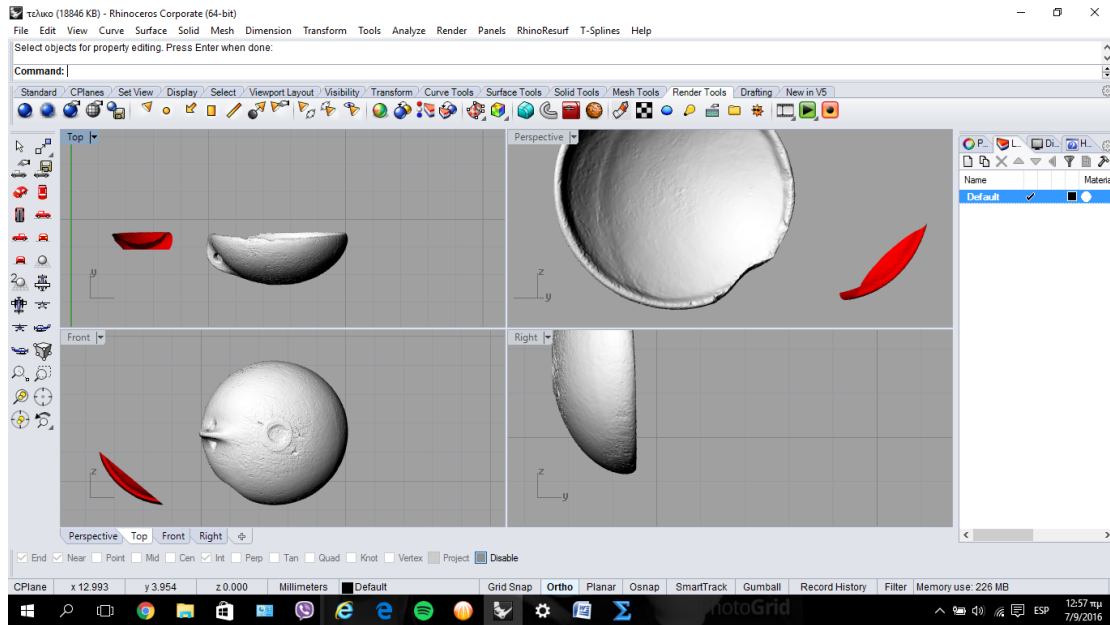
Προκειμένου να είναι εμφανής η προσθήκη, τη χρωματίζουμε με κόκκινο χρώμα χρησιμοποιώντας την εντολή της καρτέλας **render tools** → **set render color**.



