



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

## **ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΨΗΦΙΑΚΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΛΟΥΠΙΩΝ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ**



**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΞΑΓΟΡΑΡΗΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΑΡ. ΔΙΠΛ. : 27**

**ΧΑΝΙΑ 2013**

Στους γονείς μου και στον αδερφό μου...

Με την παρούσα διπλωματική ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Για αυτό το λόγο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον αδερφό μου και όλους μου τους φίλους και γνωστούς για την ηθική στήριξη και συμπαράσταση που είχα κατά την διάρκεια της φοίτησης μου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, που μου έδωσε τη ευκαιρία να συνεργαστώ μαζί του και να αποκτήσω όλες αυτές τις γνώσεις στο εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης.

Θα ήταν μεγάλη παράβλεψη να μην ευχαριστήσω τους βοηθούς του εργαστηρίου τον Ταξιάρχη Μπελή, τον Δημήτρη Βακόνδιο και την Μαρία Παππά για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και συνεργασία μαζί τους.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ	4
2.1 Ανάλυση & αξιολόγηση λογισμικών CAD/CAM & συστημάτων ψηφιοποίησης	4
2.2 Αντίστροφη Μηχανική-Εισαγωγή και ιστορία	9
2.3 Σύνδεση της Αντίστροφης Μηχανικής με τα συστήματα CAD/CAM	10
2.4 Εφαρμογές της διαδικασίας της Αντίστροφης Μηχανικής	11
2.5 Στάδια διαδικασίας Αντίστροφου Σχεδιασμού	12
2.6 Μηχανές Σάρωσης	12
2.7 Μία επισκόπηση στη Μηχανική Μορφής	16
2.8 Παραμετροποίηση Σχεδιασμού	17
2.9 Μηχανική Μορφής	17
2.10 Τριγωνοποίηση/Τριγωνισμός	17
2.11 Τμηματοποίηση	18
2.12 Μοντελοποίηση στερεού	20
2.13 Αναπαράσταση ορίων	20
2.14 Αναγνώριση στερεών χαρακτηριστικών (Solid feature recognition)	20
2.15 Παραμετροποίηση Σχεδιασμού	21
2.16 Εξαγωγή στερεού μοντέλου	22
2.17 Αξιολόγηση του λογισμικού μηχανικής	22
2.18 Λογισμικό απεικόνισης	22
2.19 Δοκιμές και Αξιολόγηση	24
2.20 Δοκιμή 1η : Αυτόματη προσαρμογή επιφανειών	25
2.21 Geomagic Studio	27
2.22 Συμπεράσματα	28
3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ	30
3.1 Απότμηση του νέφους σημείων (Trim)	32
3.2 Δημιουργία και επικόλληση νέου κομματιού	38
3.3 Κλιμάκωση (Scale)	45
3.4 Επιλογή και Δημιουργία νέου Αντικειμένου	48
3.5 Αντικατοπτρισμός τμήματος του νέφους (Mirror)	51
4. ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	58
5. ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣΗΣ	73
6. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ	81
7. ΣΥΝΟΨΗ	85
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	86



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων έχει σημαντικές μεταβολές λόγω της εισαγωγής νέων εργαλείων στο σχεδιασμό και την προσομοίωση των προϊόντων καθώς και των διαδικασιών. Τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιούν υπολογιστικό εξοπλισμό και παρέχουν στους σχεδιαστές πληροφορίες ενώ παλαιότερα είτε δεν ήταν εφικτό να προσδιοριστούν στη φάση σχεδιασμού είτε η κατανόησή τους δεν ήταν τόσο εύκολη. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα των μεταβολών είχαν ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους και του χρόνου ανάπτυξης και παράλληλα την βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος. Η διαδικασία αυτή της ανάπτυξης προϊόντων έχει τροποποιηθεί, λόγω της χρήσης υπολογιστικών συστημάτων και συνεχίζει να τροποποιείται σε συνάρτηση με την ανάπτυξη των δυνατοτήτων και της τεχνολογίας. Αυτά τα υπολογιστικά συστήματα έχουν ως βασικό συστατικό τα λογισμικά πακέτα τα οποία και παρέχουν στους σχεδιαστές πληροφορίες για τα τεχνικά και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του προϊόντος που αναπτύσσεται, πριν από την παραγωγή του φυσικού πρωτοτύπου και προτού το προϊόν μπει στη γραμμή παραγωγής. Οι πληροφορίες αυτές δεν μπορούσαν να προσδιοριστούν με τις παλαιότερες μεθόδους ανάπτυξης προϊόντων. Επίσης αξιοσημείωτο είναι ότι οι εταιρίες σπάνια πλέον αναπτύσσουν ένα προϊόν εξ' ολοκλήρου από την αρχή γιατί συνήθως χρησιμοποιούν δεδομένα από παλαιότερες εκδόσεις του προϊόντος τις οποίες βελτιώνουν τεχνολογικά ή αισθητικά και τροποποιούν πιθανά λάθη.

Μια σύγχρονη τάση που παρατηρείται ανάμεσα στην γραφιστική (Computer Graphics) και σχεδιαστική CAD επιστημονική κοινότητα και τη κατεύθυνση των μοντέλων επιφανειών που βασίζονται σε διακριτά στοιχεία όπως τα πολύγωνα και τα τρίγωνα, είναι τα νέφη σημείων (Point Cloud). Τα συστήματα CAD/CAM/CAE χρησιμοποιούν ως βασικό στοιχείο τα πολύγωνα και τα τρίγωνα. Στις σύγχρονες τεχνολογίες σχεδίασης όπως η αντίστροφη μηχανική, η εικονική μηχανική και η ταχεία προτυποποίηση, είναι πολύ σημαντική η χρήση σχεδόν αποκλειστικά των πολυγωνικών πλεγμάτων. Οι λόγοι της τάσης αυτής όσον αφορά τα σύγχρονα γραφικά μέσω υπολογιστή είναι ότι στα πολύπλοκα μοντέλα το μέγεθος των τριγώνων έχει μειωθεί σε ανάλυση κουκίδας οθόνης (pixel) και έτσι τα σημεία αποτελούν βέλτιστη επιλογή για τα βασικά μοντέλα επιφανειών. Στην αντίστροφη μηχανική, τα υπάρχοντα συστήματα επιτρέπουν τη συλλογή και την επεξεργασία νέφους σημείων με μεγάλη πυκνότητα, καθιστώντας έτσι την τριγωνοποίηση λιγότερο σημαντική, σε πλήρη αναλογία με τα γραφικά μέσω υπολογιστή. Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας χρησιμοποιούνται πρωτοποριακά εργαλεία ανάλυσης του σχεδιασμού βασισμένα αποκλειστικά στα νέφη σημείων.

Το αντικείμενο της εργασίας αποτελείται από την χρήση νέων αλγορίθμων διαχείρισης δεδομένων κατεργασίας και από τη βελτιστοποίηση μικροκατεργασιών. Η προσπάθεια που περιγράφεται σε αυτήν την εργασία αποτελεί μια σύγχρονη εφαρμογή τεχνολογιών Αντίστροφης Μηχανικής και ειδικότερα στην Ανάπτυξη νέων Προϊόντων και Αντιγράφων Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς με χρήση Ψηφιοποίησης και τεχνολογιών παραγωγής σε Μικροκλίμακα (Micromanufacturing). Ο χώρος των κατεργασιών σε Μικροκλίμακα κερδίζει ολοένα έδαφος καθώς οι απαιτήσεις των καταναλωτών σε μικροσκοπικά προϊόντα αυξάνονται συνεχώς. Οι παγκόσμιες επενδύσεις σε μικρο κατεργασίες αγγίζουν μεγάλα ποσά, ενώ ο ρυθμός ανάπτυξής τους αυξάνεται κάθε χρόνο. Τα παραγόμενα μικροσκοπικά προϊόντα βρίσκουν εφαρμογές στην αεροδιαστημική, τη βιοτεχνολογία, τις τηλεπικοινωνίες, τη φαρμακευτική/χειρουργική, σε οικιακά, σε προηγμένα βιομηχανικά προϊόντα καθώς και σε προϊόντα της καθημερινότητας, τις περισσότερες φορές χωρίς να γίνεται αντιληπτό. Το ενδιαφέρον που γνωρίζει σε πολιτιστικές εφαρμογές και ιδιαίτερα για αντιγραφές αντικειμένων, είναι πολύ μεγάλο καθώς η ακρίβεια και η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι πολύ σημαντικά στοιχεία για την χρήση αυτής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναπτυχθεί η μεθοδολογία της τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης και κατασκευής καλουπιών αποτύπωσης με χρήση της

διαδικασίας της Αντίστροφης Μηχανικής (Reverse Engineering), δίνοντας έμφαση στον τρόπο εφαρμογής της με χρήση κατάλληλων λογισμικών εφαρμογών.

Αρχικά θα γίνει μία επισκόπηση της σάρωσης αντικειμένων με τεχνολογία laser και κατά αντιστοιχία των τρισδιάστατων σαρωτών που υποστηρίζουν την τρισδιάστατη αυτή ψηφιοποίηση. Έπειτα θα γίνει ανάλυση της χρήσης των λογισμικών τρισδιάστατης μοντελοποίησης αλλά κυρίως του λογισμικού Geomagic το οποίο και επιλέγεται για την επεξεργασία του νέφους σημείων. Στην αντίστροφη μηχανική, τα υπάρχοντα συστήματα επιτρέπουν τη συλλογή και την επεξεργασία νέφους σημείων με μεγάλη πυκνότητα, καθιστώντας έτσι την τριγωνοποίηση ασήμαντη, σε πλήρη αναλογία με τα γραφικά μέσω υπολογιστή. Έτσι θα προταθούν πρωτοποριακά εργαλεία ανάλυσης του σχεδιασμού βασισμένα αποκλειστικά στο νέφος σημείων όπως είναι το Geomagic.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα περιγραφεί η διαδικασία από την θεωρητική της πλευρά, περιγράφοντας γενικά τους τομείς στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί. Η διαδικασία αυτή πέρα από ευθεία εφαρμογή της για την αντιγραφή του υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά την σχεδίαση του υλικού ως μεθοδολογία για την ασφάλιση και προστασία του.

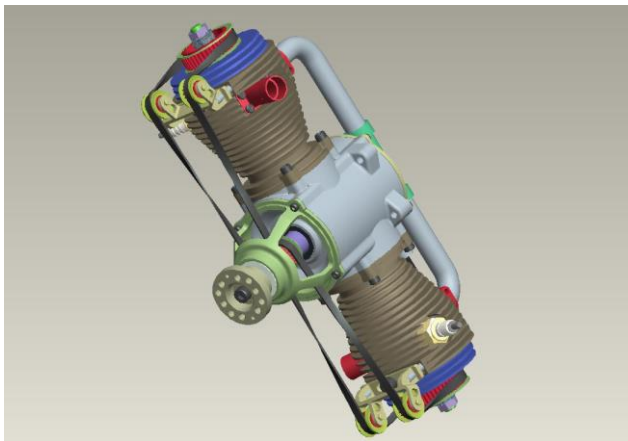
Σκοπός της εργασίας είναι η τρισδιάστατη σάρωση καλουπιού αποτύπωσης. Με την βοήθεια του επιλεγμένου λογισμικού (Geomagic) θα γίνει η κατασκευή του τελικού μοντέλου επιφάνειας το οποίο είναι ικανό να περιγράψει πλήθος επιθυμητών εντολών και διαδικασιών. Το μοντέλο επιφάνειας αυτό στην πορεία θα εισαχθεί σε πρόγραμμα CAD/CAM, συγκεκριμένα στο λογισμικό ArtCAM, με την χρήση του οποίου θα εξαχθεί ο κώδικας καθοδήγησης (G-code) του κέντρου κατεργασίας. Αφότου θα γίνει η εισαγωγή του κώδικα αυτού στην εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος ψηφιακής καθοδήγησης (CNC) DMU 50 eco της εταιρίας DMG θα κατασκευαστεί το τελικό δοκίμιο του μοντέλου επιφάνειας όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια της εργασίας.

Όλα αυτά έχουν απώτερο στόχο την διευκόλυνση του μελετητή μηχανικού για την απόκτηση βασικών γνώσεων επάνω στην διαδικασία εφαρμογής της αντίστροφης μηχανικής σε ηλεκτρονικές συσκευές καθώς και στην ποικιλία των δυνατοτήτων του λογισμικού για βασικές εντολές που είναι απαραίτητες στην επεξεργασία του νέφους σημείων.

## 2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

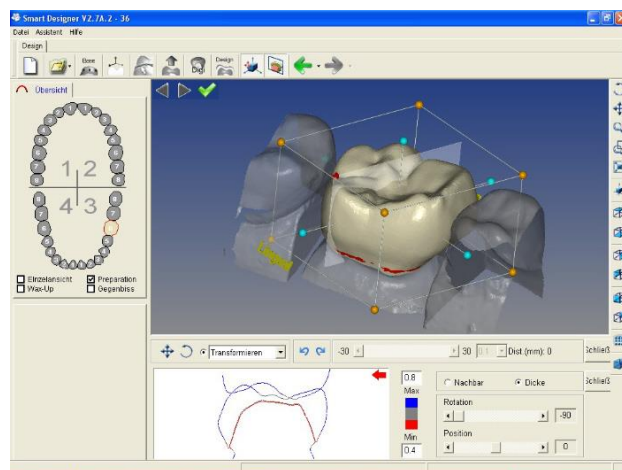
### 2.1 Ανάλυση & αξιολόγηση λογισμικών CAD/CAM & συστημάτων ψηφιοποίησης

Οι απαιτήσεις της σημερινής εποχής έχουν οδηγήσει στην κατασκευή προϊόντων σύνθετης γεωμετρίας και μεγάλης διαστατικής ακρίβειας. Στην παραγωγή μεγάλης ποσότητας τέτοιων προϊόντων έχει βοηθήσει η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθότι έχουν αναπτυχθεί προγράμματα που βοηθούν στην παραγωγική διαδικασία τόσο στη φάση του σχεδιασμού όσο και στη φάση της μηχανουργικής κατεργασίας του εκάστοτε προϊόντος. Ο σκοπός των προγραμμάτων αυτών είναι η μείωση του χρόνου και του κόστους παραγωγής, δύο παραγόντων που αποτελούν κυρίαρχο στόχο στον τομέα της βιομηχανίας.



Σχήμα 2.1 : Τρισδιάστατη σχεδίαση κινητήρα σε σύστημα CAD

και στο σχεδιασμό καμπυλών, επιφανειών και στερεών στο χώρο των τριών διαστάσεων (3D). Στο [σχήμα 2.1](#) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD.



Σχήμα 2.2 : Εξειδικευμένο σύστημα CAD/CAM στον τομέα της οδοντιατρικής

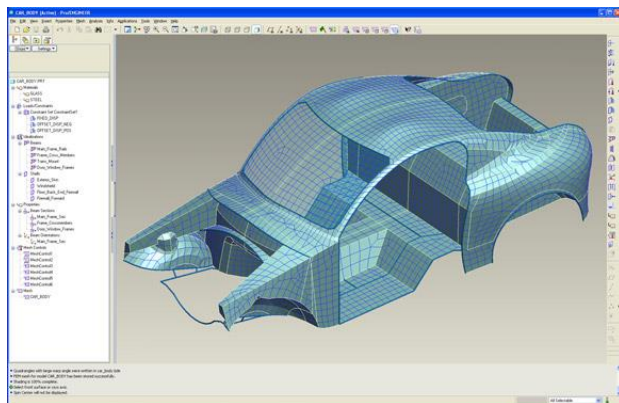
διαδικασίας παραγωγής εξαρτημάτων, η χρήση μόνο της απαιτούμενης ποσότητας πρώτων υλών (ελαχιστοποιώντας τα άχρηστα κομμάτια) και ταυτόχρονα η μείωση της καταναλωμένης ενέργειας. Σήμερα μπορεί να γίνει λόγος για ολοκληρωμένα συστήματα

Ως σχεδίαση με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, γνωστό περισσότερο με την αγγλική ορολογία Computer Aided Design (CAD), καλείται η χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών στην διαδικασία της σχεδίασης. Τα συστήματα CAD συνήθως περιλαμβάνουν περισσότερα δεδομένα από απλά και μόνο σχήματα. Όπως και στα τεχνικά και μηχανολογικά σχέδια, η έξοδος ενός συστήματος CAD συμπεριλαμβάνει πληροφορίες όπως αυτές των υλικών, των κατεργασιών, των διαστάσεων και των ανοχών. Ένα CAD σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο στο σχεδιασμό καμπυλών και σχεδίων στο χώρο των δύο διαστάσεων (2D) όσο

Από την άλλη πλευρά ως κατεργασία με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, Computer Aided Manufacturing (CAM), καλείται η χρήση ενός ηλεκτρονικού προγράμματος υπολογιστή για τον χειρισμό εργαλειομηχανών και συναφούς εξοπλισμού για την κατασκευή των κατεργαζόμενων τεμαχίων CAM, μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί η υποβοήθεια με χρήση ενός υπολογιστή σε όλες τις λειτουργίες ενός εργοστασίου κατασκευής συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού, της διαχείρισης, της μεταφοράς και της αποθήκευσης. Στο [σχήμα 2.2](#) παρατηρείται ένα σύστημα CAD/CAM. Ο πρωταρχικός σκοπός του είναι η δημιουργία μιας ταχύτερης

CAD/CAM τα οποία εφαρμόζοντας τις αντίστοιχες τεχνικές χρησιμοποιούνται στον βιομηχανικό χώρο στους τομείς της σχεδίασης και της παραγωγής.

Τα συστήματα CAD/CAM βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς βιομηχανικούς και επιστημονικούς κλάδους πέρα αυτού της κλασσικής μηχανουργικής κατεργασίας, όπως σε εκείνους της ναυπηγικής /1/, της ρομποτικής /2/, του προγραμματισμού /3/ ακόμα και της ιατρικής. Ιδιαίτερα στον τομέα της οδοντιατρικής έχουν δημιουργηθεί λογισμικά CAD/CAM εξειδικευμένης χρήσης /4/5/6/7/.



Σχήμα 2.3 : Εφαρμογή συστήματος CAD στην σχεδίαση πλαισίου αυτοκινήτου

Το CAD αποτελεί ένα σημαντικό βιομηχανικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλές εφαρμογές συμπεριλαμβανομένου αυτών της αυτοκινητοβιομηχανίας, ναυπηγικής, αεροναυπηγικής, βιομηχανικής και αρχιτεκτονικής σχεδίασης και πολλών ακόμα άλλων. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται μία εφαρμογή του εργαλείου αυτού. Επίσης βρίσκει εφαρμογή στην παραγωγή κινουμένων σχεδίων υπολογιστών για ειδικά εφέ σε ταινίες, στον τομέα της διαφήμισης και σε τεχνικά εγχειρίδια. Η σύγχρονη πρόοδος και η ισχύς των υπολογιστών έχουν οδηγήσει στη χρήση τεχνικών σχεδίασης

προϊόντων ανήκουστων για του μηχανικούς της δεκαετίας του '60. Σε ένα CAD σύστημα είναι διαθέσιμες πολλές εντολές για το σχεδιασμό βασικών γεωμετρικών σχημάτων όπως γραμμής, τόξου, κύκλου, πολυγώνου, έλλειψης.

Παράλληλα το CAD είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο της σύγχρονης σχεδίασης καθώς εξαλείφει την επίπονη εργασία της επανασχεδίασης και του υπολογισμού κατά τη φάση του σχεδιασμού /8/. Στις αρχές του 1980 τα προγράμματα σχεδίασης με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή (CAD) μείωσαν αισθητά την ανάγκη των σχεδιαστών, ιδιαίτερα στις μικρές και τις μεσαίες επιχειρήσεις. Η προσιτότητα και η ικανότητα του τρεξίματος στους προσωπικούς υπολογιστές επέτρεψε στους μηχανικούς να κάνουν την δική τους εργασία, μειώνοντας την ανάγκη ύπαρξης ολόκληρων τμημάτων.

Τα CAD/CAM συστήματα έχουν οδηγήσει στην πλήρως αυτοματοποιημένη προετοιμασία και εκτέλεση της παραγωγής, παρόλα αυτά απαιτούν από τον χρήστη εξάσκηση και εκπαίδευση για τη χρήση τους /9/. Τα λογισμικά CAD/CAM αποτελούν ευέλικτα πακέτα /10/11/ καθώς επιτρέπουν στους χρήστες να δουλεύουν παράλληλα και αυτόνομα σε διαφορετικά μέρη και φάσεις της παραγωγής ενός ενιαίου προϊόντος. Η σχεδίαση, η συναρμολόγηση και η κατασκευή έχουν ως αποτέλεσμα την κατασκευή ενός ενοποιημένου ποιοτικού προϊόντος.

Τα σημερινά λογισμικά πακέτα CAD ποικίλουν από σχεδιαστικά προγράμματα σχεδίασης βασισμένα σε διανύσματα στις δύο διαστάσεις μέχρι συστήματα μοντέλων τρισδιάστατων στερεών και επιφανειών. Μοντέρνα λογισμικά πακέτα CAD συχνά επιτρέπουν περιστροφή στις τρεις διαστάσεις, επιτρέποντας προβολή του αντικειμένου που έχει σχεδιαστεί από οποιαδήποτε επιθυμητή γωνία, ακόμα κι από το εσωτερικό του κοιτώντας εξωτερικά.

CAD χρησιμοποιείται κυρίως για τη λεπτομερή μελέτη των 3D μοντέλων και / ή 2D σχεδίων εξαρτημάτων, αλλά χρησιμοποιείται επίσης σε όλη τη μηχανουργική διαδικασία από τις αρχές του σχεδιασμού και τη διάταξη των προϊόντων μέχρι την αντοχή και τη δυναμική ανάλυση των συνδεσμολογιών για τον καθορισμό των μεθόδων κατασκευής των εξαρτημάτων. Το CAD έχει γίνει μια ιδιαίτερα σημαντική τεχνολογία στο πεδίο των



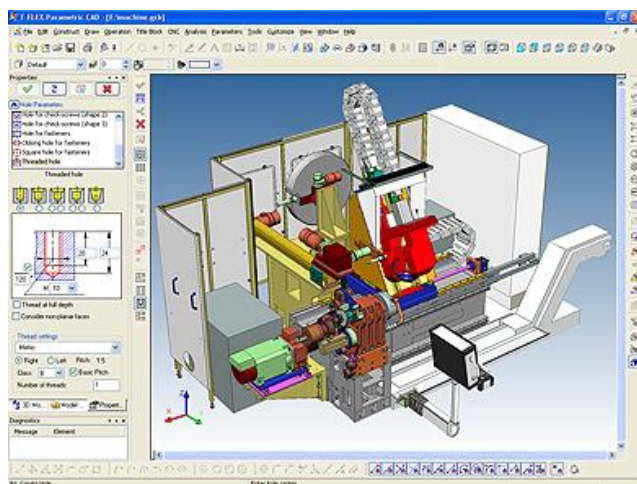
τεχνολογιών εφαρμογής με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, με οφέλη όπως τη μείωση του κόστους ανάπτυξης του προϊόντος και έναν πολύ μικρότερο κύκλο σχεδιασμού. Το κάθε σύστημα CAD επιτρέπει στο σχεδιαστή να σχεδιάσει και να αναπτύξει την εργασία του στην οθόνη, να την τυπώσει και να την αποθηκεύσει για μελλοντική επεξεργασία, εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο.

Αρχικά τα λογισμικά των συστημάτων CAD αναπτύχθηκαν με τη χρήση γλώσσας υπολογιστών όπως η Fortran, πράγμα το οποίο άλλαξε ριζικά με την πρόοδο της αντικειμενοστραφούς μεθόδου προγραμματισμού. Η εξέλιξη του αντικειμενοστραφή προγραμματισμού μέσω της διεπαφής εφαρμογής προγραμματιστή (API) /12/ βοήθησε στην κατασκευή και την αναγνώριση τμημάτων σύνθετων τοπομορφιών /13/. Οπές, δεσμοί, ρήγματα, γρίλιες, λακκάκια, βαθουλώματα, αυλακώσεις είναι μερικά χαρακτηριστικά επιφανειών που συναντώνται σε ελάσματα πλαισίων στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η τυπική σύγχρονη παραμετρική μοντελοποίηση και τα συστήματα ελεύθερης μορφής επιφανειών έχουν χτιστεί γύρω από μια σειρά βασικών ενοτήτων της C με τη δική τους API. Το κάθε σύστημα CAD είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού της αλληλεπίδρασης μιας γραφικής διεπαφής χρήστη (GUI) με τη γεωμετρία των καμπύλων NURBS.

Σήμερα τα συστήματα CAD υπάρχουν διαθέσιμα σε όλες τις υπολογιστικές πλατφόρμες (Windows, Linux, Unix και MacOSX), ορισμένα πακέτα υποστηρίζονται από περισσότερες της μίας. Η διεπαφή ανθρώπου-μηχανής γίνεται γενικά με τη χρήση του ποντικιού του υπολογιστή αλλά μπορεί ακόμη να γίνει μέσω ενός στυλό και μιας ταμπλέτας σχεδίασης γραφικών.

Η ανάπτυξη των συστημάτων CAD προήλθε από τη δημιουργία λογισμικών πακέτων στερεής μοντελοποίησης /14/ και από πακέτα που ελέγχουν πιθανά προβλήματα κατά τη διεργασία /15/. Η μορφή ενός τεμαχίου αναπαρίσταται σε ένα σύστημα CAD ακολουθώντας μια ιεραρχική δομή σύμφωνα με τον τρόπο που ο χρήστης το έχει σχεδιάσει /16/. Οποιαδήποτε αλλαγή μπορεί να γίνει ανά πάσα στιγμή στις παραμέτρους σχεδίασης του προϊόντος σε οποιοδήποτε σημείο εντός του μοντέλου των δεδομένων της εφαρμογής.

Το CAM είναι πιο πρόσφατο προϊόν στο βιομηχανικό και ακαδημαϊκό χώρο. Κύριος στόχος του είναι η αυτοματοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας. Σε ένα σύστημα CAM ο υπολογιστής ελέγχει κατευθείαν τις εργαλειομηχανές και τον εξοπλισμό διαχείρισης των υλικών με σκοπό την αύξηση της παραγωγής και της ποιότητας των προϊόντων.



Σχήμα 2.4 : Τρισδιάστατη προβολή κέντρου κατεργασίας συστήματος CAD/CAM

Παραδοσιακά, ένα σύστημα CAM αποτελεί ένα εργαλείο προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου (NC) όπου δισδιάστατα (2D) και τρισδιάστατα (3D) μοντέλα εξαρτημάτων που παράγονται από λογισμικά σχεδίασης CAD χρησιμοποιούνται για την παραγωγή G-κώδικα καθοδήγησης ψηφιακά καθοδηγούμενων εργαλειομηχανών (CNC). Στο σχήμα 2.4 παρατηρείται ένα παράδειγμα ενός κέντρου κατεργασίας CAD/CAM. Απλά σχέδια όπως κύκλοι και περιγράμματα δεν απαιτούν την εισαγωγή ενός αρχείου CAD.

Οι πρώτες εμπορικές εφαρμογές συστημάτων CAM ήταν σε μεγάλες επιχειρήσεις στους τομείς της αυτοκινητιστικής και

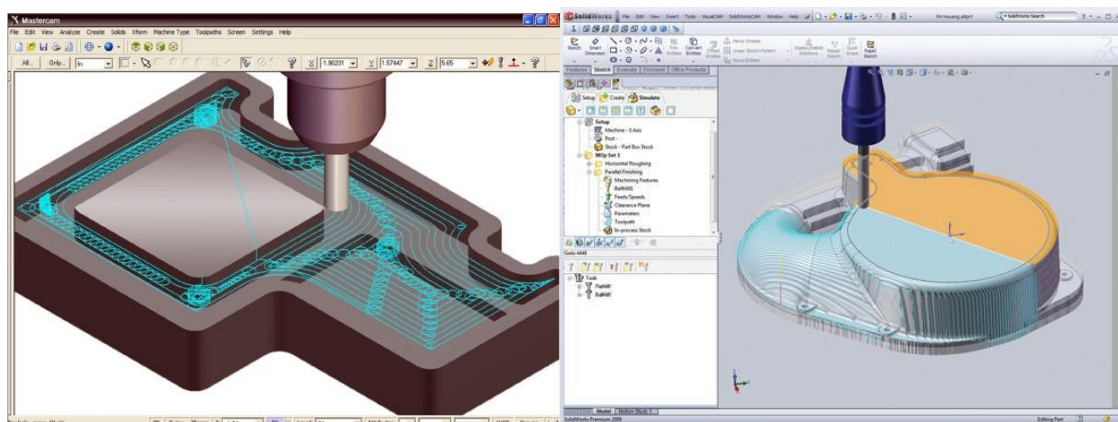
αεροδιαστημικής βιομηχανίας. Η επικοινωνία των συστημάτων CAD/CAM/CAE επιτυγχάνεται με την αποτελεσματική ανταλλαγή δεδομένων CAD. Συνήθως ήταν αναγκαία η εξαγωγή των δεδομένων σε συνήθεις μορφές δεδομένων όπως IGES ή STL /17/18/ που υποστηρίζονται από ένα ευρύ φάσμα λογισμικών. Η έξοδος από ένα λογισμικό CAM είναι συνήθως ένα απλό αρχείο κειμένου του G-κώδικα, μερικές φορές πολλών χιλιάδων γραμμών, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται και εκτελείται σε εργαλειομηχανές με τη χρήση προγραμμάτων άμεσου ψηφιακού ελέγχου (DNC).

Για την ομαλή, εύκολη και γρήγορη λειτουργία των προγραμμάτων CAD/CAM έχουν δημιουργηθεί ρουτίνες διόρθωσης των σχημάτων καθώς επίσης χρησιμοποιούνται και έτοιμες βιβλιοθήκες εξαρτημάτων. Σημαντική είναι η κατασκευή διαδραστικού μεταεπεξεργαστή (post-processor) και η λειτουργία άμεσου ψηφιακού ελέγχου (DNC) για την προσομοίωση και την εκτέλεση της κατεργασίας αντίστοιχα /19/. Η ανάπτυξη του διαδικτύου παρέχει στο χρήστη και τη δυνατότητα του απομακρυσμένου ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας μέσω των συστημάτων CAD/CAM /20/.

Ακολουθώντας τη διαδικασία του σχεδιασμού προς τα πίσω είναι δυνατή η λήψη δεδομένων που αποθηκεύονται στα συστήματα CAD /21/. Μελέτες έχουν γίνει στα στάδια της αναγνώρισης σχημάτων /22/ και στη βελτιστοποίηση της αλληλουχίας των διεργασιών /23/ με σκοπό την εξοικονόμηση χρόνου και την πραγματοποίηση καλύτερης διαστατικής ακρίβειας. Αλγόριθμοι εφαρμόζονται για την δημιουργία μιας πιο ομαλής επιφάνειας και για τον υπολογισμό και τη δημιουργία των μονοπατιών που θα ακολουθήσει το κοπτικό εργαλείο /24/.

Σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων CAD/CAM είναι το γεγονός ότι πλέον έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν κατεργασίες εντός του ηλεκτρονικού υπολογιστή, όπως προσομοίωση χύτευσης σε μήτρα /25/, κίνησης ρομποτικών βραχιόνων /4/, χειρουργικής επέμβασης σε οστά /2/ και συνήθων κατεργασιών αφαίρεσης υλικού. Μέσω τέτοιων προσομοιώσεων είναι δυνατή η μελέτη και η επίδραση των συνθηκών κοπής αλλά και ο υπολογισμός των δυνάμεων που λαμβάνουν χώρα. /26/

Οι κύριες κατεργασίες ενός συστήματος CAD/CAM είναι η εκχόνδριση, το ημι-φινίρισμα, το φινίρισμα και η κοπή περιγράμματος. Εκτός αυτών υπάρχουν και κύκλοι κατεργασίας που μπορούν να προγραμματιστούν όπως αυτοί της διάνοιξης οπών ή σπειρωμάτων. Οι κατεργασίες αυτές μπορούν να εφαρμοσθούν τόσο σε κατεργαζόμενα τεμάχια όγκου στερεού όσο και σε μεταλλικά ελάσματα. Το υλικό της κατεργασίας είναι μια παράμετρος της παραγωγικής διαδικασίας που ορίζεται από τον χρήστη ανάλογα με το επιθυμητό προϊόν. Πέρα της κατεργασίας μετάλλων είναι δυνατή η κατεργασία και ανθρακονημάτων /27/. Στο σχήμα 2.5 παρατηρείται ένα παράδειγμα μιας διαδρομής εργαλείου.



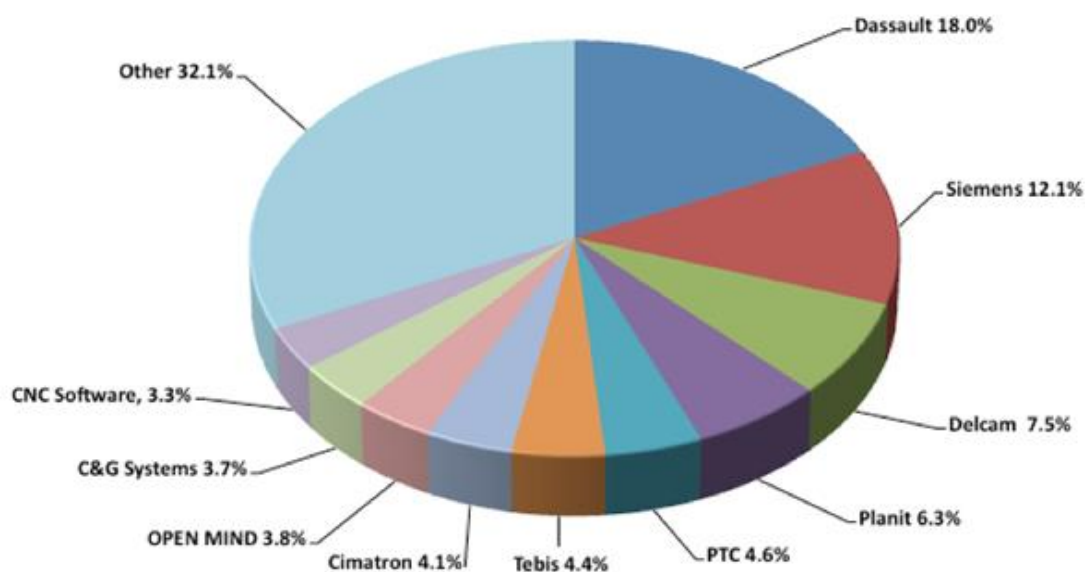
Σχήμα 2.5 : Αναπαράσταση διαδρομών εργαλείου σε CAD/CAM σύστημα

Πολλές εταιρίες έχουν κατασκευάσει τα δικά τους εμπορικά πακέτα CAD/CAM που βρίσκουν εφαρμογή σε εξειδικευμένες μηχανές παραγωγής. Τα κορυφαία 22 λογισμικά CAD/CAM και οι εταιρίες τους, σύμφωνα με τα έσοδα του 2010, ταξινομημένα αλφαβητικά παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΛογισμικόCAM	Εταιρία κατασκευής	ΛογισμικόCAM	Εταιρία κατασκευής
BOBCAD-CAM	BobCAD-CAM	PowerMILL	Delcam
CATIA	DassaultSystemes	Pro/E	PTC
CAM-Tool	C & G Systems	SolidCAM	SolidCAM
CimatronE	Cimatron Group	Space E	NTTD
Dynavista	Nihon Unisys	SprutCAM	SPRUT Technology
Edgecam	Planit	SurfCAM	Surfware
Esprit	DP Technology	TopCAM	Missler
GibbsCAM	Cimatron	Tebis	Tebis AG
HyperMill	Open Mind	VisiCAM	Vero
Mastercam	CNC Software	Vericut	CGtech
NX	Siemens PLM Softw.	WorkNC	Sescoi

Πίνακας 2.1 : Λογισμικά CAM και εταιρίες κατασκευής τους

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται σε ένα διάγραμμα πίτας το ποσοστό χρησιμοποίησης συγκεκριμένων συστημάτων CAD/CAM κατά το έτος 2010.

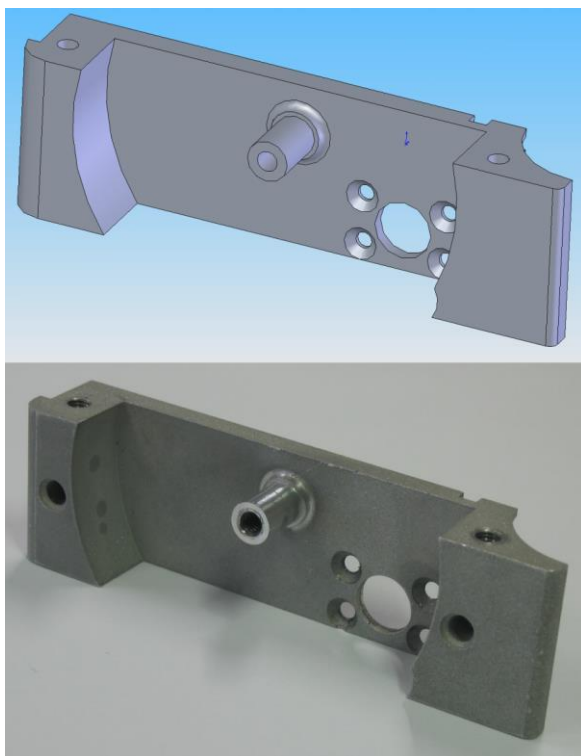


Σχήμα 2.6 : Μερίδιο αγοράς προμηθευτών λογισμικών CAM το έτος 2010

Τα συστήματα CAD/CAM είναι σίγουρο ότι αποτελούν προγράμματα ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας μιας βιομηχανίας. Σύμφωνα με έρευνες τα CAD/CAM συστήματα έχουν μειώσει τις εργατικές ανθρωποώρες των μηχανικών κατά 75% και τον προγραμματισμό αριθμητικού ελέγχου (NC) κατά 50% ενώ αναμένεται η εξοικονόμηση του κόστους παραγωγής να φτάσει πάνω από 90% /8/. Τα οφέλη της χρήσης CAD/CAM συστημάτων είναι:

- Συντόμευση του χρόνου παραγωγής,
- Ταχύτερη ανταπόκριση στη ζήτηση,
- Ευκολότερη αναγνώριση των αλληλεπιδράσεων εξαρτημάτων,

- Εξομάλυνση του φόρτου εργασίας, δίνοντας αποδοτικότερη χρήση πόρων,
- Μείωση λαθών μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής,
- Εισαγωγή τεχνικών που θα οδηγήσουν σε περαιτέρω βελτιώσεις,
- Μείωση του κόστους με τη χρήση τεχνικών αριθμητικού ελέγχου NC,
- Καλύτερος έλεγχος του κόστους,
- Ευκολότερη εισαγωγή επιθυμητών τροποποιήσεων,
- Βελτίωση της διαχείρισης βάσης δεδομένων η οποία επιτρέπει υπάρχοντα σχέδια και μέρη να προσδιορισθούν και να χρησιμοποιηθούν,
- Καλύτερη αντιστοίχιση των σχεδίων με τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις παραγωγής,
- Καλύτερο γενικό έλεγχο των άμεσα διαθέσιμων δεδομένων.



Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην ελαχιστοποίηση των σταδίων δοκιμής και σφάλματος εντός των συστημάτων CAD και στην ταχεία προτυποποίηση /28/29/. Στο σχήμα 2.7 παρατηρείται ένα μοντέλο CAD σε ψηφιακή και πραγματική μορφή. Οι απροσδόκητες δυνατότητες των συστημάτων CAD /CAM έχουν οδηγήσει σε μια νέα μορφή πρωτοτύπων που ονομάζεται ψηφιακή προτυποποίηση. Σε αντίθεση με τα φυσικά πρωτότυπα που χρειάζονται αρκετό χρόνο κατασκευής και σχεδιασμού, τα μοντέλα CAD μπορούν να δημιουργηθούν από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη χρήση μιας βιομηχανικής μηχανής σάρωσης CT. Χρησιμοποιώντας αυτή τη τεχνολογία σαρώνεται το φυσικό πρωτότυπο και δημιουργείται κατευθείαν το μοντέλο CAD στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Σχήμα 2.7 : Μοντέλο CAD και κατεργασμένο τεμάχιο

## 2.2 Αντίστροφη Μηχανική-Εισαγωγή και ιστορία

Η αντίστροφη σχεδίαση ξεκίνησε ως διαδικασία αντιγραφής προϊόντων και στα πρώτα στάδια της ανάπτυξής της αντιμετωπίστηκε με μεγάλη δυσπιστία. Θεωρήθηκε ως μέθοδος η οποία εφαρμόζεται από σχεδιαστές εξαιτίας της έλλειψης έμπνευσης και πρωτοποριακών ιδεών για την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων και σχεδίων. Οι Ιάπωνες πρώτοι εισήγαγαν μεθόδους αντίστροφης σχεδίασης ώστε να βελτιώσουν τα προϊόντα των ανταγωνιστών τους και κατά συνέπεια να εξοικονομήσουν χρόνο και κόπο αποφεύγοντας την κανονική σχεδίαση και συμπιέζοντας τους κύκλους ανάπτυξης κατά την παραγωγή. Η επιτυχία τους στην παραγωγή νέων προϊόντων με τη χρήση της αντίστροφης σχεδίασης την ανάδειξε σε μια πλήρη, αυτόνομη και με άριστα αποτελέσματα σχεδιαστική υπό-επιστήμη και οδήγησε στην αποδοχή της από τον δυτικό κόσμο.

Ο “αντίστροφος σχεδιασμός” ορίζεται ως η διαδικασία γρήγορης και με υψηλή ακρίβεια μέτρησης διαστάσεων, της αποτύπωσης γεωμετρικών μορφών και του υπολογισμού των γεωμετρικών ανοχών μιας δεδομένης υπαρκτής κατασκευής. Με βασικά εργαλεία τις μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM και τα ειδικά πακέτα λογισμικού που τα συνοδεύουν, ο αντίστροφος σχεδιασμός είναι στην ουσία η δημιουργία του συνόλου των



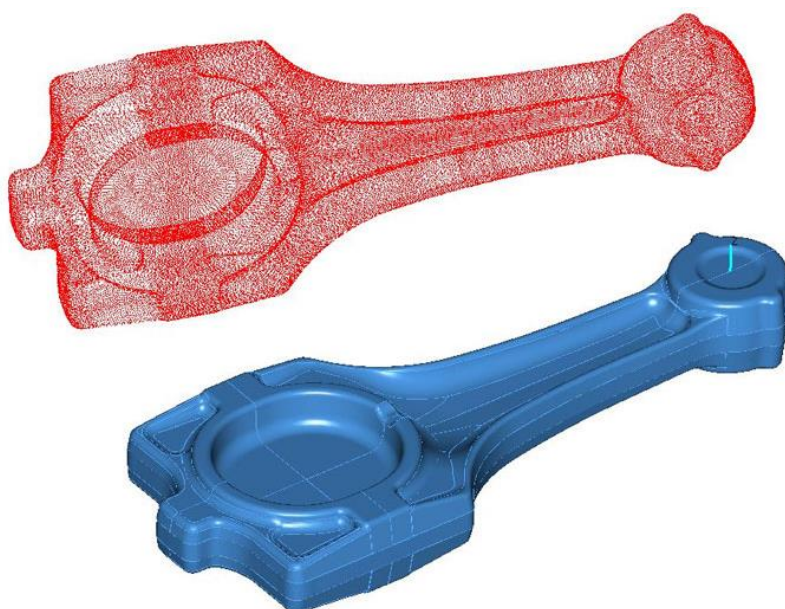
τεχνολογικών δεδομένων που περιγράφουν πλήρως ένα αντικείμενο όταν αυτά είναι για διάφορους λόγους ελλιπή, ανύπαρκτα ή απλά δεν είναι διαθέσιμα.

Η αντιγραφή αντικειμένων με την μέθοδο του αντίστροφου σχεδιασμού RE (Reverse Engineering) είναι μια μοντέρνα καινοτόμος μεθοδολογία, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα στην σημερινή εποχή. Η τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την σάρωση των αντικειμένων είναι αυτή που καθορίζει τον τρόπο απεικόνισης του τελικού αντικειμένου, καθώς και την διαδικασία που θα ακολουθηθεί για την ανασυγκρότηση των δεδομένων της σάρωσης. Η αντίστροφη μηχανική στηρίζεται στην αποσυναρμολόγηση ενός προϊόντος στα επιμέρους συστατικά του τμήματα(components), προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος σχεδιασμού του από το αρχικό στάδιο μέχρι το τελικό προϊόν.

Κύριος στόχος είναι η πλήρης κατανόηση της διαδικασίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός δεδομένου σχεδιασμού και στη συνέχεια η χρησιμοποίηση της αποκτούμενης γνώσης για μερικό ή ολικό επανασχεδιασμό του ίδιου προϊόντος ή μιας βελτιωμένης εκδοχής του.

### 2.3 Σύνδεση της Αντίστροφης Μηχανικής με τα συστήματα CAD/CAM

Καθώς τα συστήματα σχεδίασης με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή έχουν γίνει πιο δημοφιλή, η αντίστροφη μηχανική έχει αποτελέσει μια αξιόλογης σημασίας μέθοδο δημιουργίας τρισδιάστατων εικονικών μοντέλων πραγματικών τεμαχίων για χρήση τους σε συστήματα CAD, CAM, CAE ή σε άλλα λογισμικά πακέτα /30/. Η διαδικασία της αντίστροφης μηχανικής περιλαμβάνει την μέτρηση των διαστάσεων του αντικειμένου και έπειτα την ανακατασκευή του σαν μοντέλο 3D /31/. Το φυσικό αντικείμενο μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας τεχνολογίες τρισδιάστατης σάρωσης όπως μηχανήματα μέτρησης συντεταγμένων (CMM), σαρωτές λέιζερ, ψηφιοποιητές δομημένου φωτός, ή σάρωση βιομηχανικής αξονικής τομογραφίας (Industrial CT scanning). Τα μετρούμενα δεδομένα από μόνα τους, συνήθως αναπαριστώνται ως νέφος σημείων, στερούνται τοπολογικών πληροφοριών και συχνά υποβάλλονται σε επεξεργασία ώστε να έλθουν σε μια πιο χρήσιμη μορφή όπως αυτή του τριγωνικού πλέγματος, μιας σειράς επιφανειών NURBS ή ενός μοντέλου CAD. Στο σχήμα 2.8 παρατηρείται ένα παράδειγμα του νέφους σημείων και της μετατροπής του σε σύστημα CAD/CAM.



Σχήμα 2.8 : Ψηφιοποίηση αντικειμένου σε νέφος σημείων και δημιουργία τρισδιάστατης στερεής μορφή σε σύστημα CAD/CAM

## 2.4 Εφαρμογές της διαδικασίας της Αντίστροφης Μηχανικής

Είναι πολλοί οι λόγοι που δικαιολογούν τη μέθοδο του αντίστροφου σχεδιασμού για την μοντελοποίηση αντικειμένων. Οι περισσότερες διαδικασίες παρασκευής προϊόντων χρησιμοποιούν αρχεία CAD (CAD-CAM, RE-PP), οπότε και υπάρχει η ανάγκη της ηλεκτρονικής προσομοίωσης των αντικειμένων. Οι περιπτώσεις στις οποίες η διαδικασία αντίστροφου σχεδιασμού βρίσκει εφαρμογή μεταξύ άλλων είναι:

- **Στην ανάπτυξη και τον σχεδιασμό νέων μηχανολογικών προϊόντων:** Στις περιπτώσεις όπου αφετηρία για το νέο προϊόν είναι ένα φυσικό μοντέλο φτιαγμένο με το χέρι (η δημιουργία ενός καλλιτέχνη ή ο αεροδυναμικός σχεδιασμός ενός αμαξώματος όπως αυτό τροποποιήθηκε μετά από δοκιμές ).
- **Στην αναπαραγωγή παλιών αντικειμένων:** Εάν τα κατασκευαστικά σχέδια ενός αντικειμένου δεν είναι πλέον διαθέσιμα, υπάρχει η ανάγκη δημιουργίας του προκειμένου να γίνει εκ νέου η παραγωγή του. Π.χ. όταν ο αρχικός παραγωγός δεν είναι διαθέσιμος ή δεν υφίσταται, αλλά ένας πελάτης ζητάει το προϊόν.
- **Στην επιθεώρηση ή στον ποιοτικό έλεγχο αντικειμένων:** Από τη γραμμή παραγωγής γίνεται η λήψη σε τακτικά χρονικά διαστήματα ενός τυχαίου δείγματος και μετά η σύγκριση διαστάσεων και ανοχών με το πρωτότυπο ηλεκτρονικό τρισδιάστατο μοντέλο.
- **Στην αλλαγή και τον εκσυγχρονισμό των μεθόδων και των εργαλείων παραγωγής:** Όταν το ίδιο προϊόν σχεδιάζεται ξανά με βάση τις ίδιες προδιαγραφές και τις απαιτήσεις μιας διαφορετικής μεθόδου παραγωγής. Μερικά από τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά του αντικειμένου πρέπει να απαλειφθούν.
- **Στην τροποποίηση αντικειμένων κατά την παραγωγική διαδικασία:** Πολλές φορές τυχαίνει κάποια κομμάτια να έχουν αλλάξει μορφή από την αρχική σχεδίαση κατά την παραγωγή χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα κάποιας λεπτομερούς καταγραφής αυτών των αλλαγών (τυπικό παράδειγμα τα αγωνιστικά αυτοκίνητα). Δημιουργία νέων μεθόδων βελτίωσης της διαδικασίας ανάπτυξης των προϊόντων.
- **Ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών** σε ορίζοντα χρόνου και ανάλυση των καλών και των κακών χαρακτηριστικών στα προϊόντα των ανταγωνιστών.
- **Δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου** από αγάλματα για την δημιουργία, μεγέθυνση και κίνηση σε παιχνίδια και ταινίες ή για αναπαραγωγή του μοντέλου.
- **Αρχιτεκτονικές εφαρμογές**, καθώς και τεκμηρίωση και μετρήσεις.

Η αντίστροφη μηχανική χρησιμοποιείται επίσης από επιχειρήσεις για να πάρουν την υπάρχουσα φυσική γεωμετρία σε ψηφιακά περιβάλλοντα ανάπτυξης του προϊόντος για την 3D καταγραφή των δικών τους προϊόντων ή ακόμα και για την αξιολόγηση των προϊόντων των ανταγωνιστών. Επίσης παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του προϊόντος, τον αριθμό των εξαρτημάτων που το αποτελούν και την εκτίμηση του κόστους του.

Συμπερασματικά , ο αντίστροφος σχεδιασμός αποτελεί σήμερα μια αρκετά πολύπλοκη και εξειδικευμένη εργασία, η οποία έχει επεκταθεί αρκετά και έχει ξεφύγει από την αρχική ιδέα της αναπαραγωγής ενός ακριβούς αντίγραφου. Με τη χρήση μοντέρνων μηχανών ψηφιοποίησης και αποτύπωσης CMM και προηγμένων συστημάτων CAD, ο αντίστροφος σχεδιασμός αποτελεί πλέον ένα δυναμικό εργαλείο, το οποίο βρίσκει συνεχώς εφαρμογές.