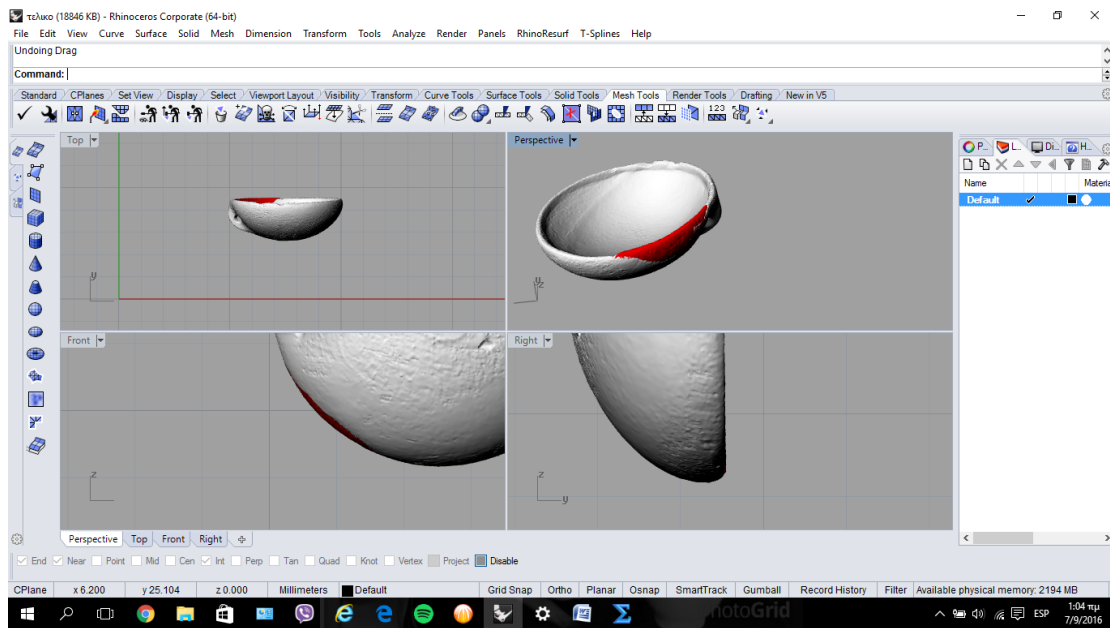
Εικόνα 65



Εικόνα 66

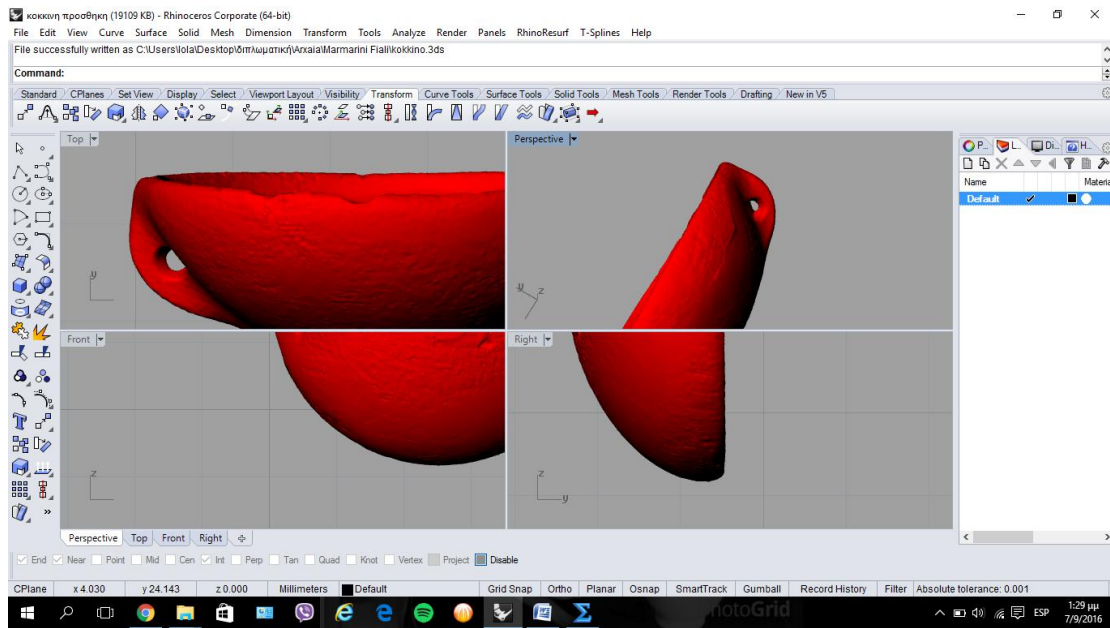


Εικόνα 67



Εικόνα 68

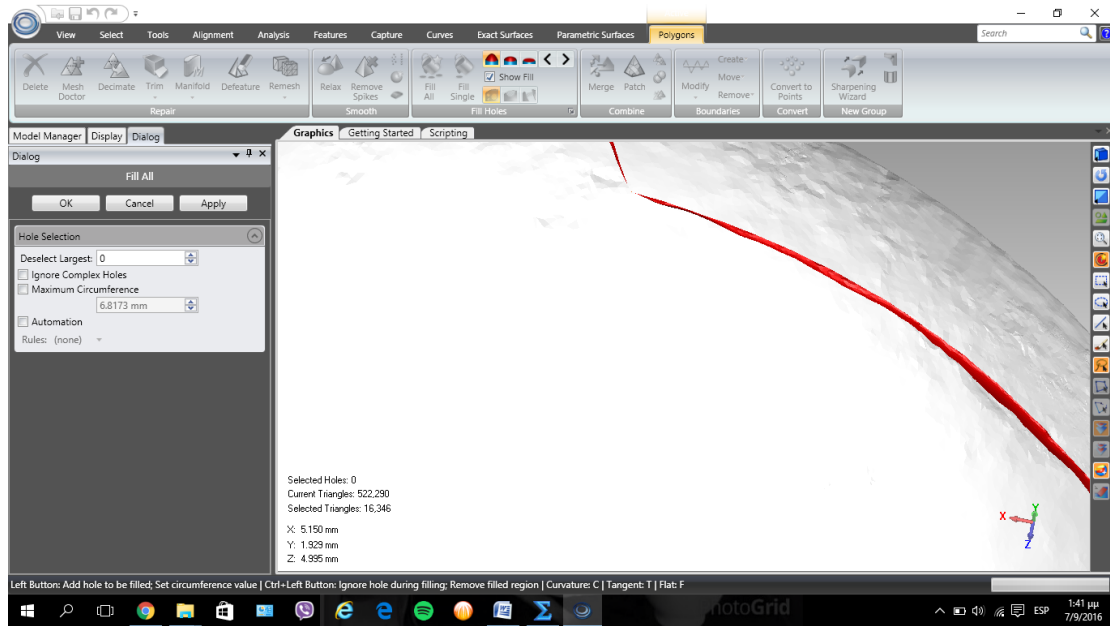
Τελικό στάδιο είναι η ενοποίηση των δύο πλεγμάτων ώστε να προκύψει ένα μοντέλο το οποίο θα αποθηκευτεί ως αρχείο **.stl** το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί από τρισδιάστατο εκτυπωτή. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εντολή **join** όπως φαίνεται παρακάτω.