## 2.5 Στάδια διαδικασίας Αντίστροφου Σχεδιασμού

Ως βασικά στάδια της διαδικασίας του αντίστροφου σχεδιασμού θεωρούνται τα ακόλουθα:

- **Αξιολόγηση και επαλήθευση (evaluation and verification)** των ήδη υπαρχόντων τεχνικών δεδομένων που σχετίζονται με το αντικείμενο. Η συλλογή και αξιολόγηση πληροφοριών όπως το βάρος, ο όγκος, οι φυσικές και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, ο βαθμός φθοράς, οι μέθοδοι κατεργασίας από τις οποίες προήλθε, αλλά και διαθέσιμα στοιχεία από όμοιες κατασκευές κ.λπ. είναι μια ιδιαίτερα απαιτητική εργασία η οποία αποτελεί την ασφαλέστερη βάση για την αποδοτικότητα της περαιτέρω διαδικασίας.
- **Δημιουργία τεχνικών δεδομένων (technical data generation)**, που αποτελεί την καρδιά του αντίστροφου σχεδιασμού και έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ενός πλήρους πακέτου τεχνικών δεδομένων στο οποίο θα συμπεριλαμβάνονται πέρα από τα αναλυτικά κατασκευαστικά σχέδια και ότι άλλο έχει κριθεί απαραίτητο, από εργαλεία, μέσα και μεθόδους παραγωγής, σχέδια απαραίτητων απαιτούμενων ιδιοσκευών και εξοπλισμού ποιοτικού ελέγχου μέχρι τον καθορισμό των τιμών των καθαρά λειτουργικών χαρακτηριστικών του τεμαχίου.
- **Επαλήθευση των νέων δεδομένων (design verification)** μέχρι την εφαρμογή του πλήρους πακέτου τεχνικών δεδομένων, είναι απαραίτητη η υποβολή των νέων γνώσεων σε κάποιες διαδικασίες ελέγχου και η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται γι' αυτό το σκοπό είναι η κατασκευή πρωτοτύπων και η υποβολή τους σε μια σειρά ελέγχων. Οπωσδήποτε η κατασκευή πρωτοτύπων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους του αντίστροφου σχεδιασμού, οπότε θα πρέπει να έχει προηγηθεί αρκετός προβληματισμός πάνω στο ακόλουθο ερώτημα : Είναι εντελώς απαραίτητο ένα φυσικό πρωτότυπο, πόσο λειτουργικό θα είναι και πόσο συγκρίσιμα θα είναι τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του σε σχέση με αυτά του κομματιού όπως θα προκύψει από την παραγωγή, τι είδους έλεγχοι θα γίνουν.
- **Εφαρμογή και εκτέλεση των αποτελεσμάτων (design and project implementation)**. Έχοντας πλέον διαθέσιμο το οριστικό πλήρες πακέτο τεχνικών δεδομένων, επαληθευμένο και εμπλουτισμένο από τα αποτελέσματα του προηγούμενου σταδίου, συντάσσεται μια απολογητική αναλυτική έκθεση κόστους στην οποία περιλαμβάνονται και εκτιμήσεις που αφορούν τις κοστολογικές παραμέτρους του νέου προϊόντος. Αυτά, μαζί με κάποια φυσικά πρωτότυπα και το ίδιο αρχικό κομμάτι, είναι το αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας του αντίστροφου σχεδιασμού για τη μελλοντική βελτιωμένη παραγωγή του προϊόντος.

## 2.6 Μηχανές Σάρωσης

Διάφορες μηχανές σάρωσης είναι διαθέσιμες στο εμπόριο και κατηγοριοποιούνται σε μηχανές δυσδιάστατης και τρισδιάστατης (2D και 3D) σάρωσης.

Οι μηχανές 2D σάρωσης στηρίζονται πάνω στην φωτογραμμική θεωρία (photogrammy technology) και έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι σχετικά χαμηλού κόστους. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι πολύ δύσκολα μπορεί να προκύψει το τρισδιάστατο αντικείμενο, αφού η λειτουργία τους στηρίζεται σε δυσδιάστατες σαρώσεις.

Οι μηχανές 3D σάρωσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Σε αυτές που η σάρωση γίνεται από απόσταση (χωρίς επαφή του αντικειμένου) και σε αυτές όπου η σάρωση γίνεται με επαφή του αντικειμένου.

Η διαδικασία της σάρωσης από απόσταση επιτρέπει την καταγραφή της στερεάς γεωμετρίας του αντικειμένου χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής του.

Αντιπροσωπευτική μηχανή σάρωσης με επαφή είναι η τρισδιάστατη μετρητική μηχανή CMM /32/. Αυτή η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει είτε χειροκίνητα από τον χρήστη είτε να ελέγχεται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η λήψη των μετρήσεων γίνεται από έναν μετρητικό βραχίονα αφής (probe) ο οποίος βρίσκεται πάνω στον κινητήριο άξονα της μηχανής. Ο βραχίονας αφής ποικίλει ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας του. Οι συνηθέστεροι μετρητικοί βραχίονες αφής είναι μηχανικοί, οπτικοί, με laser ή με χρήση λευκού φωτός. Στο σχήμα 2.9 απεικονίζονται παραδείγματα αυτών.



Σχήμα 2.9 : Μετρητικοί βραχίονες αφής για την εποπτεία και την ψηφιοποίηση τρισδιάστατων εξαρτημάτων



Σχήμα 2.10 : Ψηφιοποίηση αντικειμένου με χρήση της μεθόδου CMM

Ο τυπικός μηχανισμός αυτών των διατάξεων αποτελείται από μία γέφυρα τριών αξόνων. Αυτοί οι άξονες είναι κάθετοι μεταξύ τους όπως ένα κανονικό τριών διαστάσεων σύστημα συντεταγμένων. Ο κάθε άξονας έχει ένα σύστημα βαθμονόμησης που ταυτοποιεί τη θέση του κάθε άξονα. Τα δεδομένα εισόδου διαβάζονται από το βραχίονα αφής σύμφωνα με τις κατευθυντήριες κινήσεις του χειριστή. Έπειτα το μηχάνημα χρησιμοποιώντας τις X, Y και Z συντεταγμένες των σημείων καθορίζει το μέγεθος και τη θέση τους στον χώρο με ακρίβεια ορισμένων μικρομέτρων.

Η CMM αποτελεί επίσης μια συσκευή που βρίσκει εφαρμογή στις διαδικασίες κατασκευής και συναρμολόγησης για τον έλεγχο ενός τεμαχίου ή μιας συναρμολόγησης και τον έλεγχο του σχεδιασμού /33/. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της ψηφιοποίησης με την μέθοδο CMM. Με την ακριβή καταγραφή των συντεταγμένων δημιουργούνται



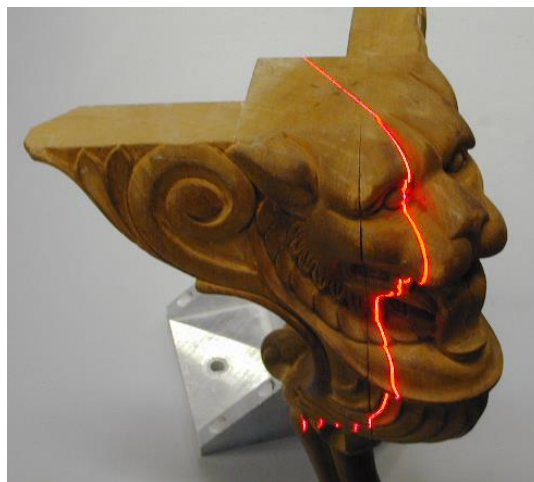


Σχήμα 2.11 : Εφαρμογή CMM στην κατασκευή και την εποπτεία αυτοκινητιστικού πλαισίου

σημεία τα οποία μπορούν έπειτα να αναλυθούν μέσω αλγορίθμων παλινδρόμησης για την κατασκευή των χαρακτηριστικών του τεμαχίου.

Τα σημεία συλλέγονται με τη χρήση του βραχίονα αφής που μετακινεί ένας χρήστης ή αυτόματα μέσω άμεσου ελέγχου υπολογιστή (DDC). Το DCC προγραμματίζεται συνήθως για επαναλαμβανόμενες μετρήσεις όμοιων τεμαχίων έτσι ώστε να θέτει το σύστημα CMM σαν μία εξειδικευμένη μορφή βιομηχανικού ρομπότ. Στο σχήμα 2.11 απεικονίζεται μια εφαρμογή της μεθόδου CMM.

Οι σαρωτές λέιζερ 3D όπως στο σχήμα 2.12 χρησιμοποιούν την δέσμη λέιζερ για τη μέτρηση της επιφάνειας /34/35/. Για λειτουργία αυτής της μορφής σαρωτών χρησιμοποιείται μια πηγή δέσμης λέιζερ και μια κάμερα η οποία λαμβάνει την ακτίνα του λέιζερ κάθε χρονική στιγμή καθώς αυτή προσπίπτει πάνω στο προς σάρωση τεμάχιο /36/.



Σχήμα 2.12 : Τρισδιάστατη ψηφιοποίηση με χρήση σαρωτή λέιζερ



Σχήμα 2.13 : Σάρωση με λέιζερ και άμεση τρισδιάστατη ψηφιοποίηση σε CAD/CAM

Αναλόγως την απόστασης η τελεία του λέιζερ απεικονίζεται σε διαφορετικό πεδίο οπτικής της κάμερας. Αυτή η τεχνική ονομάζεται τριγωνοποίηση διότι η τελεία του λέιζερ, η κάμερα και ο πομπός της δέσμης σχηματίζουν ένα τρίγωνο όπως παρατηρείται και στο σχήμα 2.13. Το μήκος της μιας πλευράς του τριγώνου, μεταξύ του πομπού και της κάμερας, είναι γνωστό. Επίσης είναι γνωστή η γωνία κλίσης του πομπού. Η γωνία της κάμερας μπορεί να προσδιοριστεί με βάση το σημείο όπου παρουσιάζεται το σημείο της ακτίνας λέιζερ εντός του πεδίου της κάμερας. Με αυτό τον

τρόπο ψηφιοποιείται η επιφάνεια και γίνεται ορατή σε τρισδιάστατη ανάλυση εντός ενός λογισμικού προγράμματος σχεδίασης του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Μία παρόμοια μέθοδος ως προς τον τρόπο λειτουργίας είναι η τρισδιάστατη σάρωση δομημένου φωτός όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14. Προβάλλοντας μια στενή λωρίδα φωτός πάνω σε τρισδιάστατο σχήμα επιφάνειας παράγεται μια γραμμή φωτισμού που εμφανίζεται παραμορφωμένη από άλλες προοπτικές από εκείνη του προβολέα. Η παραμορφωμένη γραμμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή γεωμετρική αναπαράσταση του σχήματος της επιφάνειας. Μια ταχύτερη και πιο ευέλικτη μέθοδος είναι η προβολή των σχεδιαγραμμάτων που αποτελούνται από πολλές λουρίδες καθώς αυτό επιτρέπει την απόκτηση ενός πλήθους δειγμάτων ταυτόχρονα. Βλέποντας από διαφορετικές οπτικές γωνίες το μοτίβο φαίνεται γεωμετρικά στρεβλωμένο λόγω του σχήματος της επιφάνειας του αντικειμένου. Η εικόνα που παράγεται δείχνει την γεωμετρική παραμόρφωση μιας ενιαίας λωρίδας προβαλλόμενη σε μια απλή 3D επιφάνεια. Η μετατόπιση των λωρίδων επιτρέπει την ακριβή ανάκτηση των 3D συντεταγμένων των δεδομένων σχετικά με την επιφάνεια του αντικειμένου.

### Διεύθυνση Διανυσμάτων

Οι διευθύνσεις των γεωμετρικών στοιχείων και οι διευθύνσεις των κινήσεων προσέγγισης του επαφέα σε ένα σημείο περιγράφονται με διανύσματα. Το διάνυσμα είναι μια ευθεία με μοναδιαίο μήκος και συγκεκριμένη διεύθυνση. Η διεύθυνση του διανύσματος σχετίζεται με τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων. Η I διεύθυνση είναι η διεύθυνση του άξονα X, η J διεύθυνση είναι η διεύθυνση του άξονα Y και η K διεύθυνση είναι η διεύθυνση του άξονα Z.



Σχήμα 2.14 : Τρισδιάστατος σαρωτής δομημένου φωτός



Σχήμα 2.15 : Βιομηχανικός αξονικός τομογράφος CT

Η σάρωση βιομηχανικής αξονικής τομογραφίας (IndustrialCTscanning) είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί εξοπλισμό ακτίνων X για την παραγωγή μιας τριών διαστάσεων αναπαράστασης των εξαρτημάτων τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά /38/39/40/. Η CT σάρωση χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας κυρίως για εσωτερικό έλεγχο των εξαρτημάτων. Ορισμένες από τις βασικές χρήσεις είναι η ανίχνευση ελαττωμάτων, η ανάλυση αστοχίας, η μετρολογία και η ανάλυση συναρμολόγησης στις εφαρμογές αντίστροφης μηχανικής. Ο τρόπος λειτουργίας είναι ο ίδιος με έναν αξονικό τομογράφο όπως στο σχήμα 2.15 που βρίσκει εφαρμογή στην ιατρική. Μία πηγή ακτίνων X δημιουργεί έναν κώνο ακτίνων στη μία πλευρά του αντικειμένου οι οποίες διαπερνούν το δοκίμιο και προσπίπτουν στον ανιχνευτή που είναι τοποθετημένος στην απέναντι πλευρά. Η περιστροφή του αντικειμένου είναι αυτή που τελικά δίνει ψηφιοποιημένη την τελική γεωμετρία του αντικειμένου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

## 2.7 Μία επισκόπηση στη Μηχανική Μορφής

Η τεχνολογία τρισδιάστατης σάρωσης (3D Scanning) έχει σημειώσει τεράστια πρόοδο τα τελευταία 25 χρόνια (Bais, 2004), ειδικά όσο αφορά τους οπτικούς μή επαφικούς ψηφιοποιητές επιφανειών. Οι συγκεκριμένοι σαρωτές (ή ψηφιοποιητές) γίνονται όλο και πιο φορητοί και οικονομικά προσιτοί, ταχύτεροι και πιο ακριβείς.

Δημιουργείται έτσι μια όλο και μεγαλύτερη ανάγκη στην αγορά για ανάπτυξη τεχνολογιών γεωμετρικής μοντελοποίησης και δημιουργία λογισμικού που επεξεργάζεται γρήγορα και αποτελεσματικά μεγάλες ποσότητες σαρωθέντων σημείων (διεσπαρμένα σημεία που προκύπτουν από 3D σάρωση ή αλλιώς 'νέφη σημείων') και τα μετατρέπουν σε χρήσιμες μονάδες όπως μη ομοιόμορφες σύμμετρες διανυσματικές επιφάνειες (NURBs).

Η τεχνολογία αυτόματης προσαρμογής επιφανειών που ομαδοποιεί συστοιχίες σημείων και τις μετατρέπει σε διανυσματικές επιφάνειες (NURB surface models) έχει αναπτυχθεί και σήμερα υπάρχουν εξειδικευμένα πακέτα λογισμικού όπως το Geomagic το Rapidform (INUS Technology, Inc.), το PolyWorks (innovMetric), το SolidWorks/Scan το 3D (SolidWorks, Inc.) και πολλά άλλα, που κάνουν αυτή τη δουλειά. Αυτά τα λογισμικά χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για τη δημιουργία μοντέλων με διανυσματικές NURB επιφάνειες με εξαιρετική ακρίβεια, εξοικονομώντας πολύ χρόνο και κόπο. Τα NURB στερεά μοντέλα είναι εφοδιασμένα με πολλές γεωμετρικές πληροφορίες που χρησιμεύουν σε μηχανικές διεργασίες όπως συντήρηση, επισκευή και λεπτομερείς ελέγχους (MRO) όπως μερική επιθεώρηση και καλιμπράρισμα προσαρτημάτων. Τα μοντέλα NURB-επιφανειών υποστηρίζουν τρισδιάστατη μοντελοποίηση για εφαρμογές εμβιομηχανικής και ιατρικής (Chang et al., 2003; Sun et al., 2002; Liu et al., 2010; Lv et al., 2009). Επίσης μπορούν να υποστηρίξουν βιομηχανίες οχημάτων και σχεδιασμό αεροσκαφών (Raja & Fernades 2008). Τα μοντέλα NURB-επιφανειών που προκύπτουν από νέφη σημείων έχουν συνεισφέρει εκπληκτικά σε ευρεία γκάμα μηχανικών εφαρμογών. Όμως, αυτά τα μοντέλα περιέχουν σκέτα τα τμήματα επιφανειών χωρίς τις πρόσθετες πληροφορίες σήμανσης και τοπολογίας που περιλαμβάνει η βασισμένη στα μορφολογικά χαρακτηριστικά και παραμετρική απεικόνιση. Έτσι, είναι ακατάλληλα για αλλαγές στο σχεδιασμό, για τη δημιουργία πορείας εργαλείου για Αντίστροφη Μηχανική με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά και την προεργασία πακέτων τεχνικών δεδομένων. Η μερική ανακατασκευή που περιλαμβάνει αλλαγές στο σχεδιασμό επίσης απαιτεί παραμετρικά στερεά μοντέλα.

Στην αντίπερα όχθη, η παραμετροποίηση της σχεδίασης προσπαθεί να δημιουργήσει πλήρως λειτουργικά παραμετρικά στερεά μοντέλα από δεδομένα σημεία που εξήχθησαν από σάρωση του αντίστοιχου αντικειμένου, και να τα εξάγουν σε γνωστές μορφές σχεδίων CAD που επιτρέπουν το ανακατασκευή του τεμαχίου, δημιουργία CNC κώδικα βασισμένο στα χαρακτηριστικά του τεμαχίου, και την προεργασία πακέτων τεχνικών δεδομένων. Παρ' ότι η μετατροπή των εξαχθέντων σημείων σε διανυσματικές καμπύλες επιφανειών έχει αυτοματοποιηθεί, η δημιουργία παραμετρικών στερεών μοντέλων από σημεία είναι αδύνατο (και άρα δεν πρόκειται ποτέ) να αυτοματοποιηθεί. Αυτό διότι οι αρχικές παράμετροι που είναι ενσωματωμένοι στα σαρωθέντα σημεία πρέπει να ανακτηθούν και να συνεισφέρουν στη δημιουργία ενός παραμετρικού μοντέλου. Ο ίδιος ο μηχανικός πρέπει να ανακτήσει και να επεξεργαστεί τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του μοντέλου. Ο σκοπός όμως είναι οι σχεδιαστές να ασχολούνται όσο λιγότερο γίνεται με κουραστικούς χειρισμούς δεδομένων και την κατασκευή βασικών γεωμετρικών μοντέλων. Το ιδανικό σενάριο θα ήταν η ύπαρξη ενός λογισμικού ικανού να πραγματοποιεί αυτόματα όλες τις χρονοβόρες και κοπιώδεις για το μηχανικό διαδικασίες που γίνονται 'στο χέρι' όπως ο χειρισμός νεφών σημείων, η τριγωνοποίηση κ.ο.κ προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα ανάκτησης των χαρακτηριστικών του σχεδίου με διαδραστικό τρόπο. Τι απ' όλα αυτά μπορεί να γίνει με τα σημερινά λογισμικά πακέτα; Ήδη υπάρχουν αρκετά τεχνικά άρθρα που αναφέρονται στη αυτόματη κατασκευή επιφανειών.

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες να αυτοματοποιηθεί η δημιουργία μοντέλων NURB (διανυσματικών) επιφανειών από νέφη σημείων. Μόνο πολύ πρόσφατα τα λογισμικά πακέτα εξελίχθηκαν ώστε να υποστηρίξουν παραμετρικό σχεδιασμό στερεών μοντέλων

που επιτρέπει σημαντική επέκταση στον τομέα των εφαρμογών μηχανικής και αντίστροφης μηχανικής.

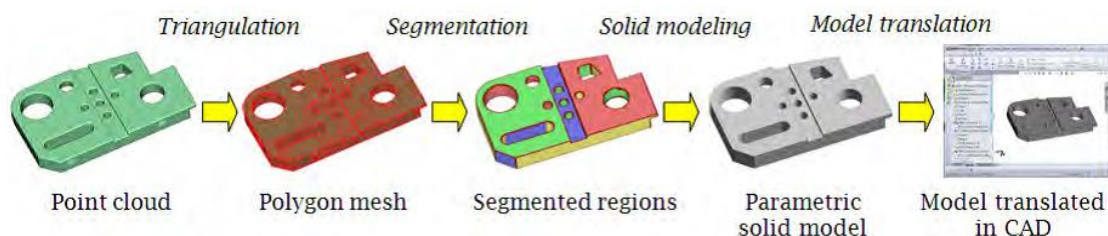
## 2.8 Παραμετροποίηση Σχεδιασμού

Μια συνήθης προσέγγιση στην αναζήτηση εναλλακτικών σχεδιασμών είναι η μεταβολή το μέγεθος ή το σχήμα κάποιων τμημάτων του μηχανικού συστήματος. Για να γίνει η μεταβολή του σχήματος ή του μεγέθους των τμημάτων και η αναζήτηση καλύτερων μορφών σχεδιασμού, τα κομμάτια και η συναρμολόγηση πρέπει να παραμετροποιηθούν κατάλληλα για να ικανοποιήσουν το πραγματικό σχέδιο.

Στο επίπεδο των τεμαχίων, η παραμετροποίηση σχεδιασμού δημιουργεί στερεά χαρακτηριστικά και συσχετίζει τις διαστάσεις έτσι ώστε όταν σε ένα τεμάχιο μια τιμή κάποιας διάστασης αλλάζει, το αλλαγμένο τεμάχιο μπορεί να ξαναφτιαχτεί σωστά, και το νέο τεμάχιο αποκαλύπτει το πραγματικό σχέδιο. Στο επίπεδο της συναρμολόγησης, η παραμετροποίηση της σχεδίασης ορίζει τα επίπεδα συναρμολόγησης και συσχετίζει τις διαστάσεις μεταξύ τεμαχίων. Όταν η συναρμολόγηση είναι πλήρως παραμετροποιημένη, με την αλλαγή στην τιμή μιας διάστασης ορίζονται νέες, σωστές διαστάσεις σε όλα τα κομμάτια που επηρεάζονται. Τα κομμάτια που επηρεάστηκαν πρέπει να ανακατασκευαστούν με επιτυχία, και ταυτόχρονα να διατηρούν σωστή θέση και προσανατολισμό σε σχέση με τα υπόλοιπα κομμάτια χωρίς να παραβιάζουν κανένα επίπεδο συναρμολόγησης ή να εισχωρούν σε άλλα κομμάτια ή να αφήνουν μεγάλα κενά. Για παράδειγμα, σε ένα μονοκύλινδρο κινητήρα, μια αλλαγή στη διάμετρο της οπής δε θα επηρεάσει μόνο τη γεωμετρία της ίδιας της οπής αλλά και όλων των άλλων μερών που σχετίζονται όπως το πιστόνι, ακόμα και το στροφαλοφόρο άξονα. Επίσης, όλα τα παραπάνω πρέπει να ανακατασκευαστούν σωστά ώστε όλη η συναρμολόγηση να παραμένει σε απόλυτη επαφή και να διατηρούνται και όλοι οι περιορισμοί.

## 2.9 Μηχανική Μορφής

Όλη η διαδικασία της μηχανικής μορφής και η παραμετρική στερεά μοντελοποίηση, σε 4 βασικά στάδια φαίνεται στο σχήμα 2.16. Αρχικά (1) η μετατροπή της τριγωνοποίησης σε σημεία και μετέπειτα σε πλέγμα πολυγώνων, (2) την τμηματοποίηση του πλέγματος που χωρίζει ένα πλέγμα πολυγώνων σε περιοχές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας που αντιπροσωπεύουν. (3) την στερεά μοντελοποίηση που μετατρέπει τις χωρισμένες περιοχές σε παραμετρικά στερεά μοντέλα και (4) μετάφραση μοντέλων που εξάγει τα στερεά μοντέλα σε προγράμματα CAD. Θα ήταν προτιμητέο να υπάρχει πλήρη αυτοματοποίηση σε όλα τα στάδια εκτός από το 3ο. Αυτό διότι, όπως αναφέρθηκε και πριν, η το 3ο στάδιο απαιτεί την παρεμβολή του σχεδιαστή, κυρίως για να ανακτηθεί το αρχικό σχέδιο. Τα 4 παραπάνω στάδια περιγράφονται σύντομα στις υποενότητες που ακολουθούν.



Σχήμα 2.16 : Γενική διαδικασία της Μηχανικής Μορφής και του Παραμετρικού Σχεδιασμού

## 2.10 Τριγωνοποίηση

Η μαθηματική θεωρία και οι υπολογιστικοί αλγόριθμοι για την τριγωνοποίηση έχουν αναπτυχθεί πολύ τις τελευταίες δεκαετίες. Ένα πολυγωνικό πλέγμα μπορεί να φτιαχτεί αυτόματα και πολύ αποτελεσματικά για ένα δωσμένο σύνολο σημείων. Η βασική μέθοδος



τριγωνοποίησης που χρησιμοποιείται είναι η τριγωνοποίηση του Delaunay. Υπάρχουν και άλλοι γνωστοί μαθηματικοί αλγόριθμοι για την τριγωνοποίηση όπως ο αλγόριθμος marchingcubes (Lorensenetal., 1987), ο αλγόριθμος Alphashapes (Edelsbrunneretal., 1983), ballpivotingalgorithm (BPA) (Bernardinietal., 1999), ανακατασκευή επιφάνειας Poisson (Kazhdanetal., 2006), κινούμενα ελάχιστα τετράγωνα (Cuccuruetal., 2009), etc. Κάποια απαιτητικά πρότζεκτ αντίστροφης μηχανικής, όπως κομμάτια της Florentine Pieta του Μιχαήλ Άγγελου έχουν δώσει πολύ καλά αποτελέσματα

Η Pieta με σύνθεση 14 εκατομμυρίων σημείων από περισσότερες από 700 σαρώσεις (Bernardinietal., 1999), η ψηφιακή ανακατασκευή του Καθεδρικού ναού της Πίζας από δεδομένα λείζερ σάρωσης, 154 εκ. σημεία (Cuccuruetal., 2009) και το κεφάλι μαζί με δομές του εγκεφάλου (κρυμμένες) με δεδομένα από 150 μαγνητικές τομογραφίες και χρήση μεθόδου ελάχιστων κύβων (150.000 τρίγωνα) όπως φαίνεται στο [Σχήμα 2.17](#).



Σχήμα 2.17 : Παραδείγματα σάρωσης και τριγωνοποίησης (α) Florentine Pieta του Μιχαήλ-Άγγελου, (β) Καθεδρικός ναός της Πίζας, and (γ) Κεφάλι και εγκεφάλος

Παρ' ότι υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι τριγωνοποίησης δεν είναι όλοι επιβεβαιωμένα σωστοί. Τείνουν να δημιουργούν επιφάνειες με υπερβολικά πολλά τρίγωνα. Επίσης, αυτοί οι αλγόριθμοι θεωρούν δεδομένη την τοπολογία του σχήματος που ανακατασκευάζουν και οι ρυθμίσεις κάποιων παραμέτρων συχνά επηρεάζουν τα αποτελέσματα και τη σταθερότητα. Αξιοσημείωτοι είναι και μερικοί αλγόριθμοι μετέπειτα επεξεργασίας επιφανειών όπως ο αποδεκατισμός (decimation), και η εξομάλυνση πλέγματος (e.g., Hansenetal. 2005; Lietal., 2009).

## 2.11 Τμηματοποίηση

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα στη μηχανική μορφής είναι η τμηματοποίηση του πλέγματος. Η οποία ομαδοποιεί τα αρχικά σημεία ή πλέγματα σε υποσύνολα καθένα από τα οποία λογικά ανήκει σε μία πρωτογενή επιφάνεια.

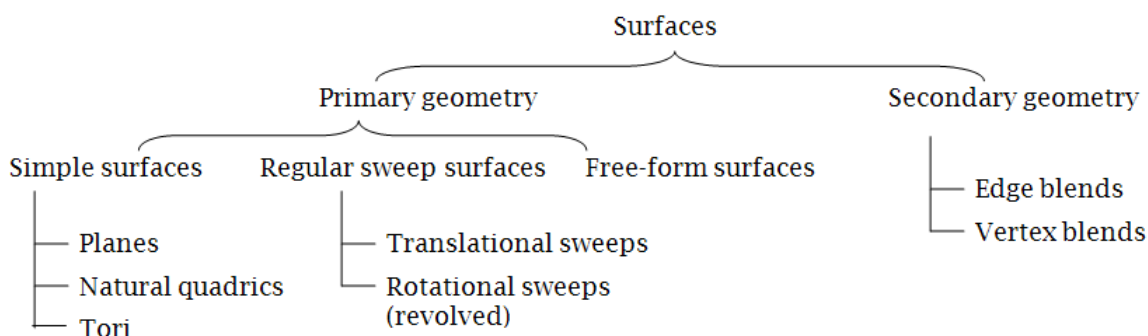
Γενικά η τμηματοποίηση είναι μια σύνθετη διεργασία. Συχνά εφαρμόζονται επαναληπτικές τεχνικές επέκτασης περιοχής (Besl & Jain, 1988; Alrashdan et al., 2000; Huang & Meng, 2001). Άλλοτε, χρησιμοποιούνται μη επαναληπτικές μέθοδοι απευθείας τμηματοποίησης (Varady et al., 1998) οι οποίες μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές. Γενικά, η τμηματοποίηση απασχολεί γρήγορους αλγορίθμους για την αναζήτηση των κοντινότερων γειτονικών σημείων και την εκτίμηση ιδιοτήτων των αντίστοιχων επιφανειών πρώτης τάξης και δεύτερης τάξης. Ο τμηματοποίηση πρώτης τάξης, που βασίζεται σε κανονικά διανύσματα, κάνει μια αρχική υποδιαίρεση της επιφάνειας σε τμήματα. Επίσης αναγνωρίζει οξείες αιχμές και επίπεδες ή λείες καμπύλες επιφάνειες. Η τμηματοποίηση 2ης τάξης χωρίζει την επιφάνεια σε περιοχές αναγνωρίζοντας βασικές δομές καμπυλότητας κι έτσι παρέχει τη βάση για μετέπειτα αναγνώριση απλών αλγεβρικών σχημάτων. Τα αποτελέσματα της τμηματοποίησης πλέγματος εξαρτώνται από αρκετές σημαντικές παραμέτρους όπως την τιμή  $k$  (ο αριθμός των γειτονικών σημείων που θα ληφθούν υπ' όψιν για την εκτίμηση ιδιοτήτων της επιφάνειας) και οι προκαθορισμένες διαφορές (ή 'κατώφλι ευαισθησίας') μεταξύ κανονικών διανυσμάτων και κυρτοτήτων

(curvatures) που ομαδοποιούν σημεία ή τμήματα του πλέγματος. Για παράδειγμα (σχ. 4α) υψηλή ευαισθησία οδηγεί σε διεσπαρμένες περιοχές μικρού μεγέθους ενώ με χαμηλότερη ευαισθησία δημιουργούνται μερισμοί σε τμήματα που προσεγγίζουν καλά την τοπολογία του αντικείμενου σχήμα 2.18.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι τμηματοποίησης παρεμβάλουν μία επιφάνεια σε κάθε τμηματοποιημένη περιοχή. Είναι σημαντικό ο ορισμός μιας ιεραρχίας στα είδη επιφανειών ανάλογα με τη μορφολογική/γεωμετρική τους συνθετότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.22 (Varady et al., 1997). Γενικά, τα αντικείμενα οριοθετούνται από σχετικά μεγάλες πρωτεύουσες (ή λειτουργικές/functional) επιφάνειες. Οι πρωτεύουσες επιφάνειες μπορεί να τέμνονται σε οξείες ακμές ή μπορεί να υπάρχουν δευτερεύουσες ή αλληλεπικαλυπτόμενες επιφάνειες μεταξύ των οποίων είναι εφικτή μια ομαλή μετάβαση.



Σχήμα 2.18 : Παράδειγμα μερισμού επιφανειών, (α) ένα αντικείμενο χωρίστηκε σε πολλές μικρές περιοχές λόγω υψηλής τιμής ευαισθησίας (b) περιοχές που δημιουργήθηκαν με χαμηλό κατώφλι ευαισθησίας



Σχήμα 2.19 : Ιεράρχηση επιφανειών

Όπως συζητήθηκε παραπάνω, ο μερισμός βάσει μορφολογικών χαρακτηριστικών υποστηρίζει επαρκώς την αναγνώριση και τον διαχωρισμό βασικών αλγεβρικών επιφανειών. Αλγεβρικές επιφάνειες όπως επίπεδα, φυσικά στερεά (σφαίρες, κύλινδροι, κώνοι κα), μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν στις αντίστοιχες θέσεις τους. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που χρησιμοποιούν τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων για να επιτύχουν το παραπάνω (πχ: (Marshall et al., 2004)).

Πέρα από αλγεβρικές επιφάνειες, πιο γενικές μορφές επιφανειών όπως επιφάνειες από σάρωση, από εξώθηση (σάρωση & μεταφορά), εκ' περιστροφής (σάρωση & περιστροφή) και σωληνοειδείς είναι επίσης άμεσα συμβατές με CAD μοντέλα. Η προσαρμογή τέτοιων επιφανειών σε τμηματοποιημένα σημειακά δεδομένα ή σε πλέγμα είναι κρίσιμη για την ανακατασκευή των στερεών μοντέλων και την υποστήριξη της παραμετροποίησης (Lukacs et al., 1998).

Σε μερικές εφαρμογές υπάρχουν περιοχές σημείων που είναι αδύνατο να ταυτιστούν με κάποια γνωστή επιφάνεια ή έστω συμβατή με CAD επιφάνειες μέσα στο δοσμένο

περιθώριο σφάλματος. Αυτές οι εναπομείνουσες περιοχές χαρακτηρίζονται αταξινόμητες επιφάνειες (freeform surfaces) καθώς δεν έχουν καμία αναγνωρίσιμη γεωμετρική ή τοπολογική ικανότητα. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι και μέθοδοι που υποστηρίζουν αναγνώριση NURB επιφανειών (όπως: Tsai et al., 2009).

## **2.12 Μοντελοποίηση στερεού**

Η μοντελοποίηση στερεού είναι πιθανόν η λιγότερο ανεπτυγμένη διεργασία στην μηχανική μορφής για αντίστροφη μηχανική. Οι δύο βασικοί τρόποι αναπαράστασης στερεών μοντέλων είναι η αναπαράσταση των ορίων (B-ger) και η αναπαράσταση βάσει μορφολογικών χαρακτηριστικών. Έχουν προταθεί κάποιες μέθοδοι για την αυτόματη κατασκευή B-ger μοντέλων από νέφη σημείων ή από πλέγμα πολυγώνων (Varadyetal., 1998). Μία πρόσφατη και πολλά υποσχόμενη εφαρμογή είναι η αναγνώριση γεωμετρικών χαρακτηριστικών (GFR, Geometric Feature Recognition) η οποία αναγνωρίζει αυτόματα στερεά χαρακτηριστικά στα B-ger μοντέλα. Όμως, ως τώρα, καμία από τις μεθόδους δε μπορεί να αυτοματοποιήσει πλήρως την διαδικασία αναγνώρισης και κατασκευής πλήρως παραμετρικών στερεών μοντέλων. Η επέμβαση του χρήστη είναι απαραίτητη σε κάποια σημεία.

## **2.13 Αναπαράσταση ορίων**

Δημιουργείται ένα γράφημα με ομάδες τμηματοποιημένων περιοχών και με τις αντίστοιχες προσκείμενες επιφάνειες. Σε αυτό το γράφημα φαίνεται όλη η τοπολογία του μοντέλου και είναι η βάση για τη δημιουργία του τελικού B-ger μοντέλου (που ονομάζεται και συρραμμένο μοντέλο stitched model), όπου τα σύνορα των ξεχωριστών επιφανειών ενώνονται πάνω στις κοινές τους ακμές για να σχηματίσουν ένα αεροστεγές μοντέλο επιφάνειας.

Γενικά, η κατασκευή των b-ger μοντέλων γίνεται σε τρία βήματα, επιπεδοποίηση, υπολογισμός ακμών και κορυφών και συρραφή (Varadyetal., 1998). Στο βήμα της επιπεδοποίησης οι περιοχές εκτείνονται προς τα έξω μέχρι να καταταγούν όλα τα τρίγωνα. Σημειωτέο ότι αυτό το βήμα είναι απαραίτητο για την αφαίρεση όλων των κενών μεταξύ των περιοχών. Οι αιχμηρές ακμές μπορούν να αναγνωριστούν χρησιμοποιώντας ρουτίνες διάτμησης επιφάνειας, ενώ οι κορυφές μπορούν να αναγνωριστούν όταν τέμνονται τρεις επιφάνειες. Κατά την διεργασία επίσης κατασκευάζεται ένα πλήρες δέντρο B-ger τοπολογίας. Ένα B-ger μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί συρράβοντας μαζί πλευρές, ακμές και κορυφές. Αυτή η λειτουργία υποστηρίζεται από τους περισσότερους πυρήνες μοντελοποίησης στερεών.

## **2.14 Αναγνώριση στερεών χαρακτηριστικών (Solid feature recognition)**

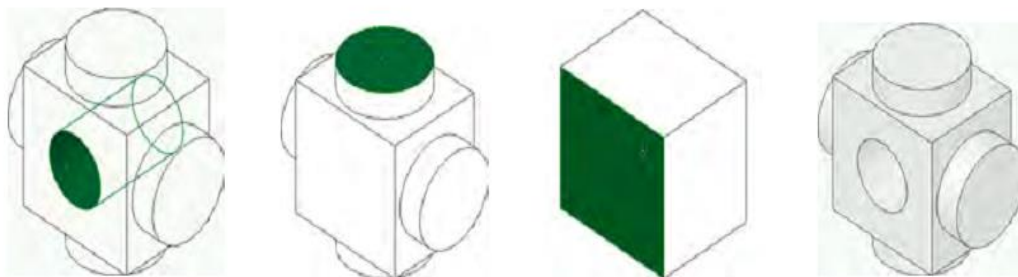
Τα B-ger μοντέλα δεν βασίζονται στα μορφολογικά χαρακτηριστικά. Για να μετατραπεί ένα B-ger μοντέλο σε ένα στερεό μοντέλο βάσει μορφολογικών χαρακτηριστικών πρέπει να αναγνωριστούν τα στερεά στοιχεία που το απαρτίζουν και να δημιουργηθεί ένα δέντρο χαρακτηριστικών που περιγράφει την αλληλουχία και την σειρά των υπο-δημιουργία μορφολογικών χαρακτηριστικών.

Ένας από τους αποτελεσματικότερους αλγόριθμους για τον εντοπισμό μορφολογικών χαρακτηριστικών (βλέπε: Venkataramanetal., 2001) χρησιμοποιεί μια απλή διαδικασία τεσσάρων βημάτων:

- 1) Απλοποίηση των εισαχθέντων όψεων
- 2) ανάλυση όψεων για την αναγνώριση συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών
- 3) αφαίρεση αναγνωρισθέντων στοιχείων και ανανέωση του μοντέλου
- 4) επιστροφή στο βήμα (2) και
- 5) επανάληψη μέχρις ότου αναγνωριστούν όλα τα μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Η διαδικασία απεικονίζεται στο σχήμα 2.20. Μόλις αναγνωριστούν όλα τα μορφολογικά χαρακτηριστικά αποτυπώνονται σε ένα καινούριο στερεό μοντέλο του τεμαχίου σχήμα

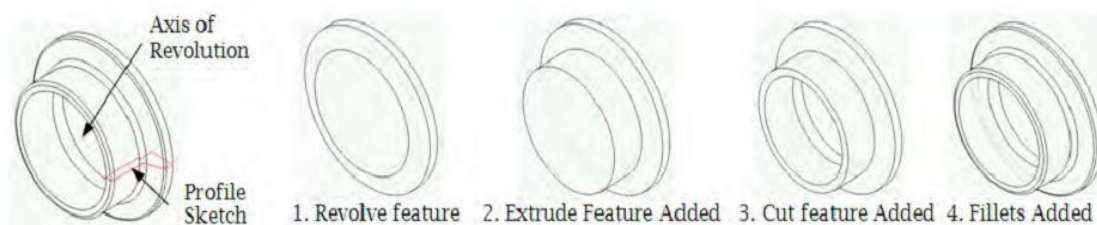
2.20d που είναι παραμετρικό και στο οποίο αντιστοιχεί ένα δέντρο χαρακτηριστικών. Σε αυτό το δέντρο χαρακτηριστικών βρίσκεται η σειρά ανάκτησης & ανακατασκευής των στοιχείων του μοντέλου.



Σχήμα 2.20 : Απεικόνιση του αλγορίθμου GFR ,a) το εισαχθέν μοντέλο επιφάνειας με επιλεγμένη μία περιοχή σχήματος τρύπας, b) η τρύπα αναγνωρίστηκε και αφαιρέθηκε και επιλέχθηκε εξωθημένη όψη κυλίνδρου, c) αναγνωρίστηκαν οι κυλινδρικές προεξοχές, επιλέχθηκε η εξωθημένη όψη του βασικού κομματιού, d) όλα τα χαρακτηριστικά αναγνωρίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν στο στερεό μοντέλο

Η μέθοδος του Venkataraman πέρασε πρόσφατα στην αγορά μέσω της Geometric Software Solutions, Ltd. (GSSL) που την ενσωμάτωσε σε πακέτα CAD όπως το Solidworks και το CATIA, ικανά πλέον να αναγνωρίζουν βασικά στοιχεία όπως επιφάνειες από εξώθηση, περιστροφή και (πιο πρόσφατα) 'τράβηγμα'. Αυτές οι λειτουργίες αρχικά χρησιμοποιήθηκαν με σχετική επιτυχία για την 'μεταφορά' στερών μοντέλων μεταξύ λογισμικών CAD, όπου μεταφερόταν όχι μόνο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως γινόταν με το IGES (Initial Graphics Exchange Standards) αλλά και παραμετρικά στοιχεία για το μοντέλο.

Ένα από τα κυριότερα ζητήματα που διαφαίνεται στο λογισμικό GFR είναι η ανάκτηση πρόθεσης του σχεδιαστή (design intent recovery). Για παράδειγμα, η φλάντζα μιας σωλήνωσης αεροσκάφους θα αναγνωριζόταν ως μια απλή, εκ περιστροφής επιφάνεια όπου το προφίλ του αντίστοιχου σκίτσου περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα σχήμα 2.21. Όμως, οι σημερινές εφαρμογές GFR δεν είναι ευέλικτες. Το σχήμα 2.21 b απεικονίζει ότι χωρίς την κατάλληλη επέμβαση από το χρήστη, μια απλή φλάντζα μπορεί να αναγνωριστεί ως τέσσερα η περισσότερα διαφορετικά κομμάτια, ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι. Μια τέτοια υλοποίηση μπορεί να μην είναι επιθυμητή στην επανάκτηση του πραγματικού τρόπου σχεδίασης.



Σχήμα 2.21 : Αναγνώριση χαρακτηριστικών της φλάντζας σωλήνωσης αεροσκάφους (a) απλό 'εκ περιστροφής' στοιχείο, (b) Τέσσερα στοιχεία: 'εκ περιστροφής', εξωθημένο, 'τραβηγμένο' και λωρίδα

## 2.15 Παραμετροποίηση Σχεδιασμού

Ένα παραμετρικό βάσει μορφολογικών χαρακτηριστικών μοντέλο αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία. Το δέντρο χαρακτηριστικών και τα πλήρως παραμετροποιημένα σκίτσα

των στερεών στοιχείων που εξέχουν. Σε ένα πλήρως παραμετροποιημένο σκίτσο, το προφίλ σκίτσου έχει όλες τις απαραίτητες διαστάσεις και περιορισμούς έτσι ώστε μια αλλαγή σε κάποια διάσταση να οδηγεί στην σωστή ανακατασκευή όλου του μοντέλου ανάλογα με την πρόθεση σχεδιασμού. Καθ' όσον ο γραφών γνωρίζει, μέχρι σήμερα δεν υπερέχει καμία μέθοδος που να αυτοματοποιεί πλήρως την προαναφερθείσα διαδικασία. Μερικά εργαλεία που κυκλοφορούν όπως το Rapidform επιτρέπουν στο σχεδιαστή, με μικρή επέμβαση, να δημιουργήσει από τα σημεία-δεδομένα πλήρως παραμετροποιημένα σκίτσα, γεγονός που διευκολύνει εξαιρετικά τη διαδικασία στερεής μοντελοποίησης.

## **2.16 Εξαγωγή στερεού μοντέλου**

Εφ' όσον οι ευφύτερες δυνατότητες μηχανικής μορφής δεν παρέχονται από CAD λογισμικά (αναλυτικότερα στο επόμενο υποκεφάλαιο), τα στερεά μοντέλα που κατασκευάστηκαν με εξειδικευμένο στην αντίστροφη μηχανική λογισμικό πρέπει να εξαχθούν σε εμπορικά πακέτα CAD για να χρησιμοποιηθούν σε κοινές εργασίες & επεξεργασία. Οι συμβατικές ανταλλαγές στερεών μοντέλων με στάνταρ όπως το IGES or STEPAP (application protocols) δεν επαρκούν καθώς έτσι χάνονται οι παραμετρικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά του στερεού, το δέντρο χαρακτηριστικών, οι περιορισμοί & διαστάσεις στο σκίτσο. Παρ' ότι λοιπόν η αυτόματη αναγνώριση μορφολογικών χαρακτηριστικών διευκολύνει το χρήστη στον εντοπισμό γεωμετρικών χαρακτηριστικών που ενσωματώνουν τα B-rep μοντέλα, παραμένει μια χρονοβόρα διαδικασία. Κάποια λογισμικά, όπως η επέκταση live Transfer™ του Rapidform XOR3 ή άλλα τρίτων κατασκευαστών όπως το TransMagic επιτρέπουν την άμεση εξαγωγή στερεού μοντέλου.

## **2.17 Αξιολόγηση του λογισμικού μηχανικής**

Τα σημαντικότερα κριτήρια για την αξιολόγηση των λογισμικών είναι η δυνατότητα αυτόματης κατασκευής επιφανειών από νέφη σημείων και η παραμετρική μοντελοποίηση στερεού. Αρχικά εξετάσαμε γρήγορα 9 δημοφιλή λογισμικά πακέτα που κυκλοφορούν στη αγορά. Αυτή η απεικόνιση βασίστηκε στις πληροφορίες από τους εμπορικούς καταλόγους των προϊόντων, τεχνικές αναφορές (for example, Siddique, 2002; Changetal., 2006), διπλωματικές εργασίες (for example, Gibson, 2004), εταιρικές ιστοσελίδες, online δοκιμαστικό λογισμικό, μελέτες εφαρμογών κτλ. Μετά την απεικόνιση, αποκτήθηκαν τέσσερα εργαλεία και αξιολογήθηκαν τα λογισμικά χρησιμοποιώντας πέντε βιομηχανικά παραδείγματα. Στην συνέχεια βρίσκονται τα μειονεκτήματα και τα προτερήματα των λογισμικών, γίνονται κάποιες παρατηρήσεις και εξάγονται κάποια συμπεράσματα.

## **2.18 Λογισμικό απεικόνισης**

Μετά από εκτενή έρευνα και ανάπτυξη της τελευταία δεκαετία, τα λογισμικά εργαλεία για αντίστροφη μηχανική έχουν εξελιχθεί εντυπωσιακά. Γενικά είναι δυνατός ο διαχωρισμός σε δύο κατηγορίες, τα βάσει μορφολογικών χαρακτηριστικών και τα λογισμικά αντίστροφης μηχανικής. Τα βάσει μορφολογικών χαρακτηριστικών πακέτα CAD, όπως τα Pro/ENGINEER, SolidWorks, και CATIA, δίνουν έμφαση στην αναγνώριση και ανάκτηση των αρχικών τρόπων σχεδιασμού των δοκιμίων. Ο σχεδιαστής μπορεί να δημιουργήσει μοντέλα που έχουν ανακτήσει τις τάσεις σχεδιασμού τους ακολουθώντας στάνταρ CAD δυνατότητες όπως σκίτσο, τράβηγμα και λογικών λειτουργιών. Αντίθετα, λογισμικά αντίστροφης μηχανικής όπως τα Geomagic, Rapidform, και Paraform, εστιάζουν στην ανάκτηση της Γεωμετρίας των αντικειμένων από δεδομένα 3D σαρωτών, συνήθως σε μορφή NURB επιφανειών. Τα λογισμικά πακέτα αντίστροφης μηχανικής προσφέρουν εξαιρετικές δυνατότητες επεξεργασίας σημείων, κατασκευής πλεγμάτων πολυγώνων, και δημιουργίας NURB επιφανειών. Επιπλέον, τα εξειδικευμένα σε αντίστροφη μηχανική λογισμικά πακέτα καταφέρνουν να απεικονίσουν πολύ καλύτερα πρότζεκτς με μεγάλο όγκο δεδομένων απ' ό,τι τα αντίστοιχα CAD πακέτα, επειδή ακριβώς είναι φτιαγμένα για να κάνουν αντίστροφη μηχανική.

Σε αυτή τη μελέτη & επισκόπηση λογισμικών μελετήθηκαν δύο κρίσιμες μηχανικές ικανότητες, την κατασκευή επιφανειών και την παραμετρική μοντελοποίηση στερεού από

ένα νέφος σημείων ή από ένα πλέγμα πολυγώνων. Όλα τα λογισμικά, είτε CAD είτε αντίστροφης μηχανικής προσφέρουν δυνατότητες κατασκευής επιφανειών. Όμως η από το χρήστη κατασκευή των καμπύλων και επιφανειών από νέφη σημείων ή πλέγμα πολυγώνων είναι κουραστική και χρονοβόρα. Είναι πολύ σημαντικό λοιπόν ένα επαγγελματικό λογισμικό πακέτο να προσφέρει αυτόματη αναγνώριση & δημιουργία επιφανειών (auto surfacing) επιτρέποντας στο χρήστη με ελάχιστη επέμβαση να δημιουργεί υψηλής ποιότητας & ακρίβειας και στεγανά μοντέλα επιφανειών. Αν βέβαια η κατασκευή των στερεών μοντέλων γίνεται με διαδραστικό τρόπο οι σχεδιαστές μπορούν να ανακτούν τις τάσεις σχεδιασμού (design intents) του μοντέλου.

Το λογισμικό λοιπόν πρέπει να προσφέρει επαρκείς δυνατότητες ώστε ο χρήστης να μπορεί να δημιουργήσει εύκολα προφίλ σχεδίασης και στερεά στοιχεία χωρίς να ασχολείται με νέφη σημείων ή πλέγμα πολυγώνων. Επίσης, τα λογισμικά πρέπει να μπορούν να ανταποκριθούν αξιόπιστα σε μεγάλο όγκο δεδομένων. Μερικά εκατομμύρια σημεία απαιτούν τεράστιους υπολογιστικούς πόρους για να επεξεργαστούν με τον επιθυμητό τρόπο. Ακόμα και η μεγέθυνση ή η περιστροφή του αντικειμένου στην οθόνη μπορεί να έχει καθυστέρηση λόγω όγκου δεδομένων. Αναζητάμε λοιπόν λογισμικό με δυνατότητες αυτόματης αναγνώρισης επιφανειών και παραμετρικής μοντελοποίησης που ταυτόχρονα μπορεί γρήγορα και αξιόπιστα να διαχειριστεί μεγάλα αρχεία.

Άλλα κριτήρια για το λογισμικό παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Τα κριτήρια χωρίζονται σε 4 κατηγορίες.

- (1) Γενικές δυνατότητες, όπως ταχύτητα
- (2) Δημιουργία NURB μοντέλων, αυτόματης προσαρμογής επιφανειών και επεξεργασία γεωμετρικών οντοτήτων & χαρακτηριστικών
- (3) Κατασκευή στερεών μοντέλων παραλαμβανομένου παραμετρικών δυνατοτήτων και τομών
- (4) Ευχρηστία.

Παρατηρώντας τον πίνακα 2.2 είναι εμφανές ότι τα δημοφιλέστερα λογισμικά πακέτα προσφέρουν περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας σημείων, πολυγώνων, NURB καμπυλών και επιφανειών. Το Geomagic και το Rapidform υποστηρίζουν αυτόματη προσαρμογή επιφανειών. Η δημιουργία στερεού μοντέλου από δεδομένα σημεία σάρωσης μπορεί να επιτευχθεί δημιουργώντας σκίτσα ανά περιοχές από τα αντίστοιχα πλέγματα πολυγώνων, και ακολουθώντας τα ίδια βήματα δημιουργίας χαρακτηριστικών που συναντώνται στα CAD πακέτα. Σύμφωνα με την έρευνα που έγινε, το Rapidform είναι το μόνο λογισμικό που επιτρέπει την αυτόματη δημιουργία παραμετρικού μοντέλου. Επιλέχθηκαν να δοκιμασθούν τα Geomagic και Rapidform καθώς και δύο πακέτα CAD.