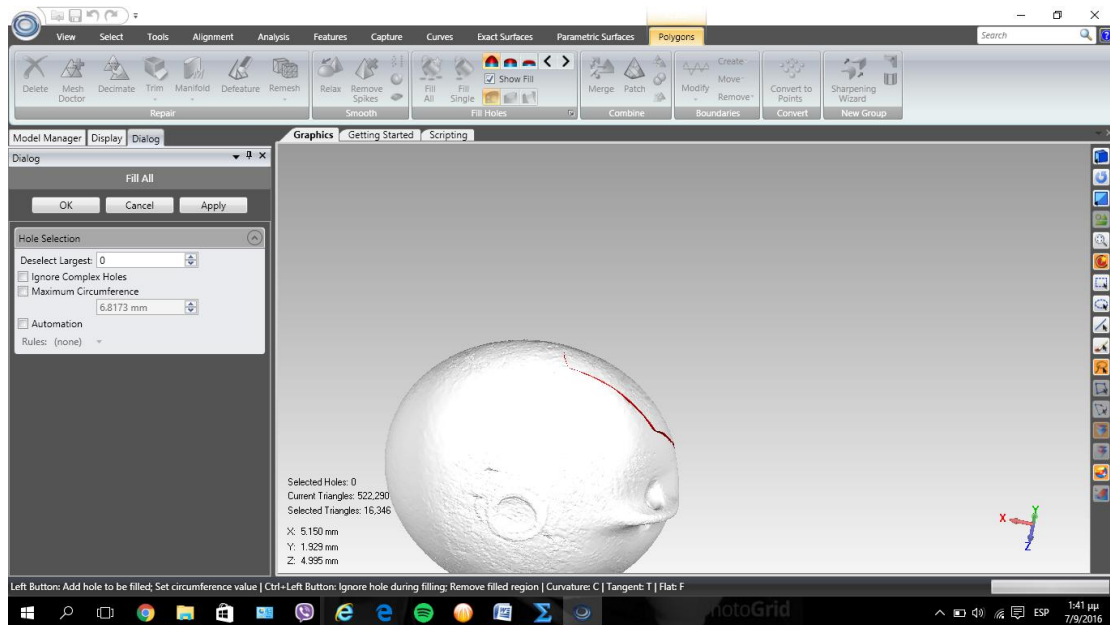
Εικόνα 69

Στο τελικό μοντέλο παρατηρούνται κάποιες ατέλειες οι οποίες όμως μπορούν να διορθωθούν μέσω του λογισμικού Geomagic του οποίου έγινε χρήση σε προηγούμενο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η κίνηση αυτή το αρχείο αποθηκεύτηκε σε μορφή .3ds.

Αρχικά, κλείνουμε τις τρύπες με την εντολή fill holes.