G=good, F=fair, P=poor, U=unknown, N=Not available	Geomagic Studio	Rapidform XOR3	SolidWorks	Wildfire	CATIA	Paraform	ICEM	Imageware	CopyCAD
General capabilities:									
Speed: How quickly can surface fitting be done?	G	G	P	P	F	G	F	G	G
Data/file size that the software can process	G	G	P	P	G	G	G	G	G
Screen refresh resolution	G	G	P	P	G	G	G	G	G
Output file format: transferred to other software	G	G	G	G	G	G	G	G	G
Recognition of geometry types (such as circles)	G	G	P	N	F	P	G	G	F
Generation of NURB models									
Auto Surfacing	G	G	P	N	N	N	N	N	N
Modification of points	G	G	P	P	G	G	G	G	G
Hole filling	G	G	G	P	G	G	G	G	G
Modification of spline curves	G	G	P	P	G	G	G	G	G
NURB surfaces deviation analysis	G	G	G	G	G	G	G	G	G
How complicated shapes can be generated?	G	G	F	P	G	G	G	G	G
Surface smoothness	G	G	F	F	G	G	G	G	G
Generation of solid models									
Parametric: Can parametric solid models be generated?	P	G	F	P	F	N	P	F	U
Section sketch	F	G	P	N	P	N	P	G	U
Dimensions and geometric constraints on sketch	P	F	P	N	U	N	U	U	U
Level of human interaction with the geometry required	F	G	P	P	P	N	U	F	U
Is the generated solid model easy to modify?	P	G	P	P	P	N	U	F	U
Parametric model export	P	G	P	P	P	N	U	U	U

Πίνακας 2.2 : Μια περίληψη από τα εμπορικά λογισμικά εργαλεία που δοκιμάστηκαν

## 2.19 Δοκιμές και Αξιολόγηση

Τα λογισμικά υποβλήθηκαν σε δύο δοκιμασίες, στην πρώτη εξετάστηκαν οι δυνατότητες τους για αυτόματη προσαρμογή επιφανειών ενώ στη δεύτερη για παραμετρική μοντελοποίηση στερεού. Αφού εξετάστηκαν τα περισσότερα σύγχρονα λογισμικά πακέτα (4.2) επιλέχθηκαν τέσσερα για δοκιμή και αξιολόγηση. Τα δύο είναι πακέτα που εξειδικεύονται στην αντίστροφη μηχανική, τα Geomagic Studio v.11 και Rapidform XOR3, ενώ τα άλλα δύο λογισμικά CAD (feature based), τα Pro/ENGINEER Wildfire v.4 και SolidWorks 2009.






	Surface Reconstruction	Parametric Modeling
Geomagic Studio v. 11	Shape Phase	Fashion Phase
Rapidform XOR3	Auto Surfacing	Solid/ Surface Primitives
SolidWorks 2009	Scan to 3D	Scan to 3D
Wildfire v. 4	Facet + Restyle	Not Available

Πίνακας 2.3 : Λογισμικά πακέτα που δοκιμάστηκαν

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.3, όλα τα λογισμικά πακέτα υποστηρίζουν την κατασκευή επιφανειών και στερών μοντέλων εκτός από το Wildfire που δεν υποστηρίζει παραμετρική μοντελοποίηση στερεού με δεδομένα από 3D σαρωτή.

Στην πρώτη δοκιμασία γίνεται εστίαση στην αυτόματη προσαρμογή επιφανειών και στη σταθερότητα των λογισμικών ενώ στη δεύτερη δοκιμασία στη δημιουργία παραμετρικού στερεού μοντέλου, στην αναγνώριση πρωτευόντων στοιχείων (όπως κύλινδροι, κώνοι κ.ο.κ), στην παραμετρική μοντελοποίηση και στην εξαγωγή του μοντέλου σε CAD λογισμικά.

Η επιλογή πέντε δοκιμών για την δοκιμή των λογισμικών έγινε όπως στον Πίνακα 2.4. Τα δύο δόθηκαν σαν πλέγμα πολυγώνων και τα άλλα τρία σαν νέφη σημείων. Αυτά τα πέντε δοκίμια αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο φάσμα πρακτικών εφαρμογών. Κομμάτια όπως η πλάκα, η σωλήνωση και η ασφάλεια θύρας είναι παραδοσιακά και σχετικά απλά στη γεωμετρία. Αντιθέτως, το δοκίμιο από φύλλο λαμαρίνας (Μοντέλο 3) είναι ένα δοκίμιο με πολλές καμπυλότητες ενώ η λάμα είναι ένα σχεδόν ακανόνιστο σχήμα.

	Model 1 <i>Block</i>	Model 2 <i>Tubing</i>	Model 3 <i>Sheetmetal</i>	Model 4 <i>Blade</i>	Model 5 <i>Door Lock</i>
Model Pictures					
Scanned data	634,957 points	589,693 polygons	134,089 polygons	252,895 points	207,282 points
Dimensions	5×3×0.5 (inch)	125×93×17 (mm)	16×10×9 (inch)	2×3×4 (inch)	7×3×2 (inch)

Πίνακας 2.4 : Επιλεγμένα παραδείγματα για έμπρακτη αξιολογήσεων

## 2.20 Δοκιμή 1<sup>η</sup> : Αυτόματη προσαρμογή επιφανειών





















Η πρώτη δοκιμασία αξιολόγησης έχει ως στόχο το κατά πόσο τα προγράμματα που αξιολογούνται είναι ικανά να κάνουν αυτόματη προσαρμογή επιφανειών. Δηλαδή να κατασκευάσουν αυτόματα αεροστεγή, ακριβή και υψηλής ποιότητας μοντέλα από τα δεδομένα σάρωσης. Έγινε εξέταση ως προς το επίπεδο αυτοματοποίησης εξετάσθηκε, τη σταθερότητα του λογισμικού και την ικανότητα επεξεργασίας γεωμετρικών οντοτήτων όπως σημεία, πλέγματα και NURB επιφάνειες.

Συμπερασματικά όλα τα πακέτα λογισμικού που αξιολογήθηκαν υποστηρίζουν προσαρμογή επιφανειών πλήρως ή σχεδόν πλήρως αυτοματοποιημένη. Στον Πίνακα 2.5 φαίνονται περιληπτικά τα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το Geomagic



είναι το μόνο λογισμικό που κατάφερε να δημιουργήσει αυτομάτως μοντέλα επιφανειών και για τα πέντε τεμάχια, χωρίς καμία παρέμβαση του χρήστη. Το Rapidform έρχεται αμέσως δεύτερο, ικανό να κατασκευάσει μοντέλα επιφανειών για τα 2 από τα 5 τεμάχια πλήρως αυτόματα ενώ για τα υπόλοιπα 3 χρειάστηκε μικρή παρέμβαση από το χρήστη.

Αντιθέτως, τα Solidworks και Wildfire κατάφεραν να αναγνωρίσουν και να φτιάξουν μοντέλα για μερικά μόνο από τα τεμάχια ακόμα και μετά από πολύωρη προσπάθεια. Επίσης, παρ' ότι χρειάστηκαν πάρα πολλή ώρα για να επεξεργαστούν κάποια από τα παραδείγματα, δεν πέτυχαν πάντα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα λογισμικά κράσαραν καθώς έκαναν τριγωννοποίηση ή προσαρμογή επιφανειών χωρίς να δώσουν κάποιο προειδοποιητικό μήνυμα. Το μέγεθος των δεδομένων από τη σάρωση ήταν ένα άλλο πρόβλημα καθώς τα Solidworks και Wildfire υποστηρίζουν αρχεία με κατά μέγιστο περίπου 300.000 σημεία. Τα λογισμικά γινόταν ασταθή ή κράσαραν όταν προσπαθούσαν να διαχειριστούν περισσότερα σημεία.

	Model 1 <i>Block</i>	Model 2 <i>Tubing</i>	Model 3 <i>Sheetmetal</i>	Model 4 <i>Blade</i>	Model 5 <i>Door Lock</i>
Geomagic Studio v.11	Completed (Automated) 	Completed (Automated) 	Completed (Automated) 	Completed (Automated) 	Completed (Automated) 
Rapidform XOR3	Completed (Automated) 	Completed (Partial-auto) 	Completed (Partial-auto) 	Completed (Partial-auto) 	Completed (Automated) 
SolidWorks 2009	Fail (Gaps remained, shown in red) 	Software crashed 	Fail (Gaps remained, shown in red) 	Completed (Automated) 	Software crashed 
Wildfire v.4	Software Crashed 	Software crashed 	Completed (Automated) 	Completed (Automated) 	Software crashed 

Πίνακα 2.5 : Αποτελέσματα για πρώτου γύρου αξιολογήσεων

Αξιοσημείωτο είναι ότι μόνο τα Geomagic και Rapidform προσφέρουν τη δυνατότητα μερισμού του πλέγματος. Η παραπάνω λειτουργία επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίσει ένα παράγοντα ευαισθησίας μεγέθους των μερισμένων περιοχών έτσι ώστε οι περιοχές να ταιριάζουν στα αντίστοιχα, συγκεκριμένα σημεία του αντικείμενου. Η λειτουργία αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη καθώς, οι σωστά μερισμένες περιοχές διευκολύνουν το ταίριασμα επιφανειών (surface fitting) και την αναγνώριση βασικών χαρακτηριστικών.

Τα αποτελέσματα δεν επιτρέπουν τη συζήτηση περεταίρω για τα Solidworks και Wildfire διότι ήδη στην πρώτη δοκιμασία αξιολόγησης οι επιδόσεις τους ήταν απογοητευτικές. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην επίδοση των Geomagic και Rapidform σε επιλεγμένες δοκιμασίες για να γίνει και η εξαγωγή των συμπερασμάτων που είναι επιθυμητά.

## 2.21 Geomagic Studio

Το Geomagic ενδεικνύεται για αναγνώριση και κατασκευή επιφανειών με υψηλό μάλιστα επίπεδο αυτοματισμού. Σύμφωνα με τις αξιολογήσεις που έγιναν και για τα πέντε δοκίμια δημιουργήθηκαν εξαιρετικά μοντέλα NURB-επιφανειών από τα αντίστοιχα δεδομένα σάρωσης σε λιγότερο από 30 λεπτά για το καθένα. Επιπροσθέτως, το Geomagic προσφέρει δυνατότητες επέμβασης στο χρήστη για την χειροκίνητη δημιουργία ή επεξεργασία γεωμετρικών οντοτήτων. Παραδείγματος χάριν, η λειτουργία "Point Phase" του Geomagic επιτρέπει στο χρήστη να επεξεργάζεται σημεία, να μειώνει το θόρυβο από τα δεδομένα, και να ορίσει τη δειγματοληψία ώστε να μειωθεί ο αριθμός των σημείων-δεδομένων. Μετά από τη διαδικασία επεξεργασίας σημείων, δημιουργούνται τα πλέγματα πολυγώνων χρησιμοποιώντας την εντολή "Wrap".

Στη φάση του πλέγματος δημιουργούνται αυτό-διατεμνόμενες και πολύ «ζαρωμένες» ακμές δηλαδή ακμές με οξείες γωνίες μεταξύ των κανονικών διανυσμάτων από πολλές γειτονικές όψεις, η λειτουργία Mesh Doctor μπορεί να αναγνωρίσει και να διορθώσει αυτόματα σημειακές προεξοχές και μικρές συστάδες πολυγώνων (ομάδες μικρών απομονωμένων πλεγμάτων πολυγώνων). Εργαλεία επεξεργασίας πλεγμάτων πολυγώνων επιτρέποντας την εξομάλυνση πλέγματος, τον προσδιορισμό οξείων ακμών, αποχαρκτηρισμό και το γέμισμα οπών. Έτσι γίνεται σημαντική βελτίωση στην ποιότητα τους. Μόλις εμφανιστεί ένα μοντέλο πλεγμάτων-πολυγώνων καλής ποιότητας χρησιμοποιείται η λειτουργία Shape Face (σχηματισμός επιφανειών) για να δημιουργηθούν NURB επιφάνειες βέλτιστα εφαπτόμενες στο πλέγμα πολυγώνων. Η λειτουργία Auto Surface αποτελείται από μία σειρά βημάτων ( Ανίχνευση περιγράμματος, κατασκευή μπαλωμάτων, πλεγμάτων και παρεμβολή επιφανειών) που τελικά δημιουργούν αυτόματα το μοντέλο επιφανειών. Πριν χρησιμοποιηθεί το Auto Surface πρέπει να καθοριστεί η ποιότητα του μοντέλου (πχ ορίζοντας την κατάλληλη ανοχή ) και τη μέθοδο (πχ με ή χωρίς μερισμό πλέγματος).

Για την πλάκα ορίστηκε ανοχή 0.01 ίντσες και κατασκευή μοντέλου NURB επιφανειών με αναγνώριση περιγραμμάτων (και μερισμό επιφανειών). Το τελικό NURB μοντέλο ήταν έτοιμο σε 5'. Η μέση απόκλιση του NURB μοντέλου ήταν 0.0 ίντσες και η τυπική απόκλιση 0.0003 ίντσες. Η απόκλιση ορίζεται ως η μικρότερη απόσταση μεταξύ του πλέγματος πολυγώνων και του αντίστοιχου μοντέλου NURB επιφανειών. Στο σχήμα 2.2, στην πράσινη περιοχή υπάρχει απόκλιση κοντά στο μηδέν ενώ στην κόκκινη υπάρχει στις μέγιστες αποκλίσεις που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι περίπου 0.017 ίντσες.



Σχήμα 2.22 : Αποτελέσματα του Geomagic στο δοκίμιο 'πλάκα'. (a) μοντέλο από το νέφος σημείων (634,957 σημεία) ,(b) πλέγμα πολυγώνων (1,271,924 τρίγωνα), (c) Μοντέλο NURB επιφανειών, (d) ανάλυση απόκλισης

Στα παρακάτω σχήματα 2.23 και σχήμα 2.24 παρουσιάζονται δυο ακόμα δοκιμές, η σωληνοκατασκευή και το μεταλλικό φύλλο. Αυτές οι δοκιμές απέδειξαν ότι το Geomagic

προσφέρει αξιόπιστη, ευέλικτη και εξαιρετικά αποτελεσματική αυτόματη μηχανική μορφή (Auto Surface).



Σχήμα 2.23 : Αποτελέσματα του Geomagic στο δοκίμιο 'σωληνοκατασκευή'. (a) πλέγμα πολυγώνων (589,693 τρίγωνα), (b) Μοντέλο NURB επιφανειών (1,107 patches), (c) ανάλυση απόκλισης



Σχήμα 2.24 : Αποτελέσματα από το παράδειγμα φύλλου μετάλλου (a) πλέγμα πολυγώνων (126,492 τρίγωνα), (b) Μοντέλο NURB επιφανειών (91 patches), (c) ανάλυση απόκλισης

## 2.22 Συμπεράσματα

Οι πιο εύχρηστες και εξελιγμένες λειτουργίες μηχανικής μορφής δεν προσφέρονται από λογισμικό CAD αλλά από εξειδικευμένα στην αντίστροφη μηχανική προγράμματα, όπως τη Geomagic, το Rapidform κ.τ.λ. Μερικά πακέτα CAD όπως τα SolidWorks, Pro/ENGINEER Wildfire και CATIA, παρέχουν περιορισμένες δυνατότητες μηχανικής μορφής καθιστώντας τη χρήση τους για αυτό το σκοπό, δύσκολη. Γενικά οι δυνατότητες των CAD λογισμικών είναι υποδιαίστερες των εξειδικευμένων αλγορίθμων της μηχανικής μορφών.

Μετά από εκτεταμένη έρευνα, δοκιμές και αξιολογήσεις (Chang & Chen 2010), επιλέχθηκαν ως καταλληλότερα λογισμικά για τις ανάγκες της εργασίας, τα Geomagic Studio v.11 και Rapidform XOR3. Αυτό αποφασίστηκε μετά από εκτενή χρήση τους και αξιολογώντας τα προσεκτικά με κριτήρια όπως auto surfacing, parametric and solid modeling, και ευχρηστία λογισμικού. Μεταξύ των δύο, το Geomagic υπερέχει ελαφρώς στις δυνατότητες επεξεργασίας γεωμετρικών entity χαρακτηριστικών/σημείων. Το Rapidform, υπερέχει στη δυνατότητα της στερεάς μοντελοποίησης (εκτός από την εξαιρετική Αυτόματη προσαρμογή επιφανειών) που έρχεται πέρα από το αρχικό ταίριασμα των επιφανειών. Το Rapidform προσφέρει βολικές σχεδιαστικές δυνατότητες που υποστηρίζουν σχεδιασμό βασισμένο σε χαρακτηριστικά. Σαν αποτέλεσμα, συχνά απαιτεί λιγότερη προσπάθεια γιατί κάποιος έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει αλληλεπιδραστικά το στερεό CAD μοντέλο λαμβάνοντας πληροφορίες όπως όρια, διατομές κτλ από το πολυγωνικό πλέγμα δουλεύοντας έτσι σε ένα περιβάλλον που

προσομοιώνει περισσότερο ένα πρόγραμμα CAD παρά ένα πρόγραμμα αντίστροφης μηχανικής.

Σε αυτό το σημείο γίνεται μια σύνοψη συμπερασμάτων για τις τεχνολογίες τρισδιάστατης μηχανικής μορφής και παραμετροποίησης του σχεδιασμού και τις επιδόσεις των λογισμικών πακέτων που εξετάστηκαν με πρακτικά παραδείγματα. Σύμφωνα με τις αξιολογήσεις, το Rapidform είναι η μόνη αποδεκτή επιλογή συνδυασμό παραμετρικής μοντελοποίησης στερεού και υποστήριξης 3D μηχανικής μορφής και παραμετροποίησης του σχεδιασμού. Το Rapidform προσφέρει δυνατότητες CAD για τη δημιουργία στερεών στοιχείων, δέντρων χαρακτηριστικών (feature tree) που δίνει την δυνατότητα για επιστροφή στο κατάλληλο επίπεδο/βάθος για επεξεργασία χαρακτηριστικών του μοντέλου. Επίσης, η λειτουργία liveTransfer™ δίνει την δυνατότητα εύκολης εξαγωγής του μοντέλου σε εμπορικά συστήματα CAD.

Μετά από έρευνα και ανάπτυξη δεκαετιών, η τεχνολογία 3D μηχανικής μορφής και παραμετροποίησης του σχεδιασμού είναι αρκετά ώριμη ώστε να υποστηρίζει γενικότερες εφαρμογές μηχανικής. Το ιδανικό σενάριο, η χρήση δηλαδή λογισμικού όπως το Rapidform για μηχανική μορφής και παραμετροποίηση, με αυτοματοποίηση των κοπιαστικών διαδικασιών όπως η διαχείριση νεφών σημείων, η τριγωνοποίηση κ.ο.κ είναι πια πραγματικότητα. Οι τάσεις σχεδιασμού (design intents) μπορούν να ανακτηθούν διαδραστικά όπως είναι επιθυμητό. Εκείνο που χρειάζεται βελτίωση είναι η ενσωμάτωση περισσότερων ειδών μοντέλων CAD στην εξαγωγή του μοντέλου. Μεγάλα πακέτα λογισμικού CAD, όπως το SolidWorks και το NX υποστηρίζονται επαρκώς, όμως, λογισμικά όπως το CATIA πρέπει επίσης να υποστηρίζονται και λογισμικά όπως το Wildfire.



### 3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΦΟΥΣ ΣΗΜΕΙΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η αναλυτική παρουσίαση πλήθους εντολών σχετικές με την επεξεργασία τρισδιάστατων σαρωμένων δεδομένων γνωστά ως νέφοι σημείων (Point Cloud). Για την παρουσίαση αυτή επιλέχθηκε η χρήση του λογισμικού Geomagic Studio v.2012 καθώς αποτελεί μια από τις καλύτερες επιλογές για την μετατροπή των νέφων σημείων σε μοντέλα επιφάνειας και μοντέλα CAD. Εκτός από την ακριβή 3D λειτουργία επεξεργασίας δεδομένων του , το Geomagic Studio ενσωματώνει απίστευτα αυτοματοποιημένα εργαλεία , τα οποία επιτρέπουν στους χρήστες να παράγουν τα υψηλότερα πρότυπα ποιότητας σε πολύ λιγότερο χρόνο ενώ ταυτοχρόνως μπορεί να μειώσει τις δαπανηρές εργατοώρες. Για την αντίστροφη μηχανική , τα σχέδια των προϊόντων , την ταχεία προτυποποίηση , την ανάλυση και την εξαγωγή CAD το Geomagic Studio είναι το εργαλείο δημιουργίας.



Σχήμα 3.1 : Λογότυπο λογισμικού Geomagic Studio

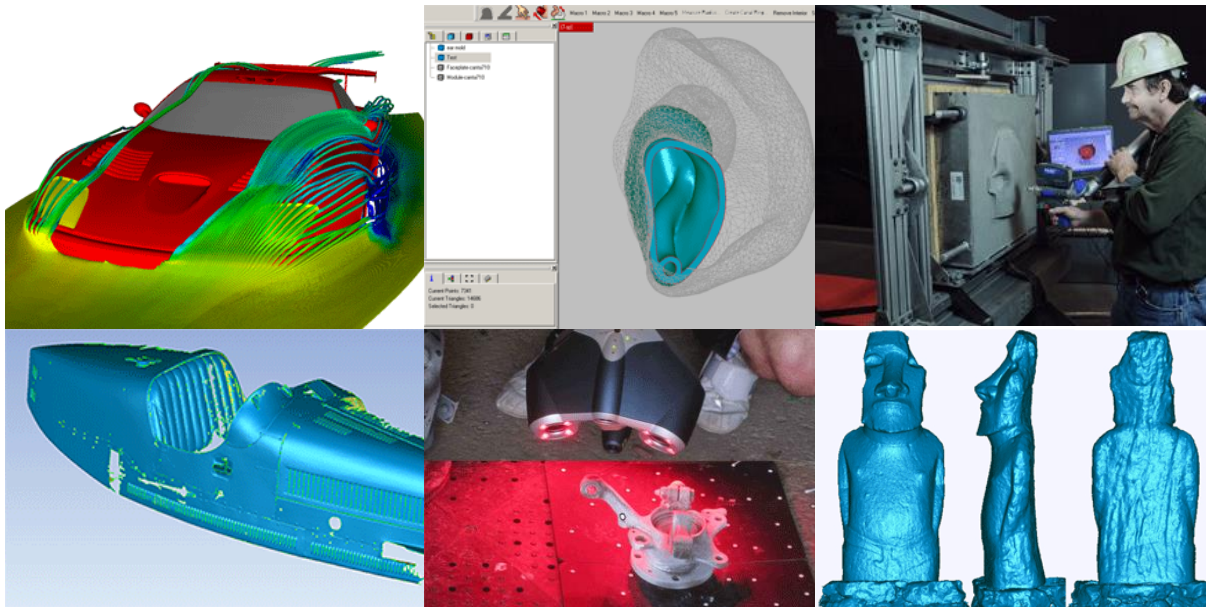
Το Geomagic Studio συνοδεύεται με ένα μεγάλο πλήθος εφορμογών που παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω όπως στην :

- **Αυτοκινητοβιομηχανία**, από την αντίστροφη μηχανική παλαιών ανταλλακτικών έως τις δοκιμές αεροδυναμικής παρέχει σημαντικά εργαλεία για την ανάπτυξη νέων οχημάτων και την μετασκευή ή των επανεξοπλισμό παλαιότερων
- **Αεροναυπηγική**, η μεγάλη ακρίβεια, η ταχύτητα αποτελούν βασικές αρχές για τους σχεδιαστές της αεροδιαστημικής, τους κατασκευαστές και τους τεχνικούς οι οποίες μπορούν εφαρμοστούν με την δημιουργία ψηφιακών μοντέλων.
- **Εξοπλισμό της βαρίας βιομηχανίας**, διάφορα εξαρτήματα, εργαλεία, καλούπια και μήτρες μπορούν να μεταφερθούν σε τρισδιάστατα ψηφιακά μοντέλα για τον επανασχεδιασμό τους, την βελτίωση της ακρίβειας τους και πλήθος δοκιμών.
- **Ιατρικών μηχανημάτων και εξοπλισμού**, υποστηρίζοντας την διαδικασία της δημιουργίας πρόσθετων άκρων, εμφυτευμάτων και αντικατάσταση αρθρώσεων καθυστά δυνατή την αύξηση της ποιότητας, την τέλεια εφαρμογή αλλά ακόμα και την μείωση του μετεχειριντικού πόνου.
- **Ανάπτυξη νέων Προϊόντων και Αντιγράφων Πολιτισμικής Κληρονομιάς**, μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές για την διάσωση και την προσεκτική διαχείριση αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς είναι η τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση τους.