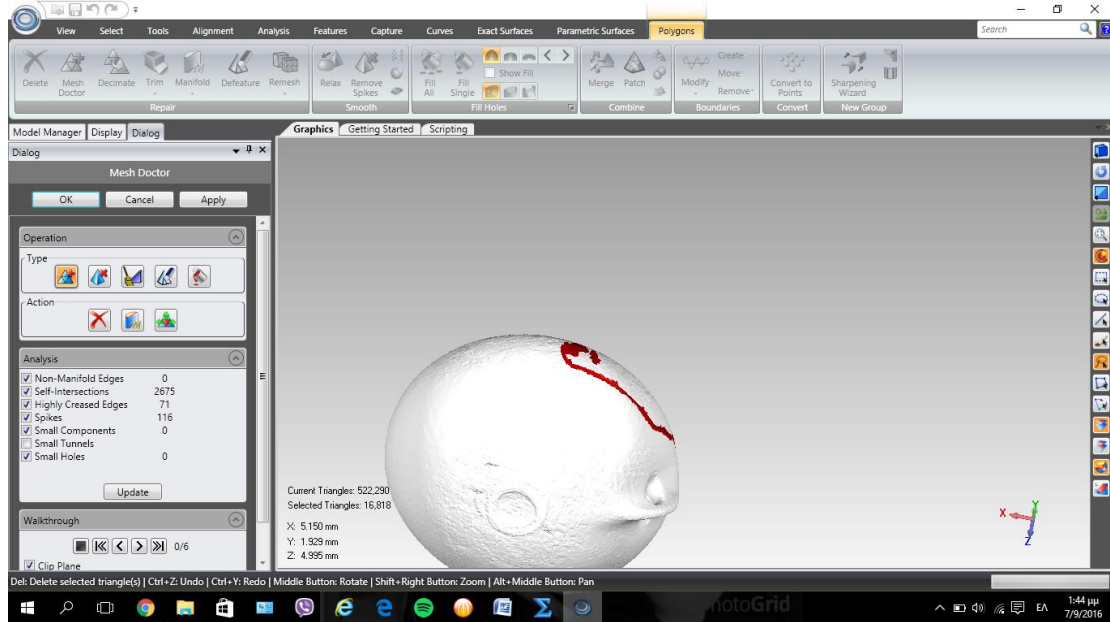


Εικόνα 70

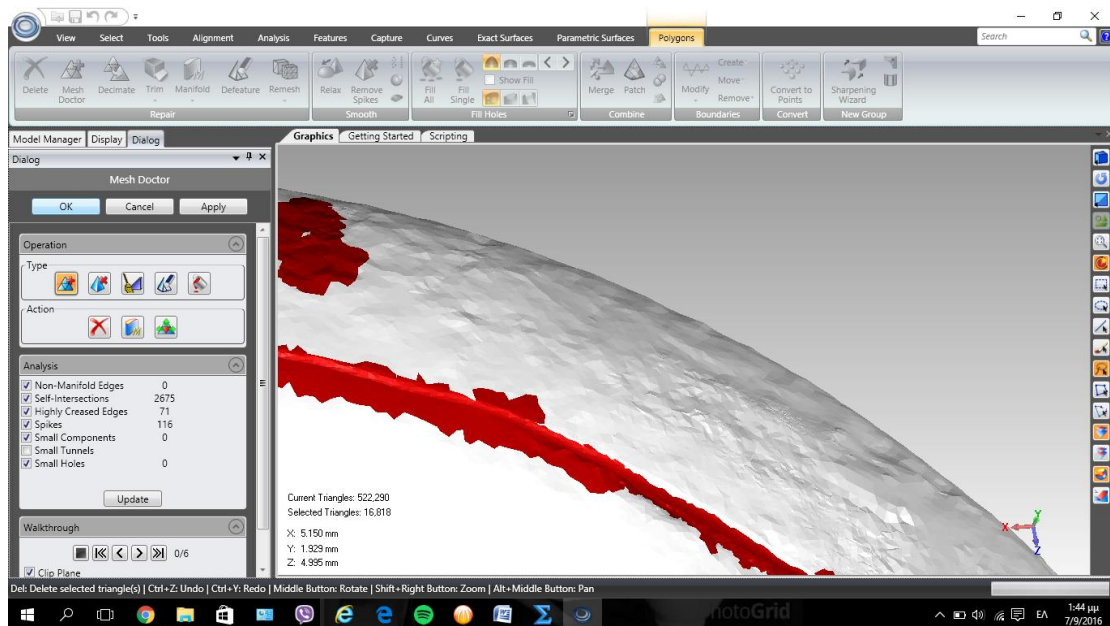


Εικόνα 71

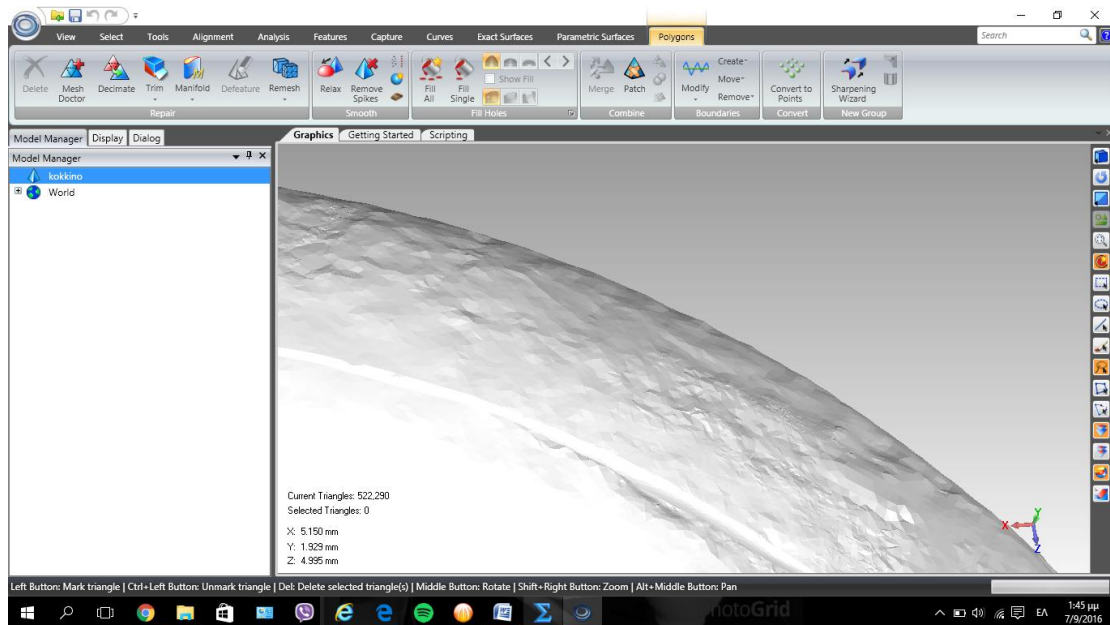
Έπειτα, με την εντολή mesh doctor διορθώνουμε το πλέγμα χρησιμοποιώντας στατιστικά.