Μερικά απο τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Geomagic Studio παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω :

- Υποστήριξη για ένα ευρύ φάσμα μη - επαφής σαρωτών και επαφών.
- Αυτοματοποιημένη διαδικασία εκαθάρισης δεδομένων νέφους σημείων , την ανάλυση του πλέγματος και την επισκευή του και περισσότερα
- Βελτιστοποιημένη για γρήγορη επεξεργασία των δεδομένων και την ικανότητα να χειριστεί αποτελεσματικά μεγάλα , πυκνά σύννεφα σημείο
- Απλοποιημένο τρισδιάστα σύστημα συντεταγμένων για εύκολη ευθυγράμμιση των δεδομένων

- Βελτιωμένο περιβάλλον εργασίας που επιτρέπει την προσαργή των ροών εργασίας ανάλογα με την επιθυμία του χρήστη
- Γραμμή εντολών με παροχή μιας υπολογιστικής και γραφικής διεπαφής του χρήστη , επιτρέποντάς την εξοικονόμηση χρόνου και μνήμης
- Εξαγωγή υψηλής ποιότητας τρισδιάστατων δεδομένων σε όλες τις πολυγωνικές και NURBS μορφές
- Ευρύ φάσμα του υλικού plug- ins και υποστηριζόμενες μορφές αρχείων , όπως , STL , OBJ , VRML , DXF , PLY και 3DS
- Άμεση εξαγωγή των μοντέλων βασισμένων στο ιστορικό σε μηχανολογικά λογισμικά πακέτα CAD , συμπεριλαμβανομένων Autodesk Inventor ® , CREO ® Elements / Pro ™ , CATIA ® και SolidWorks ®

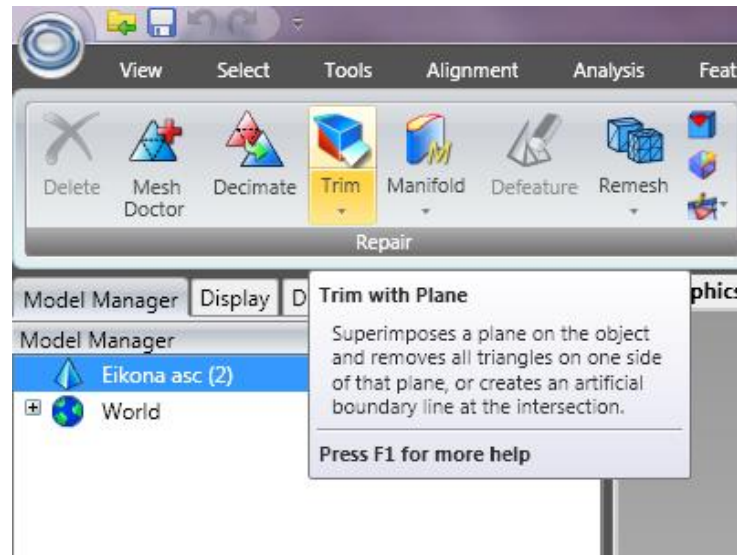


Σχήμα 3.2 : Πλήθος εφαρμογών της χρήσης του λογισμικού Geomagic Studio

### 3.1 Απότμηση του νέφους σημείων (Trim)

Η Απότμηση ενός τμήματος του νέφους σημείων μπορεί να περιγραφεί εύκολα από τα εξής βήματα παρακάτω:

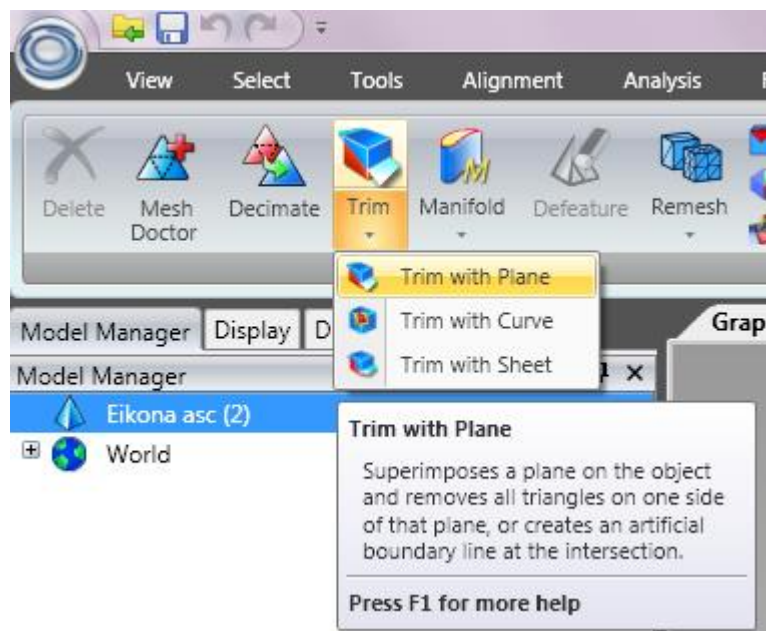
- Βήμα 1<sup>ο</sup>: Η εντολή “Trim” βρίσκεται στην ομάδα εντολών “Polygons” και βρίσκει εφαρμογή σε ένα πλήθος περιπτώσεων.



Σχήμα 3.3 : Επιλογή της εντολής “Trim”

Υπάρχουν 3 διαφορετικές υποεντολές που συνθέτουν την εντολή “Trim”, και αυτές είναι:

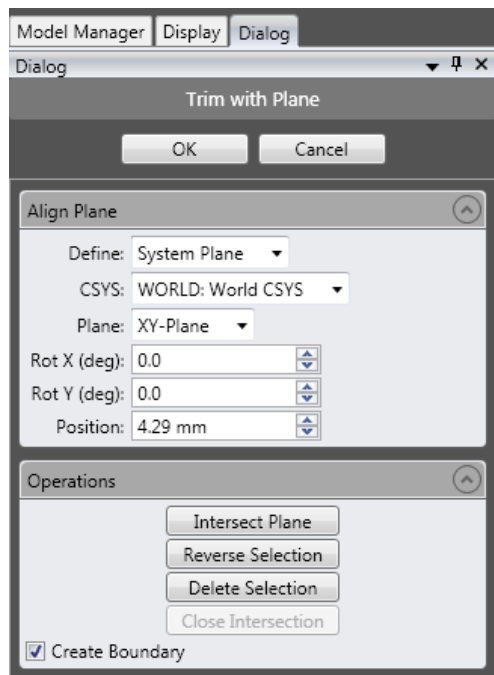
**A.** “Trim with Plane” η οποία επιλέγει τμήμα του αντικειμένου βάσει των επιπέδων που υπάρχουν ( Datum Planes) και γίνεται η απότμηση βάσει εκείνων.



Σχήμα 3.4 : Απεικόνιση των τριών υποεντολών της εντολής “Trim”

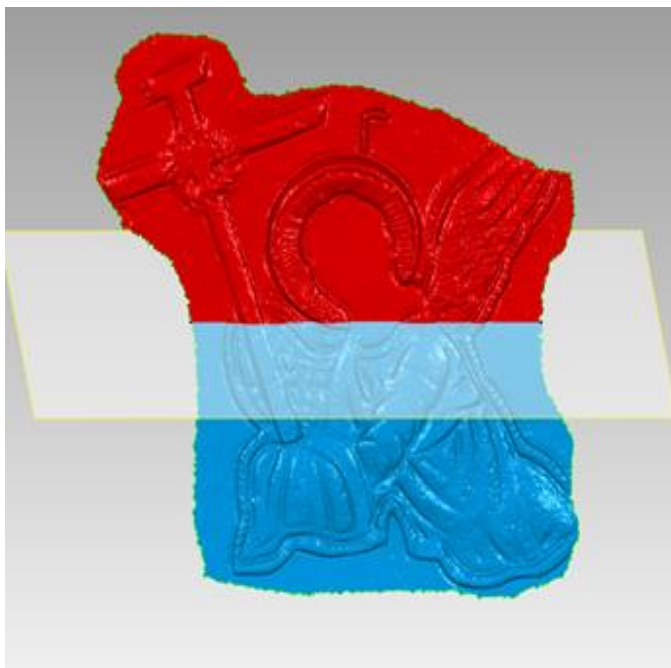
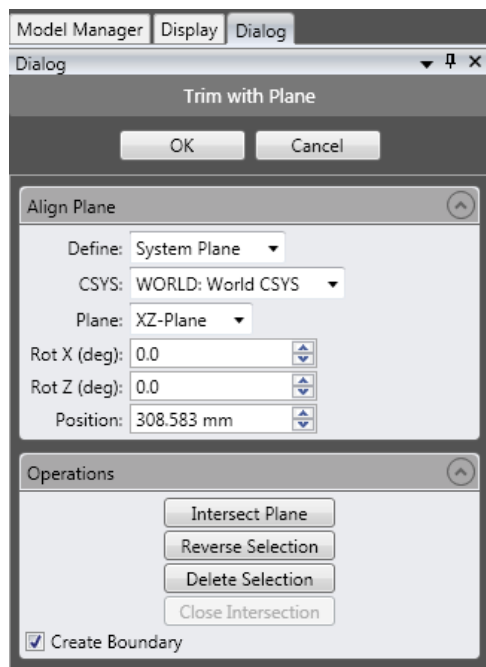
Αυτό γίνεται με τους εξής τρόπους:

- Στο επίπεδο XY:



Σχήμα 3.5 : Απότημηση στο επίπεδο XY και παράθυρο ρυθμίσεων της εντολής “Trim”

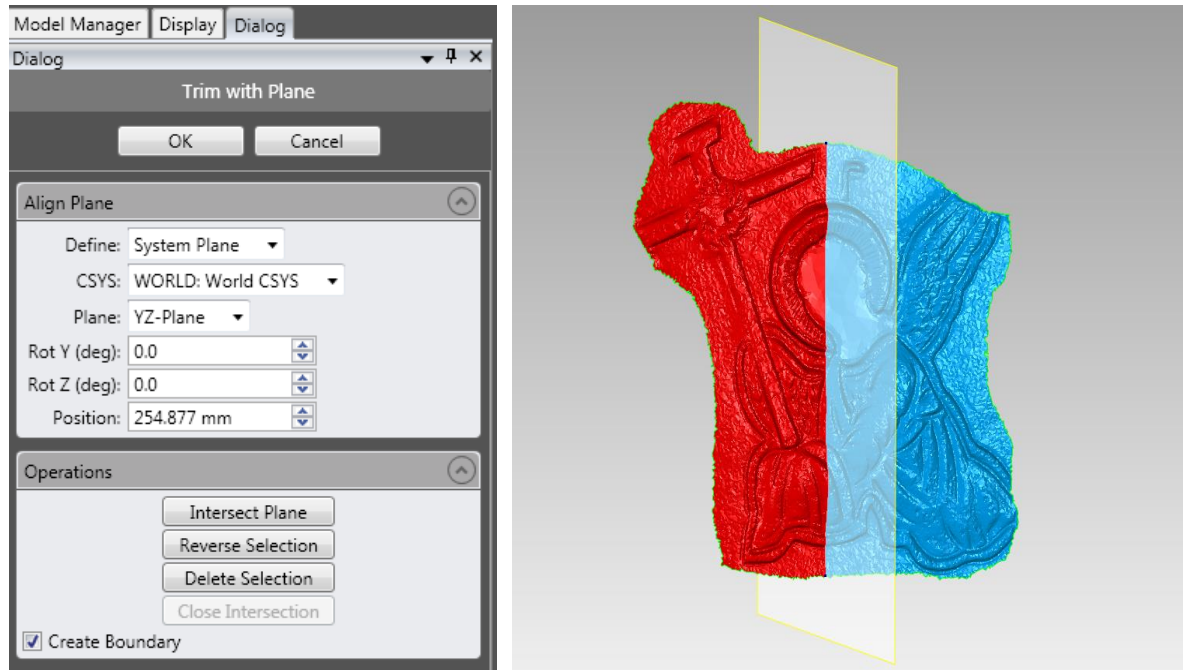
- Στο επίπεδο XZ:



Σχήμα 3.6 : Απότημηση στο επίπεδο XZ και παράθυρο ρυθμίσεων της εντολής “Trim”



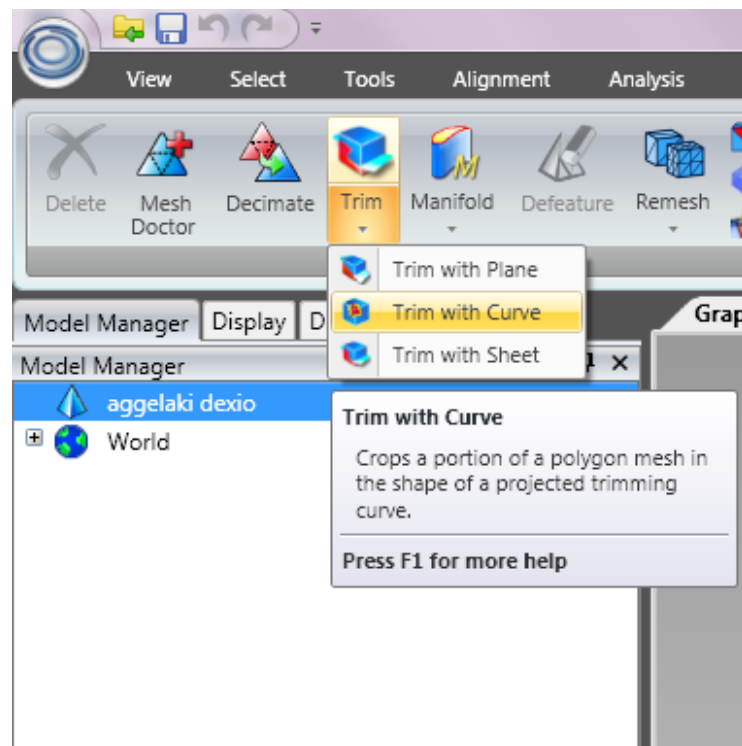
- Στο επίπεδο YZ :



Σχήμα 3.7 : Απότμηση στο επίπεδο YZ και παράθυρο ρυθμίσεων της εντολής “Trim”

Έχοντας επιλεγμένη την εντολή “Create Boundary” θα δημιουργηθεί μια γραμμή συνόρων στην περιοχή που θα τμήσει ενώ αλλιώς δεν θα δημιουργηθούν σύνορα.

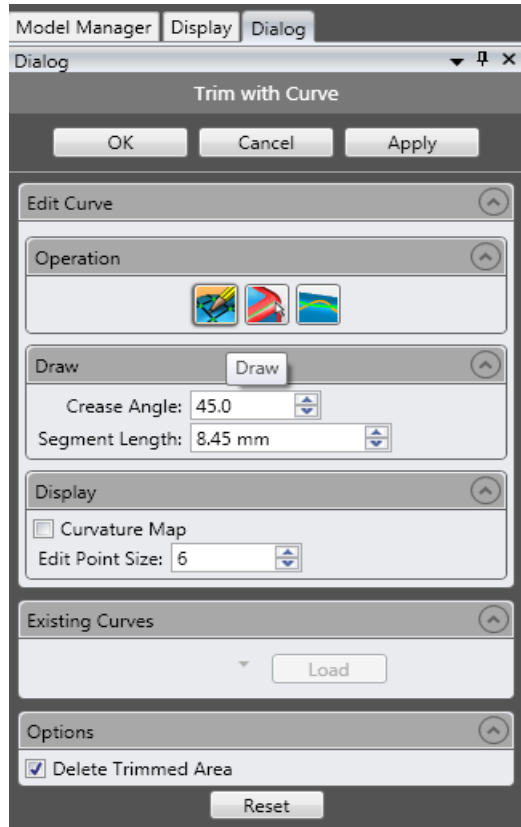
**Β.** “Tim with Curve”, αυτή η επιλογή θα τμήσει ένα τμήμα του πολυγωνικού αντικειμένου χρησιμοποιώντας μία καμπύλη κοπής.



Σχήμα 3.8 : Απεικόνιση της υποεντολής “Trim with Curve: της εντολής “Trim

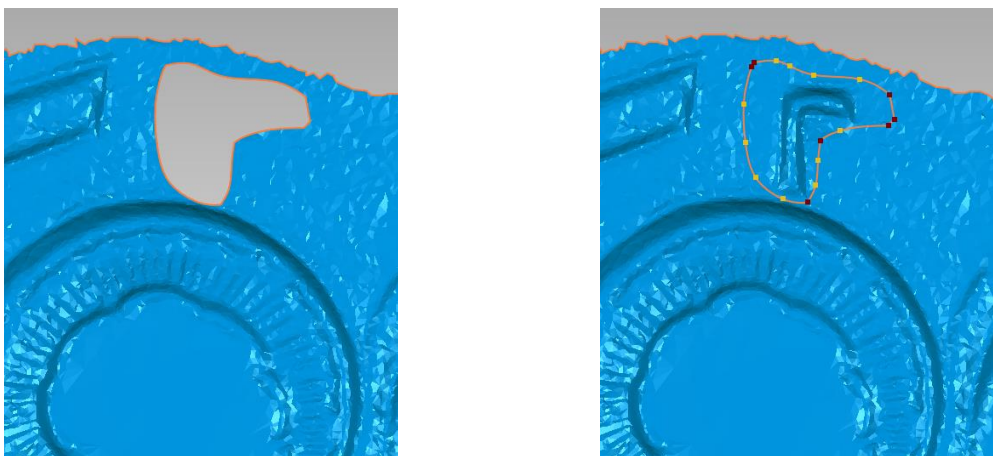
Υπάρχουν 3 διαφορετικές λειτουργίες για την συγκεκριμένη εντολή:

1. Η πρώτη είναι το “Draw” με την οποία επιτρέπεται η χειροκίνητη κατασκευή της καμπύλης κοπής. Αυτό γίνεται εφικτό δημιουργώντας μια σειρά από σημεία τα οποία ενώνονται με την καμπύλη αυτόματα. Βασική προϋπόθεση για να επιτεφχει η κοπή είναι η καμπύλη που δημιουργείται να είναι κλειστή.



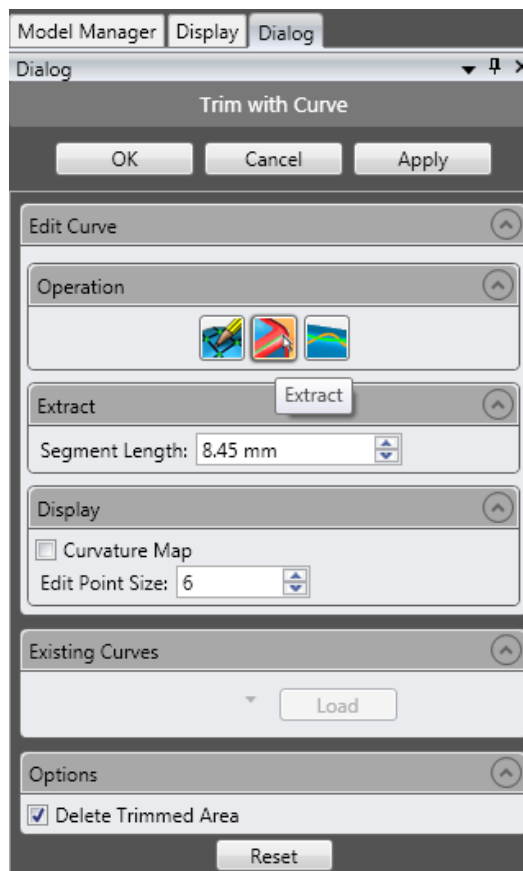
Σχήμα 3.9 : Επιλογή της υποεντολής “Draw” της εντολής “Trim”

Έχοντας επιλεγμένη την εντολή “Delete Trimmed Area” και πατώντας “Apply” γίνεται η κοπή ακριβώς πάνω στην καμπύλη που σχεδιάστηκε.



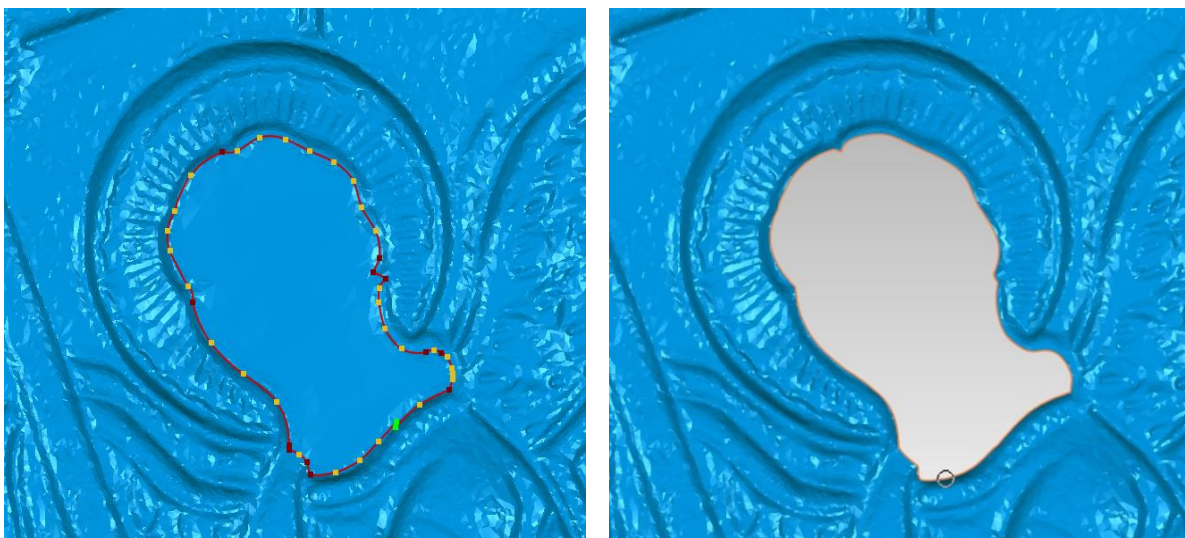
Σχήμα 3.10 : Απότμηση τμήματος του νέφους σημείων χρησιμοποιώντας της υποεντολή “Draw”

2. Η δεύτερη λειτουργία είναι η “Extract” με την οποία θα δημιουργηθεί αυτόματα η καμπύλη κοπής από τις καμπύλες του πλέγματος του αντικειμένου που βρίσκονται κοντά στην περιοχή που έγινε “click”.



Σχήμα 3.11 : Επιλογή της υποεντολής “Extract” της εντολής “Trim”

Πατώντας ξανά “Apply” και έχοντας επιλέξει να διαγραφεί το επιθυμητό τμήμα με την χρήση της επιλογής “Delete Trimmed Area” γίνεται η κοπή πάνω ακριβώς στην καμπύλη που σχεδιάστηκε.

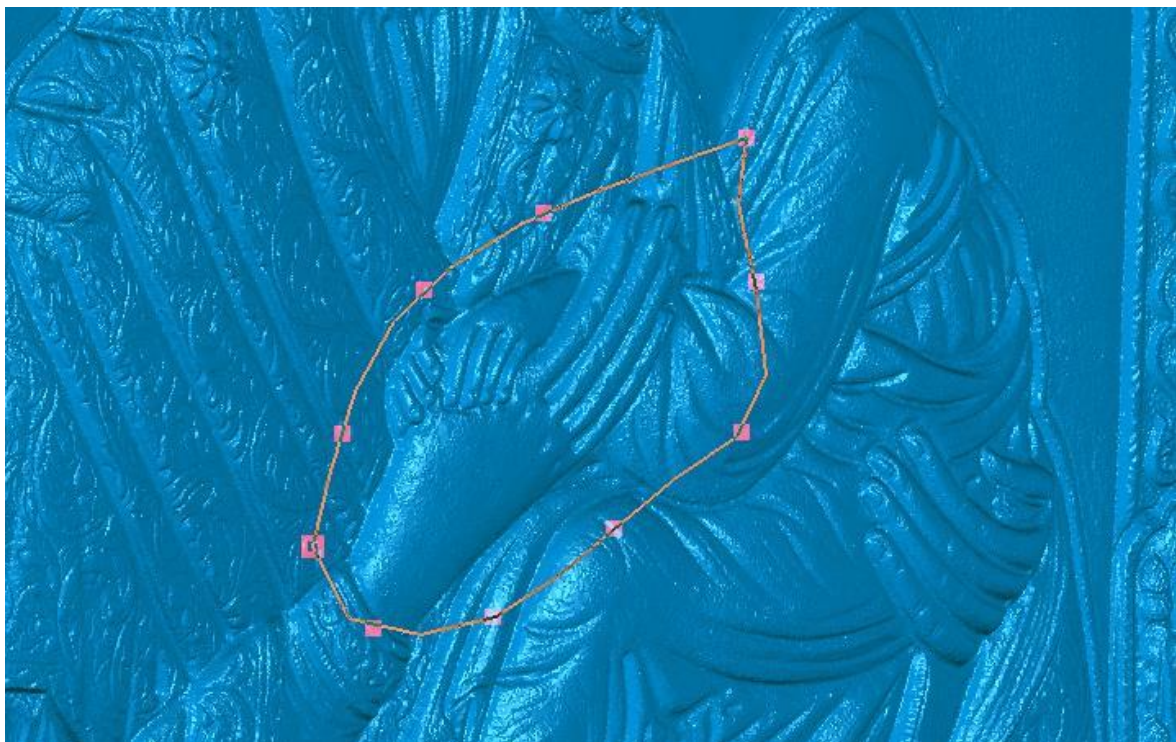


Σχήμα 3.12 : Απότμηση τμήματος του νέφους σημείων χρησιμοποιώντας της υποεντολή: “Extract”

Γ. “Trim with Sheet”, αυτή η επιλογή θα τμήσει ένα τμήμα του πολυγωνικού αντικειμένου χρησιμοποιώντας μία τρισδιάστατη προκαθορισμένη επιφάνεια που σχεδιάζεται σε καμπύλη και προβάλεται πάνω στο πολυγωνικό πλέγμα.