Εικόνα 72

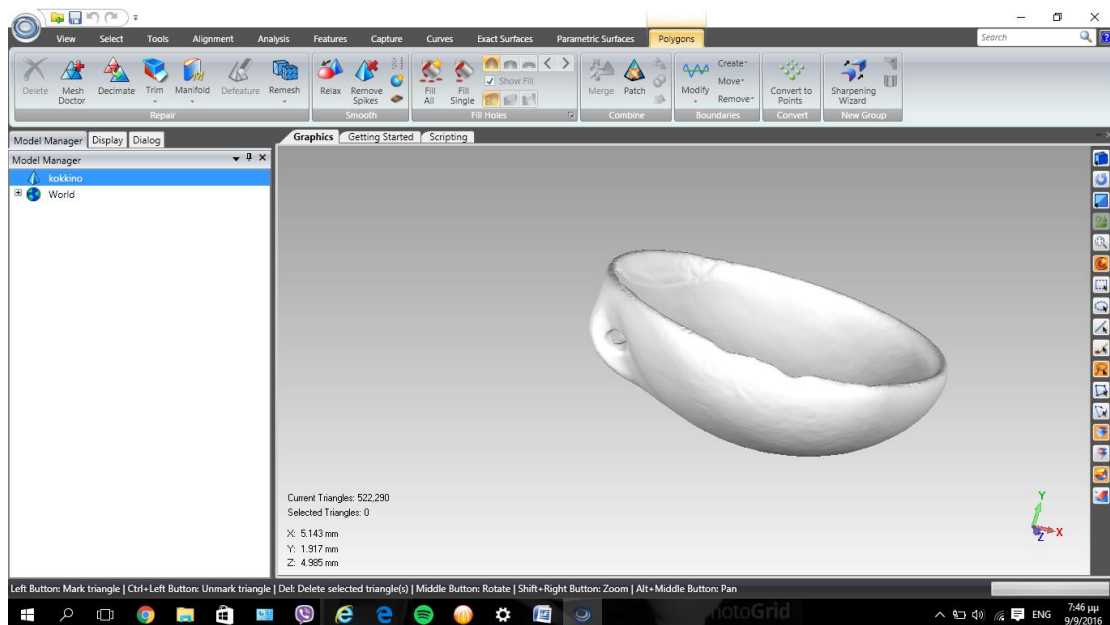


Εικόνα 73

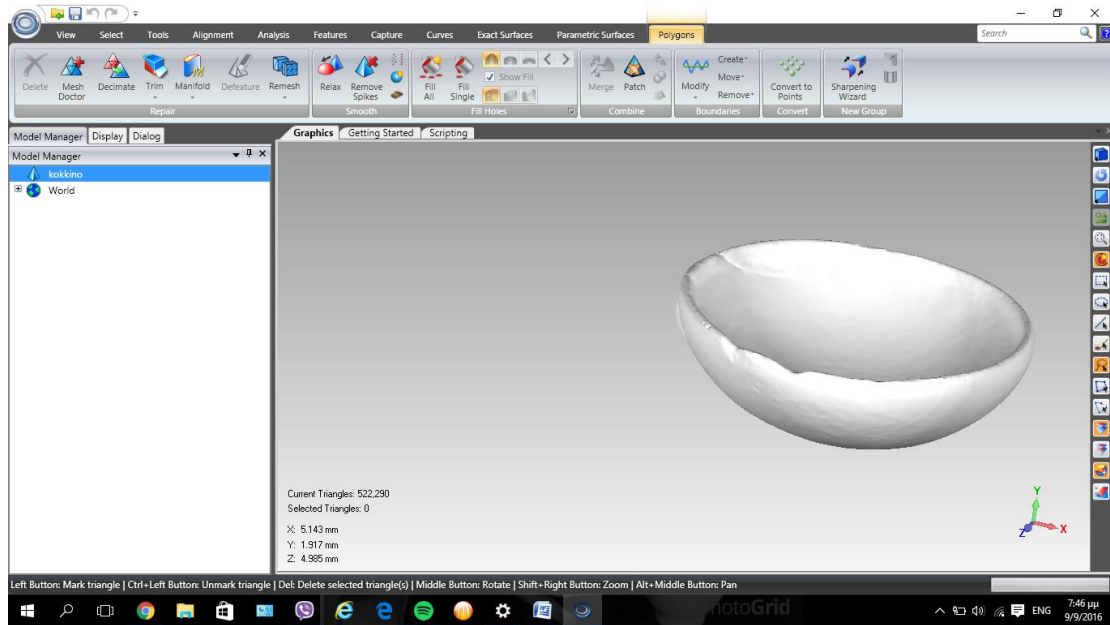


Εικόνα 74

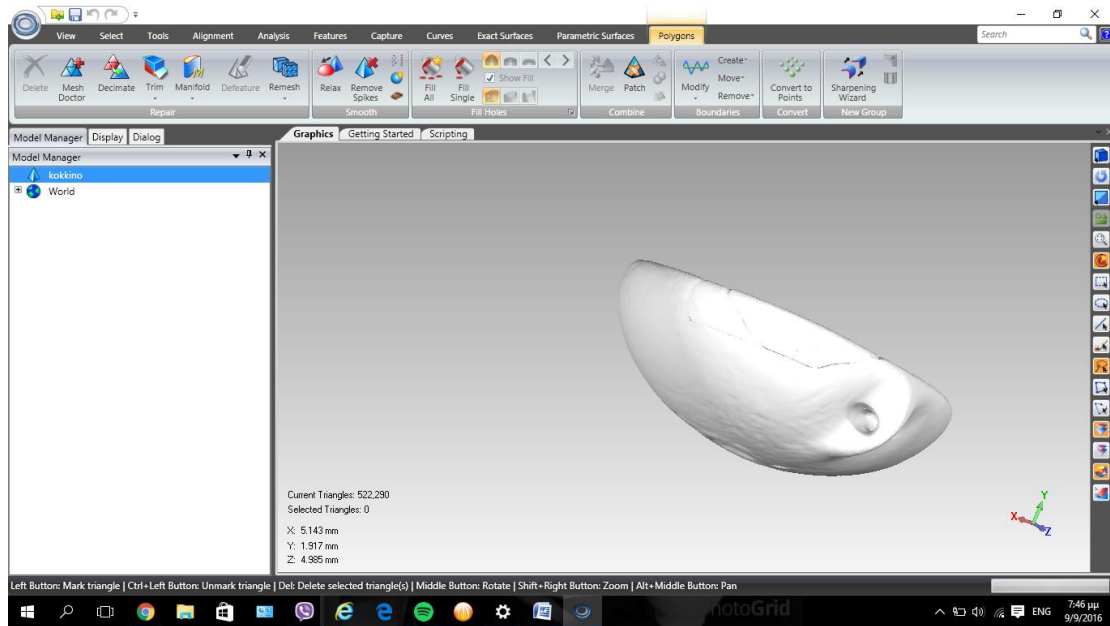
Παρατηρείται όμως ένα εξόγκωμα, το οποίο θα υποχωρήσει κάνοντας χρήση της εντολής sandpaper από το μενού polygons → smooth.



Εικόνα 75



Εικόνα 76



Εικόνα 77

Συμπεράσματα και προοπτικές της διπλωματικής εργασίας

6.1 Συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, έγινε κατανοητό πώς μπορεί η τεχνολογία σάρωσης να συντελέσει δραστικά στην αρχαιολογική μελέτη και συγκεκριμένα στην ψηφιακή αποτύπωση, αποκατάσταση και δημιουργία ηλεκτρονικού στερεού μοντέλου έχοντας μόνο στην διάθεσή της τμήμα του αντικειμένου αυτού.

Επίσης, η γεωμετρική σύνθεση και η μορφή του αντικειμένου της αποτύπωσης θα πρέπει να είναι ο «οδηγός» για την επιλογή των μέσων, της στρατηγικής και της ιεράρχησης των βημάτων του αντίστροφου σχεδιασμού, καθώς και για τις φάσεις μετρήσεων, συλλογής δεδομένων και μετέπειτα σχεδιασμού του αντικειμένου σε περιβάλλον CAD. Εδώ, το αντικείμενο ήταν χειροποίητο και χωρίς άξονες συμμετρίας και γι' αυτό δεν ακολουθήθηκε μεθοδολογία πλήρως αυτοματοποιημένη και καθοδηγούμενη από κάποιο μαθηματικό μοντέλο, όπως θα μπορούσε να γίνει σε κάποιο αντικείμενο με άξονες συμμετρίας ή επαναλαμβανόμενα μοτίβα.

Επίσης, η επεξεργασία ενός μοντέλου στο περιβάλλον των λογισμικών Geomagic και Rhino απαιτεί εξοικείωση και ιδιαίτερη προσοχή κατά τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων, διότι είναι εύκολο ο χρήστης να οδηγηθεί σε ένα μοντέλο με πολύ ελκυστική εμφάνιση (λείο, συμμετρικό) το οποίο όμως δεν θα ανταποκρίνεται στο πραγματικό αντικείμενο. Οι επιλογές και οι ρυθμίσεις των παραμέτρων του λογισμικού αφήνουν σημαντικό περιθώριο υποκειμενικών εκτιμήσεων και εξαρτώνται κατά πολύ από τη σχετική εμπειρία του χρήστη.

6.2 Κατευθύνσεις/προτάσεις για συνέχεια της διπλωματικής εργασίας

Το αποτέλεσμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν η απεικόνιση της μαρμάρινης φιάλης, στην ολοκληρωμένη μορφή της.

Η κατεύθυνση που θα πρότεινα προσωπικά για περαιτέρω συνέχεια αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήταν ο ακριβής σχεδιασμός του θραυσμένου κομματιού, και η τρισδιάστατη εκτύπωσή του, με σκοπό τη συγκόλληση αυτού στο πραγματικό αντικείμενο.

Βιβλιογραφία

- Kaisarlis George, Papageorgiou Metaxia, Provatidis Christopher
Digital Reconstruction Of A Roman Bird-shaped Glass Vessel
From Patras In 3D CAD Environment, 19e CONGRÈS
de l'ASSOCIATION INTERNATIONALE
pour l'HISTOIRE du VERRE p. 250-256, 2015
- 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
- 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
- 3D Modeling of Complex and Detailed Cultural Heritage Using
Multi-Resolution Data, Fabio Remondino, Stefano Girardi,
Alessandro Rizzi, and Lorenzo Gonzo, ACM Journal on Computing
and Cultural Heritage, Vol. 2, No. 1, July 2009
- Automatic matching of sculpture fragments as modern tool for
archaeological verification of hypotheses on their origin, A.
Bujakiewicz, M. Kowalczyk, P. Podlasiak, D. Zawieska, The
International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and
Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, (2008)
- Ε. Βαρύτης, *Μορφοποίηση πιστών αντιγράφων αρχαίων
αντικειμένων με εφαρμογή μεθόδων αντίστροφης μηχανολογίας και
ταχείας πρωτοτυποποίησης*
Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ 2009
- Η. Μαραζάκη, *Μια προσέγγιση δημιουργίας παραμετρικού στερεού
μοντέλου από νέφος σημείων.*
Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και διοίκησης,
Πολυτεχνείο Κρήτης 2014

- Π. Τσίγκος, *Τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα*
Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2010
- Ε. Φωτόπουλος, *Συμβολή στη χρήση τεχνολογιών για την τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς*
Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2008
- Θ. Βασιλόπουλος, *Αντίστροφος Σχεδιασμός Αντικειμένων Πολύπλοκης Γεωμετρίας σε περιβάλλον CMM – CAD*
Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2003
- Εγχειρίδιο Χρήσης «Geomagic Studio 12», Raindrop Geomagic Inc
- Εγχειρίδιο Χρήσης «Rhino 3d v.5», www.rhino3d.com
- <http://www.faro.com>