Σχήμα 3.13 : Απεικόνιση της υποεντολής “Trim with Sheet: της εντολής “Trim



Σχήμα 3.14 : Απεικόνιση της δημιουργίας της καμπύλης στον χώρο

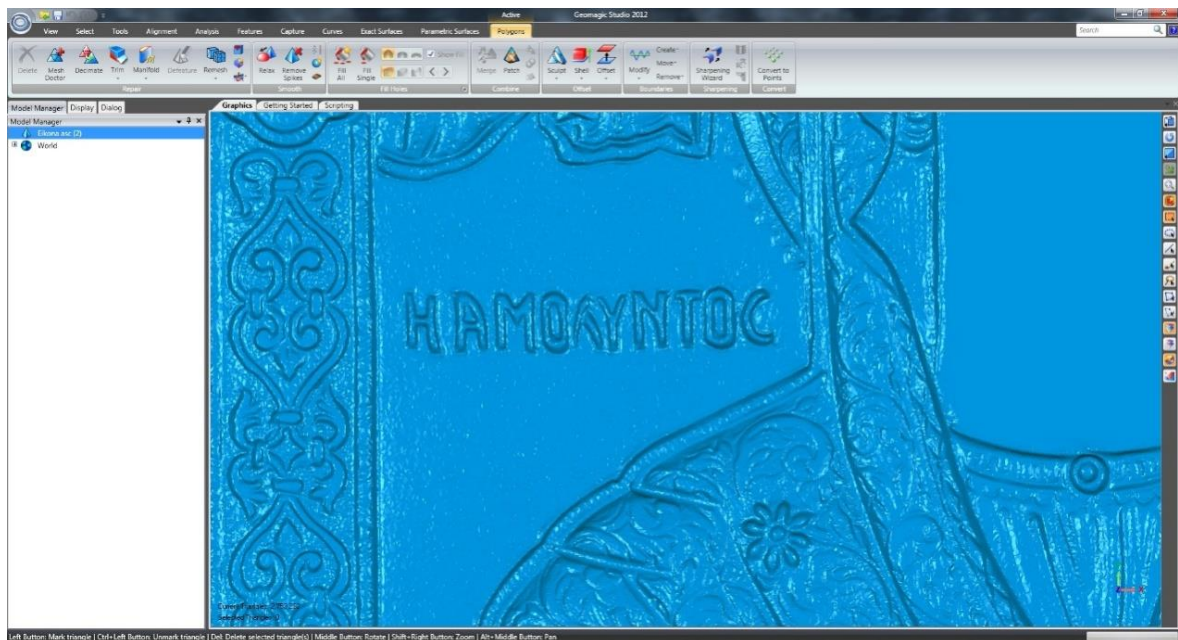




Σχήμα 3.15 : Προβολή της τρισδιάστατης καθορισμένης επιφάνειας πάνω στο πλέγμα

### 3.2 Δημιουργία και επικόλληση νέου κομματιού

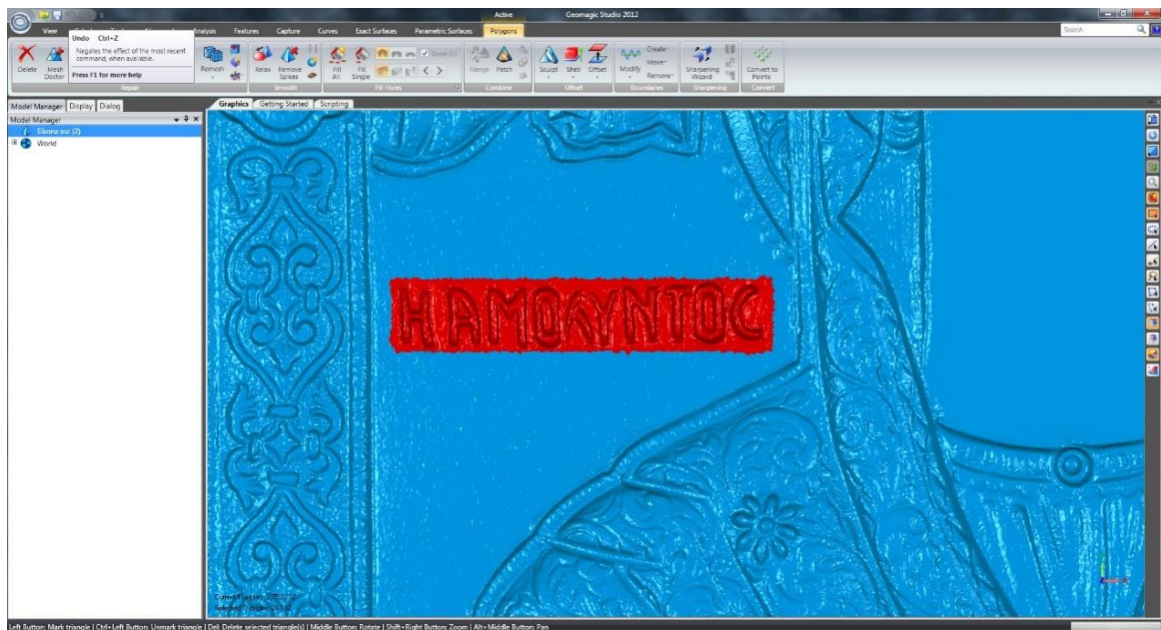
- Βήμα 1<sup>ο</sup>: Γίνετε η προσαρμογή της εικόνας στο τμήμα που θα επιλεγεί.



Σχήμα 3.16 : Προσαρμογή του τμήματος του νέφους σημείων που θα αντιγραφθεί

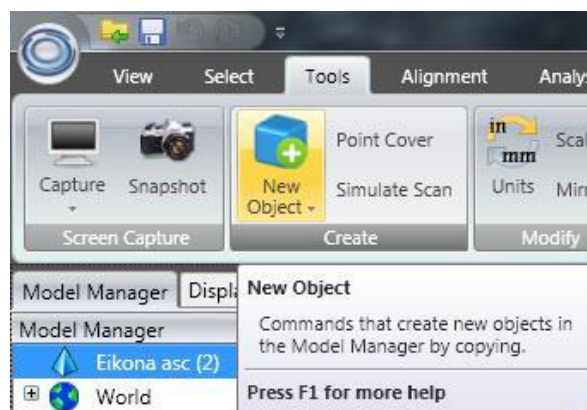
- Βήμα 2<sup>ο</sup>: Η επιλογή του τμήματος που είναι για μετακίνηση η αντιγραφή μπορεί να γίνει με την χρήση των "Selection Tools".





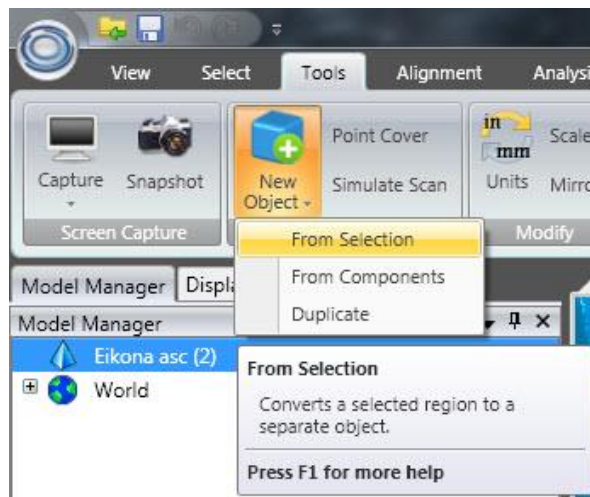
Σχήμα 3.17 : Επιλογή το τμήματος του νέφους σημείων που θα αντιγραφθεί με χρήση παραλληλογράμμου

- Βήμα 3<sup>ο</sup>: Στην γραμμή εντολών βρίσκετε η κατηγορία “Tools” από την οποία γίνεται η επιλογή της εντολής “New Object” απο την οποία θα γίνει η δημιουργία του νέου κομματιού.



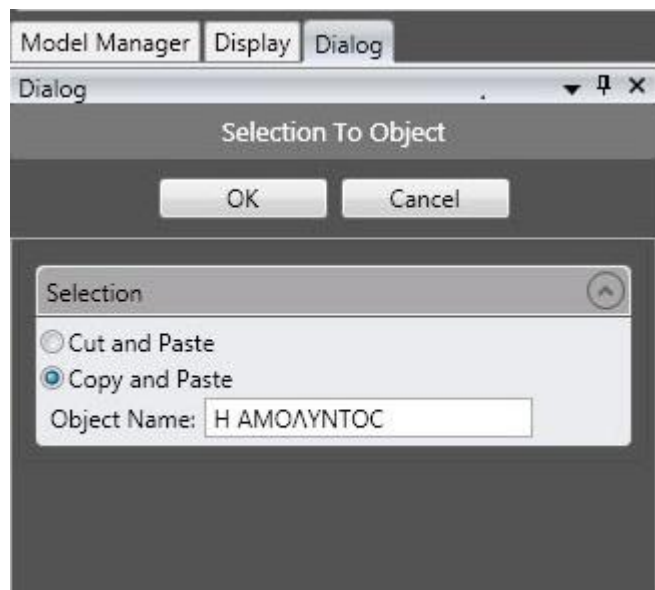
Σχήμα 3.18 : Επιλογή της εντολής “New Object” για την δημιουργία του νέου τμήματος

- Βήμα 4<sup>ο</sup>: Γίνεται η επιλογή της εντολής “From Selection” για να γίνει η δημιουργία από την επιλεγθείσα περιοχή.



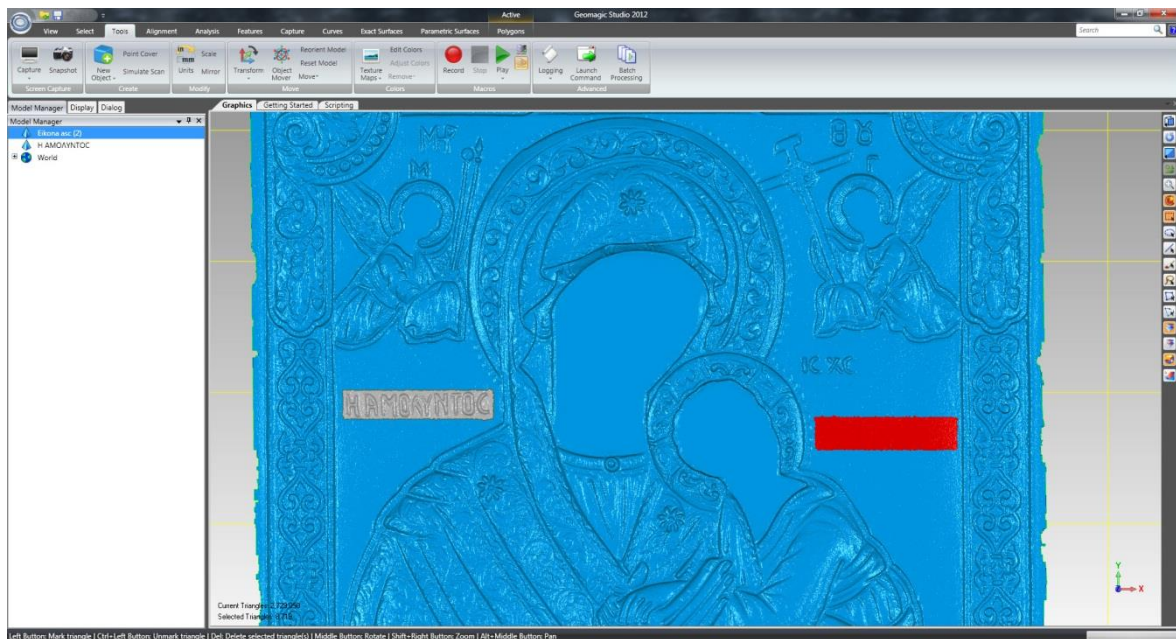
Σχήμα 3.19 : Επιλογή της εντολής “New Object” χρησιμοποιώντας την “From Selection” υποεντολή

- Βήμα 5<sup>ο</sup>: Στο στάδιο αυτό μπορεί να γίνει η επιλογή ανάμεσα στην αντιγραφή ή απλά στην αποκοπή του νέου τμήματος που δημιουργείται καθώς επίσης και η μετονομασία του.



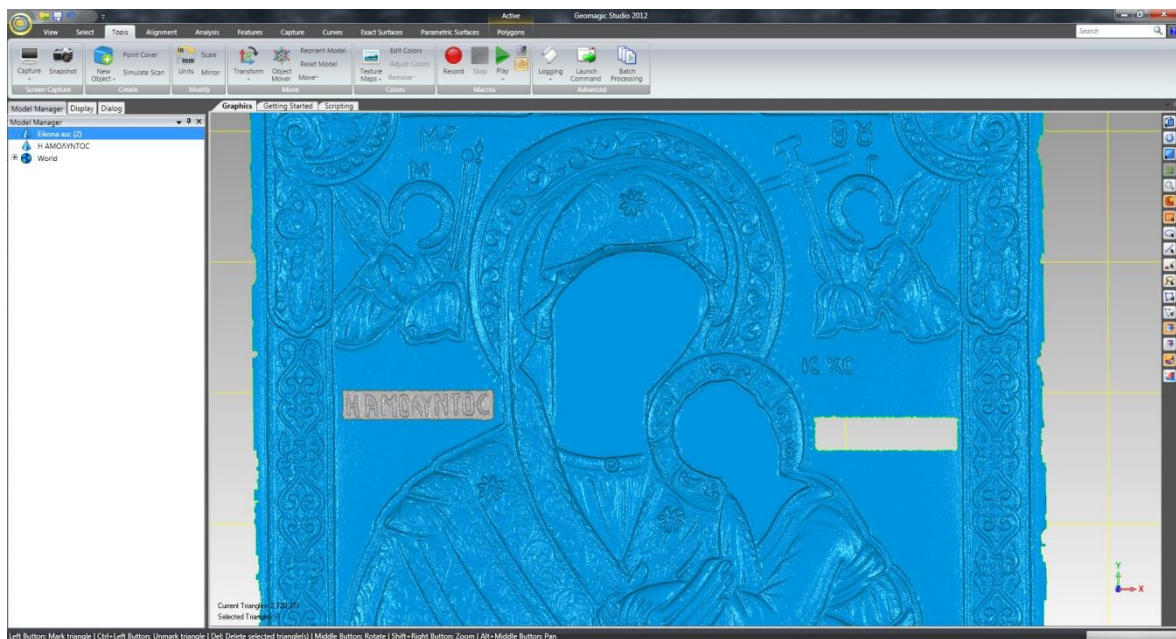
Σχήμα 3.20 : Επιλογή ανάμεσα στην Αντιγραφή ή απλώς στην Αποκοπή του νέου αντικειμένου

- Βήμα 6<sup>ο</sup>: Σε αυτό το σημείο γίνεται μόνο η επεξεργασία του νέου κομματιού που δημιουργήθηκε και όλο το υπόλοιπο τμήμα «νεκρώνει».



Σχήμα 3.21 : Επιλογή του τμήματος που θα γίνει η Επικόλληση

- Βήμα 7<sup>ο</sup>: Στο στάδιο αυτό για περισσότερη ευκολία γίνεται η διαγραφή του τμήματος που περίπου θα γίνει η επικόλληση επιλέγοντας το και στην συνέχεια πατώντας το πλήκτρο “Delete” .

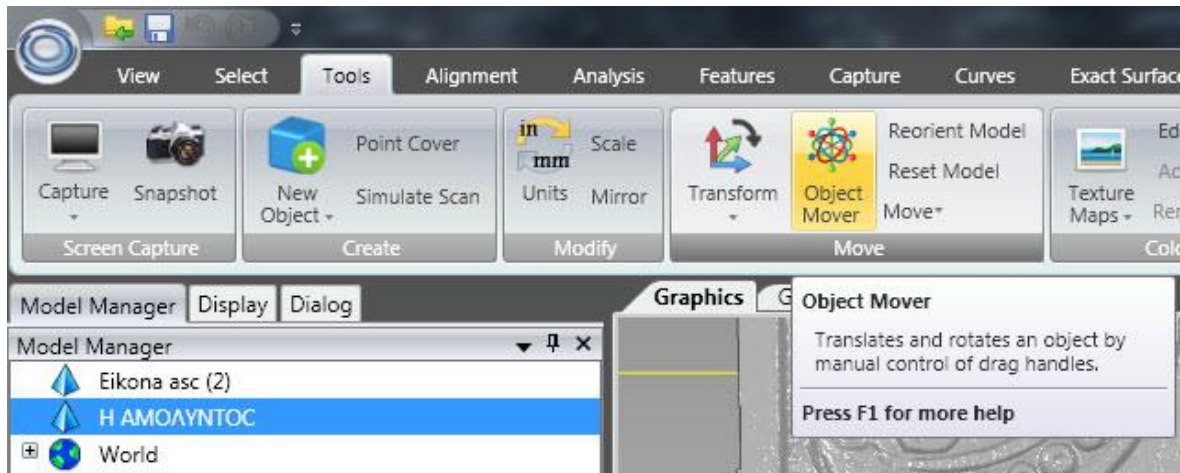


Σχήμα 3.22 : Διαγραφή του επιλεγμένου τμήματος που θα γίνει η Επικόλληση

Αφού γίνει η διαγραφή του τμήματος το νέο αντικείμενο είναι έτοιμο για την μετακίνηση.

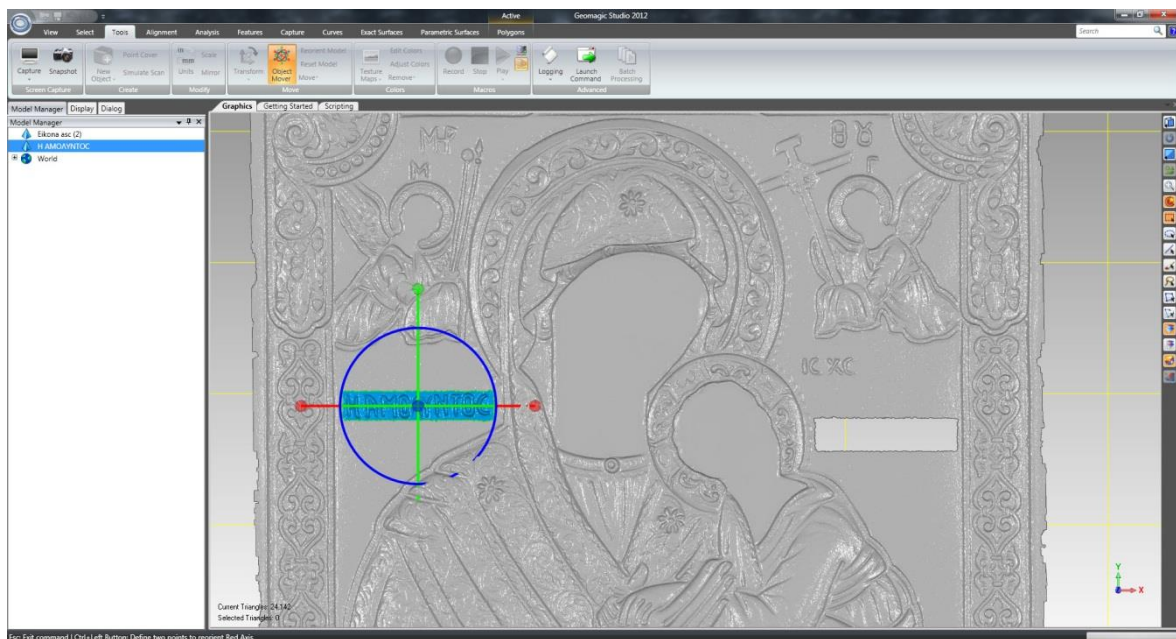


- Βήμα 8<sup>ο</sup>: Στη ομάδα εντολών “Tools” γίνεται η επιλογή της εντολής “Object Mover” με την οποία θα γίνει η μετακίνηση του αντικειμένου.



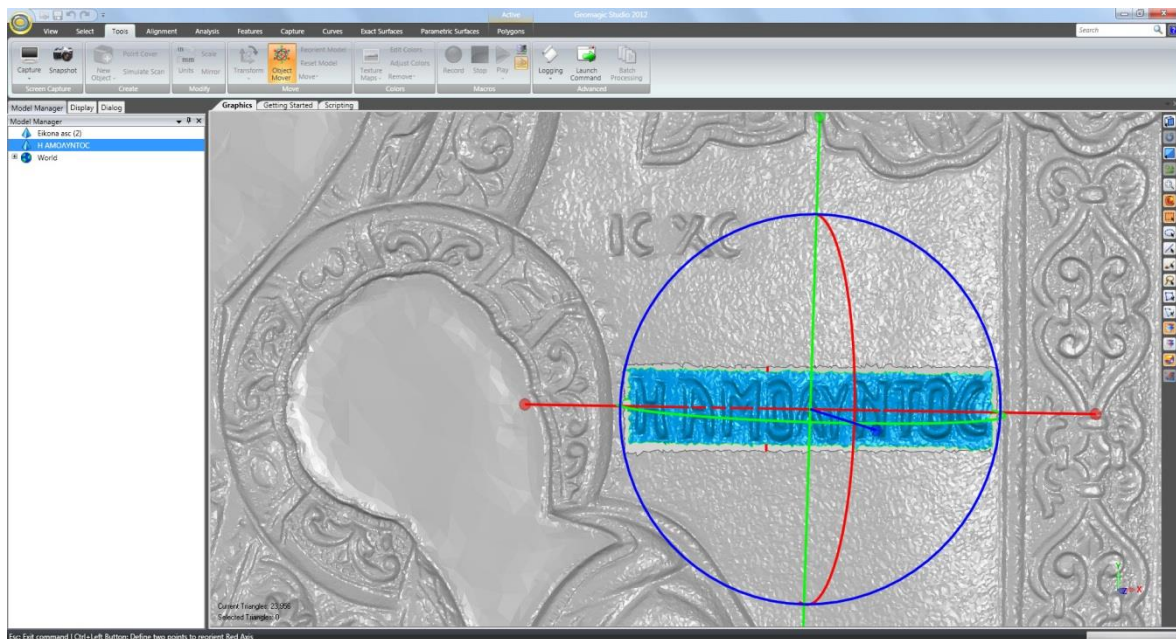
Σχήμα 3.23 : Επιλογή της εντολής “Object Mover” με την οποία θα γίνει η μετακίνηση του νέου τμήματος

- Βήμα 9<sup>ο</sup>: Χρησιμοποιώντας την εντολή αυτή εμφανίζονται οι τρεις άξονες X,Y,Z με τους οποίους μπορεί να γίνει η μετακίνηση αλλά και η περιστροφή γύρω από αυτούς σε όλο τον χώρο.



Σχήμα 3.24 : Χρήση της εντολής “Object Mover” με την οποία θα γίνει η μετακίνηση

- Βήμα 10<sup>ο</sup>: κάνοντας χρήση αυτών των αξόνων γίνεται η τοποθέτηση του νέου τμήματος στην περιοχή που είναι επιθυμητή.



Σχήμα 3.25 : Ρύθμιση λεπτομερειών της εντολής “Object Mover” με την οποία θα γίνει η μετακίνηση

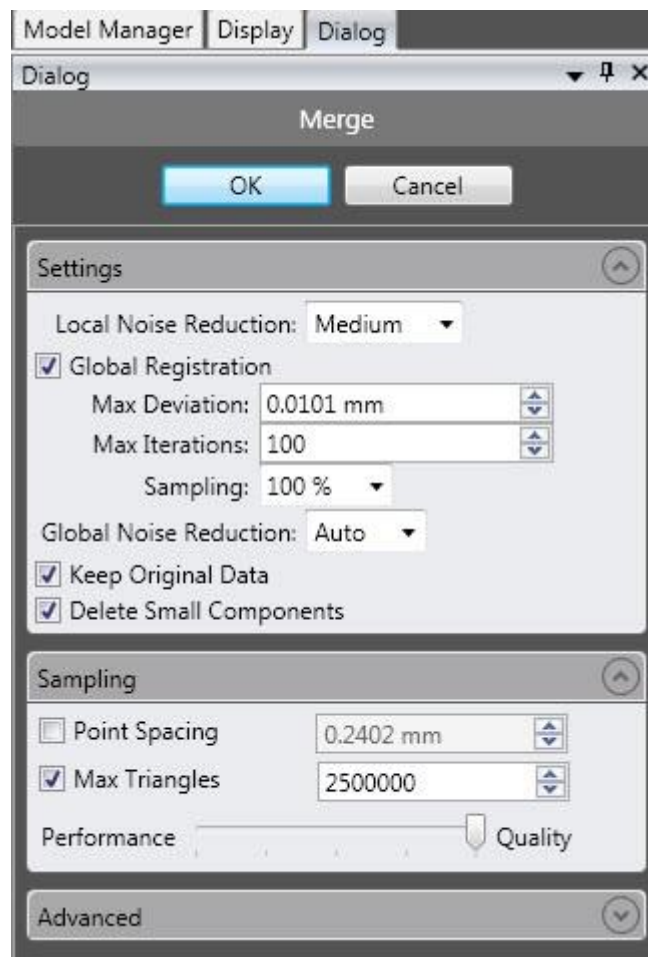
- Βήμα 11<sup>ο</sup>: Στην ομάδα εντολών “Polygons” γίνεται χρήση της εντολής “Merge” η οποία είναι εκείνη που θα ενώσει τα δύο τμήματα, το παλιό και το κομμάτι που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 3.26 : Επιλογή της εντολής “Merge” βάσει της οποίας θα γίνει η ένωση

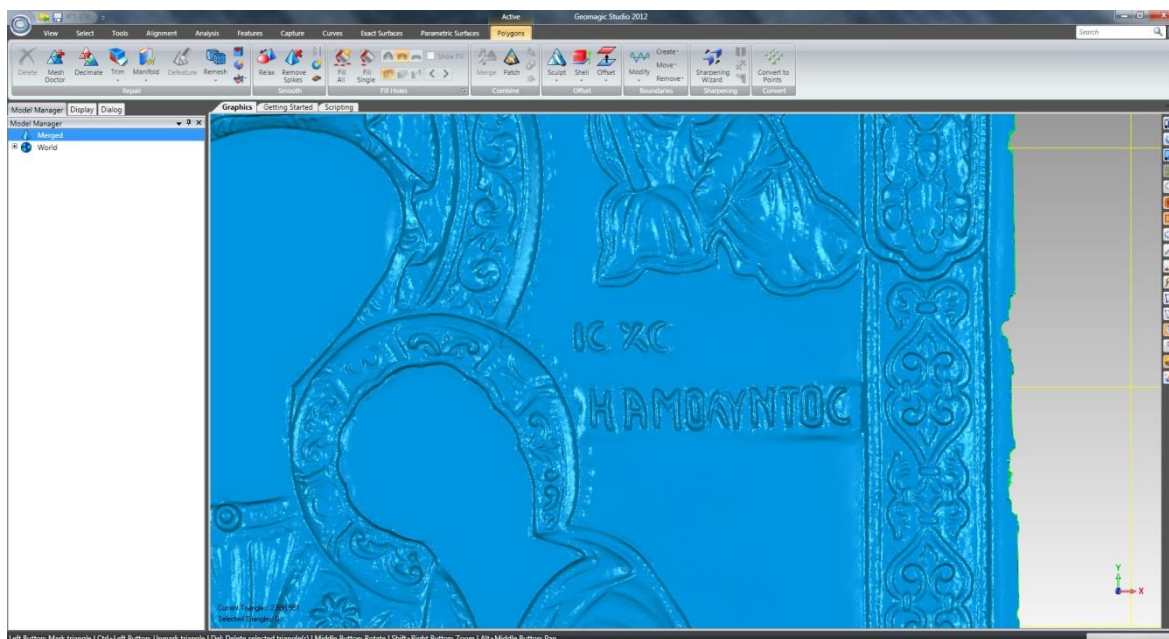
- Βήμα 12<sup>ο</sup>: Στο παράθυρο διαλόγων εμφανίζεται ένα πλήθος επιλογών και ρυθμίσεων που αφορούν την ένωση των δύο κομματιών.





Σχήμα 3.27 : Παράθυρο ρυθμίσεων για την ένωση των δύο τμημάτων

- Βήμα 13<sup>ο</sup>: Πατώντας “Ok” το νέο κομμάτι ενώνεται με το παλιό και δημιουργείται ένα συνολικό το οποίο έχει το όνομα “Merged”.

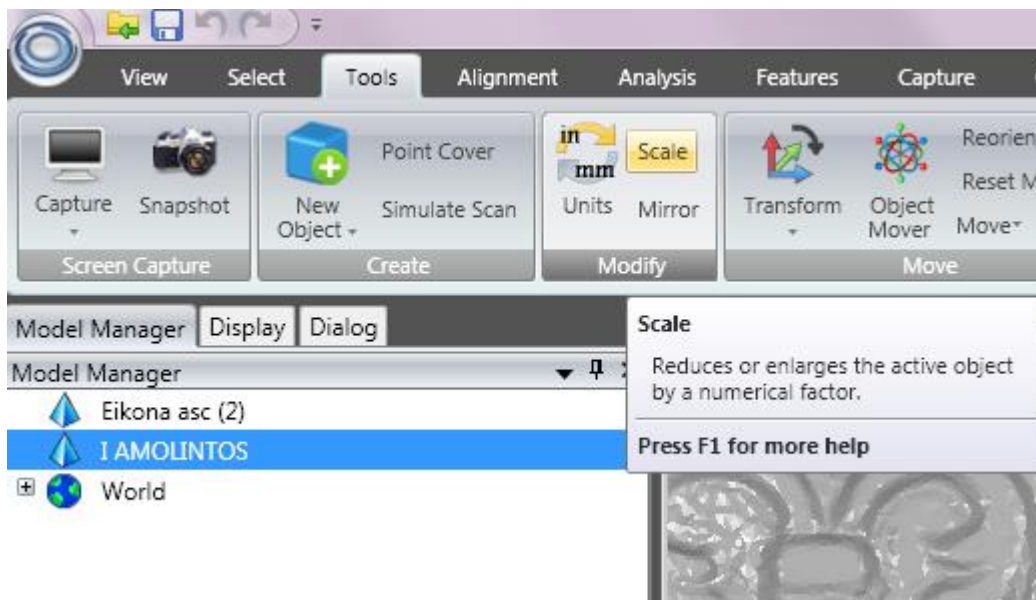


Σχήμα 3.28 : Απεικόνιση του τοποθετημένου τμήματος στην αρχική εικόνα

### 3.3 Κλιμάκωση (SCALE)

Για την κλιμάκωση ενός αντικειμένου δηλαδή ενός τμήματος που έχει δημιουργηθεί σε καινούργιο αντικείμενο, μπορεί γίνει η μετάβαση στο Βήμα 6<sup>ο</sup> της ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΛΛΗΣΗ ΝΕΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ.

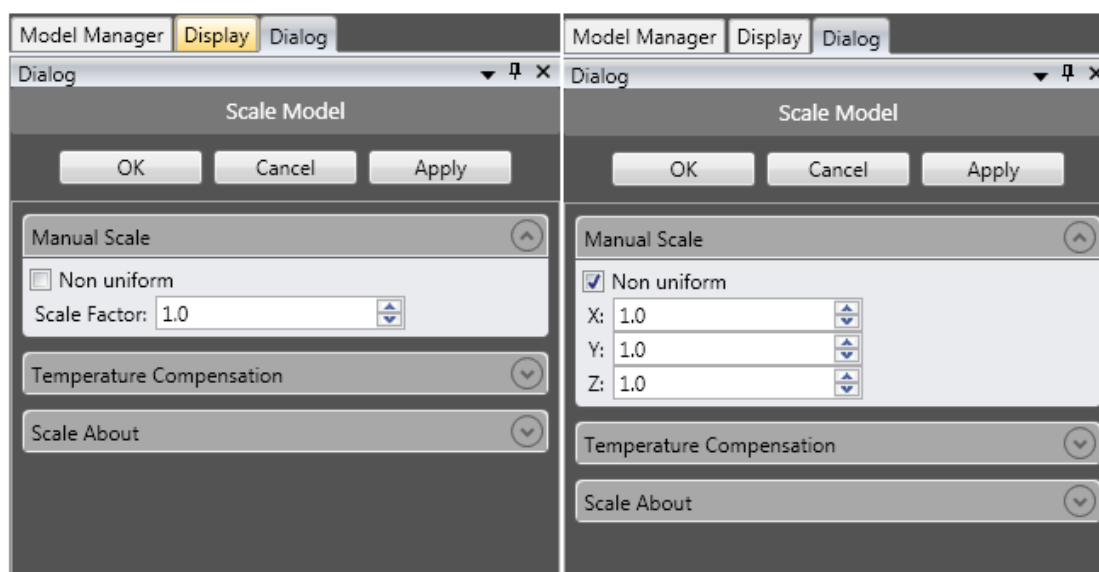
- Βήμα 1<sup>ο</sup>: Στο σημείο αυτό γίνεται η χρήση απο το πακέτο εντολών "Tools" της εντολής "Scale"



Σχήμα 3.29 : Επιλογή της εντολής "Scale"

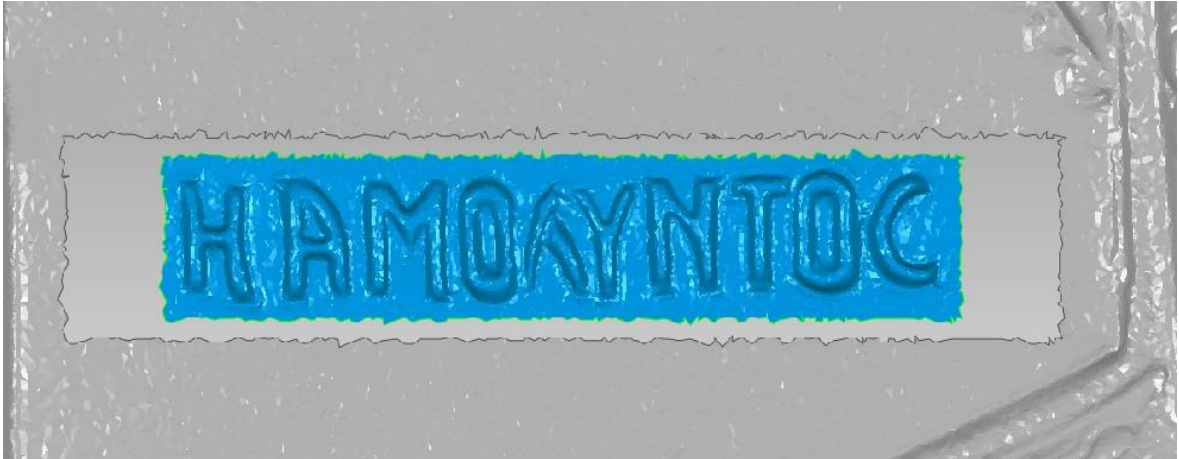
- Βήμα 2<sup>ο</sup>: Με την χρήση αυτής της εντολής εμφανίζεται στο παράθυρο διαλόγου το μενού ρυθμίσεων της συγκεκριμένης εντολής το οποίο περιλαμβάνει:

- α) Τον συντελεστή κλιμάκωσης ο οποίος μπορεί να αλλάξει είτε χειροκίνητα αυξομειώνοντας παράλληλα και στους τρεις άξονες καθώς είτε σε κάθε άξονα χειροκίνητα.



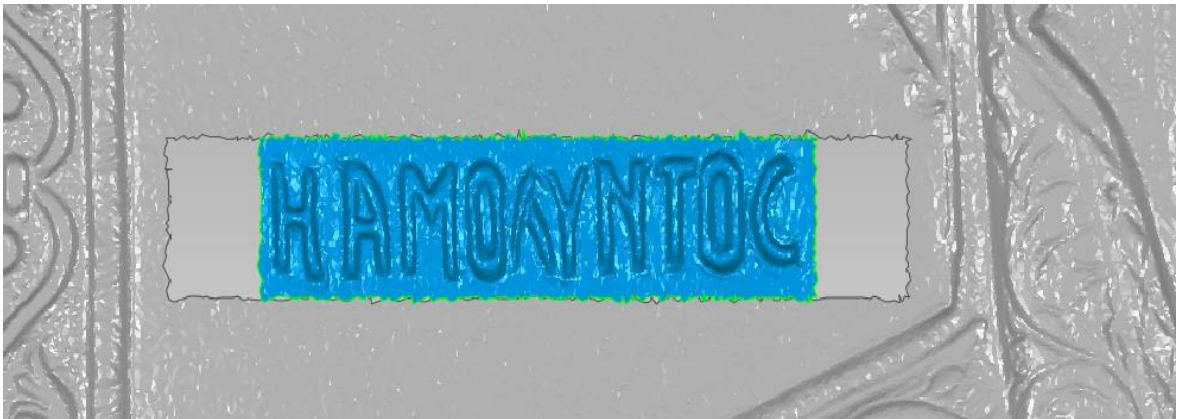
Σχήμα 3.30 : Παράθυρα διαλόγων των ρυθμίσεων της εντολής "Scale"

1. Στους τρεις άξονες.



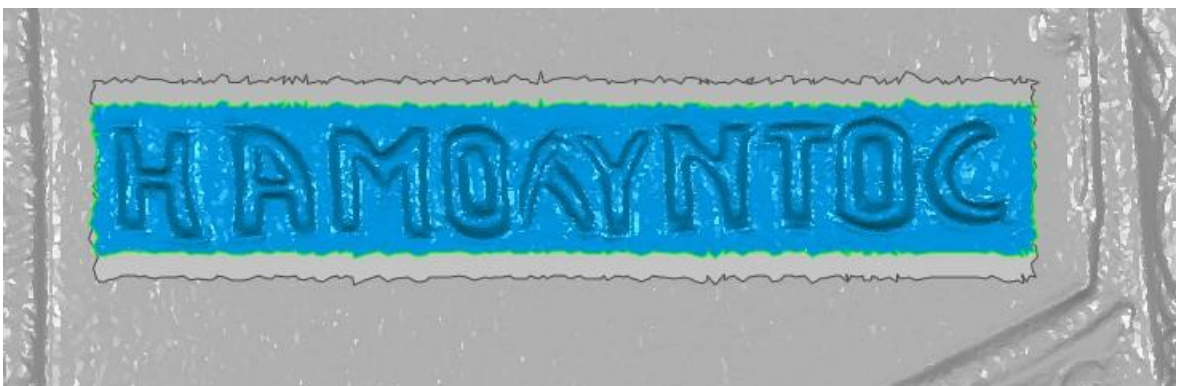
Σχήμα 3.31 : Παράδειγμα Κλιμάκωσης στους τρεις άξονες με χρήση της εντολής “Scale”

2. Στον άξονα Χ:



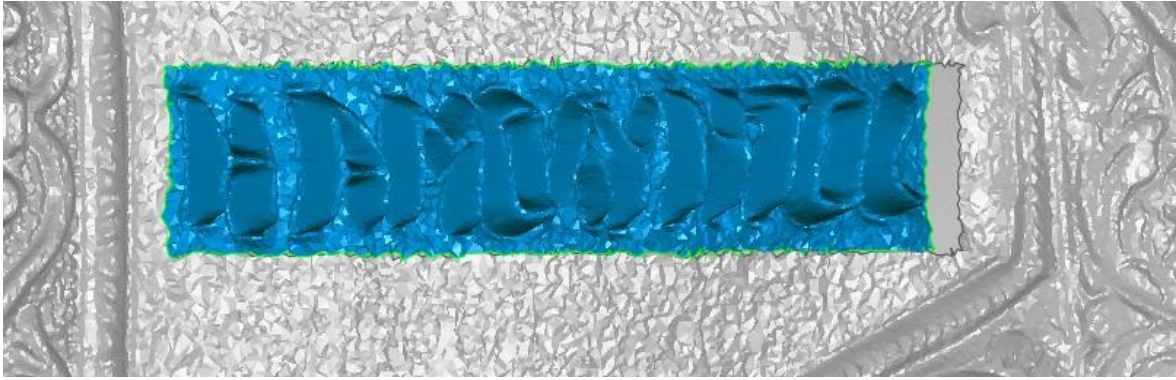
Σχήμα 3.32 : Παράδειγμα Κλιμάκωσης στον άξονα Χ με χρήση της εντολής “Scale”

3. Στον άξονα Υ:



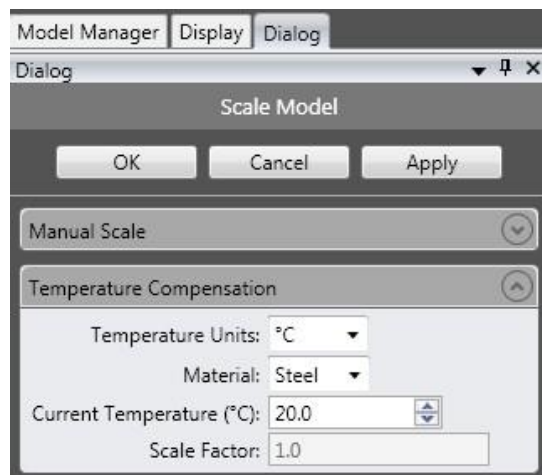
Σχήμα 3.33 : Παράδειγμα Κλιμάκωσης στον άξονα Υ με χρήση της εντολής “Scale”

4. Στον άξονα Z:



Σχήμα 3.34 : Παράδειγμα Κλιμάκωσης στον άξονα Z με χρήση της εντολής “Scale”

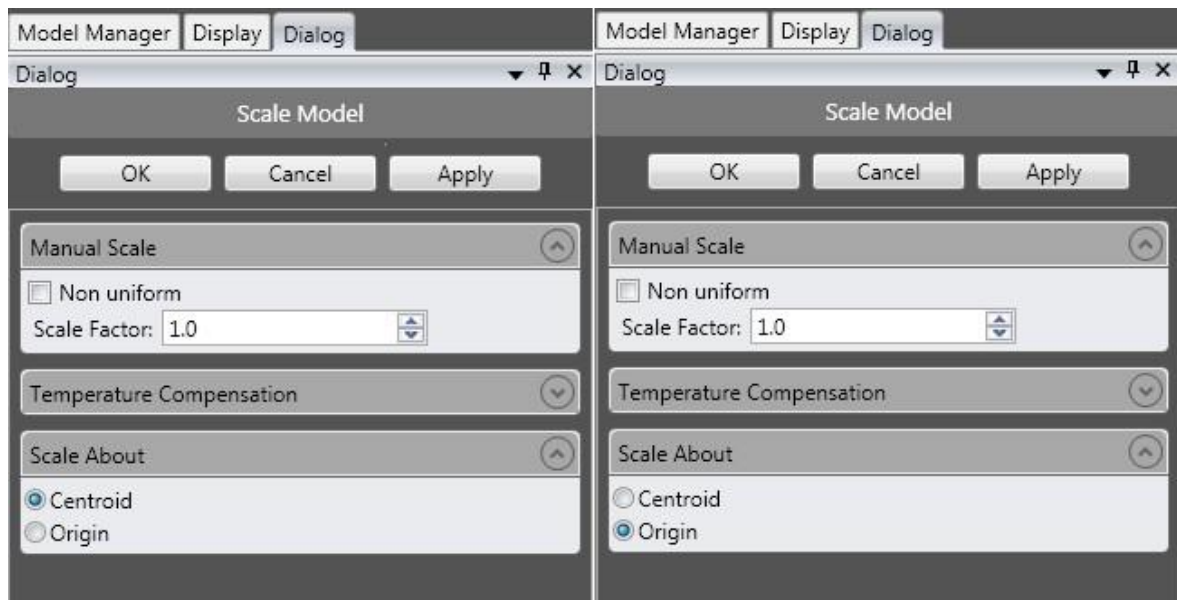
b) Την αντιστάθμιση θερμοκρασίας η οποία είναι υπεύθυνη ανάλογα με το υλικό και την θερμοκρασία να προσαρμόσει την απόδοση του συστήματος για την εναλλαγή των μεταβολών τις θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.35 : Ρυθμίσεις Αντιστάθμισης των Θερμοκρασιών της εντολής “Scale”

c) Το σημείο αναφοράς της κλιμάκωσης καθώς και το είδος της, δηλαδή κατά πόσο θα γίνεται γύρω από το κέντρο ή γύρω από τυχαία σημεία.





Σχήμα 3.36 : Επιλογή ανάμεσα σε κεντροειδή ή μη κεντροειδή χρήση της εντολής “Scale”

### 3.4 Επιλογή και Δημιουργία νέου Αντικειμένου

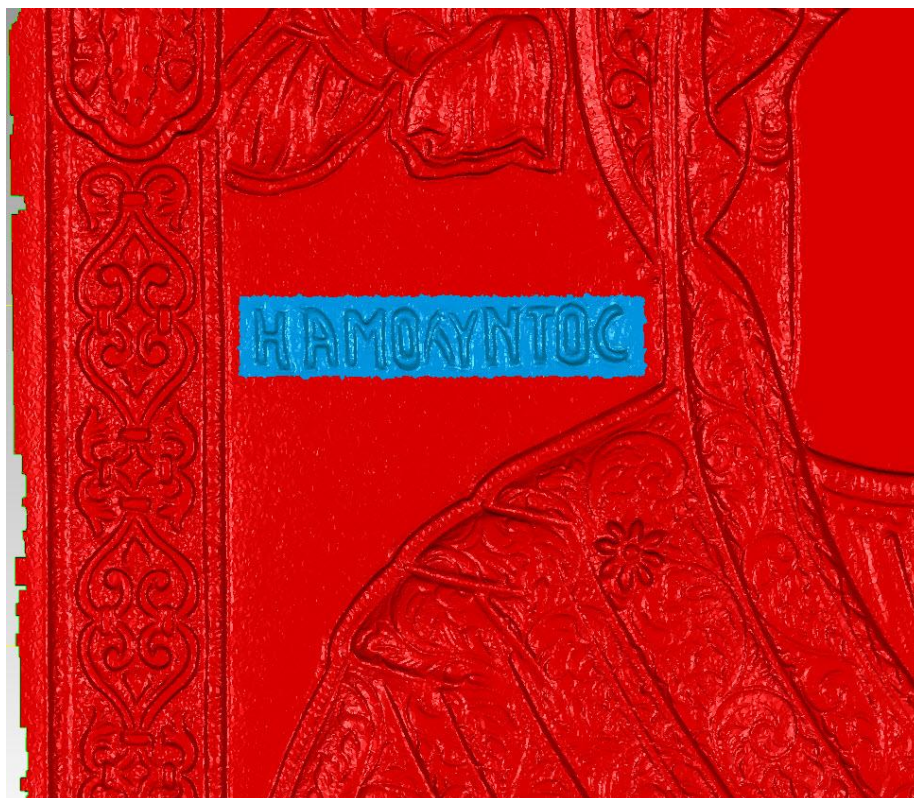
- Βήμα 1<sup>ο</sup>: Γίνεται η επιλογή όλου του αντικειμένου με το πάτημα των πλήκτρων “Ctrl+A” .



Σχήμα 3.37 : Αρχική Επιλογή όλης της εικόνας

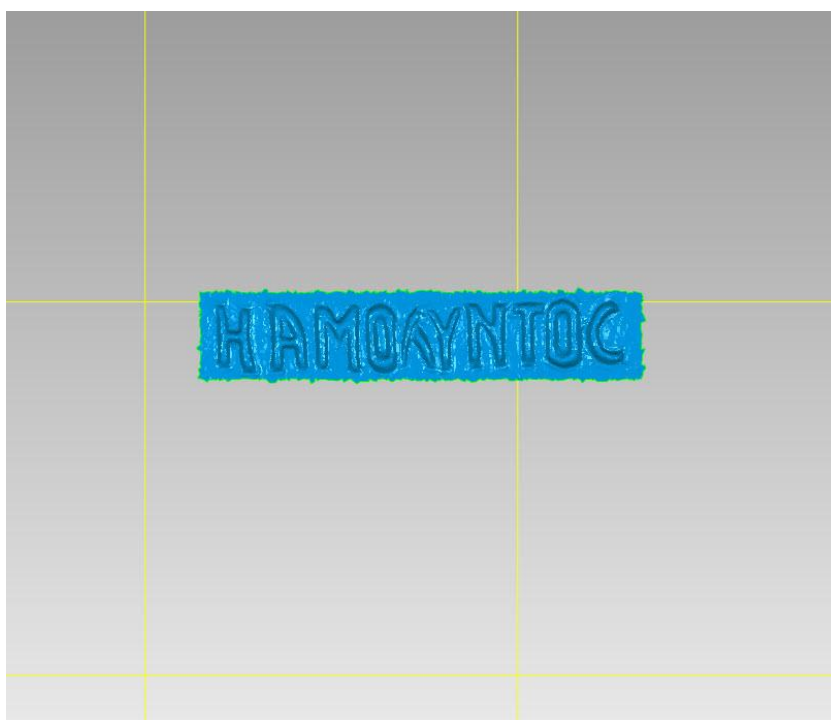
- Βήμα 2<sup>ο</sup>: Με την χρήση της εντολής “un-mark triangle” μπορεί να γίνει η απο-επιλογή του τμήματος που είναι έτοιμο για δημιουργία.





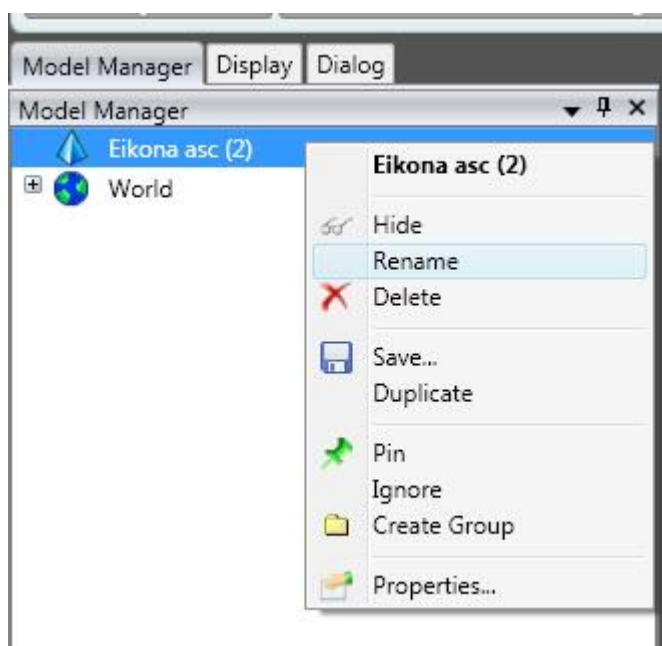
Σχήμα 3.38 : Αφαίρεση από επιλογή του επιθυμητού τμήματος

- Βήμα 3<sup>ο</sup>: Χρησιμοποιώντας την χρήση της εντολής “Delete” γίνεται η διαγραφή όλου του υπόλοιπου τμήματος.



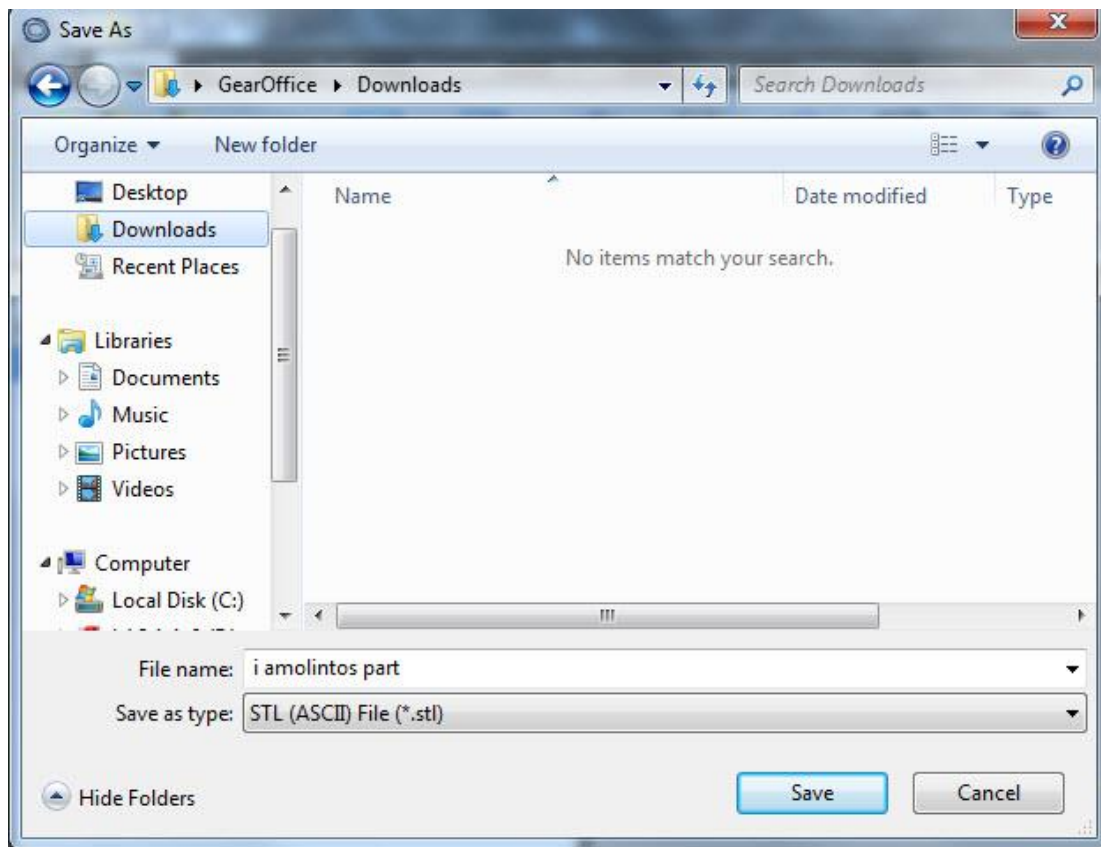
Σχήμα 3.39 : Διαγραφή του υπόλοιπου νέφους σημείων

- Βήμα 4<sup>ο</sup>: Κάνοντας δεξί κλικ και “Rename” μπορεί να γίνει η μετονομασία του καινούργιου αντικείμενου.



Σχήμα 3.40 : Δυνατότητα Μετονομασίας του νέου αντικειμένου

- Βήμα 5<sup>ο</sup>: Το νέο αντικείμενο είναι έτοιμο για αποθήκευση σε κάθε είδους τύπο αρχείου.

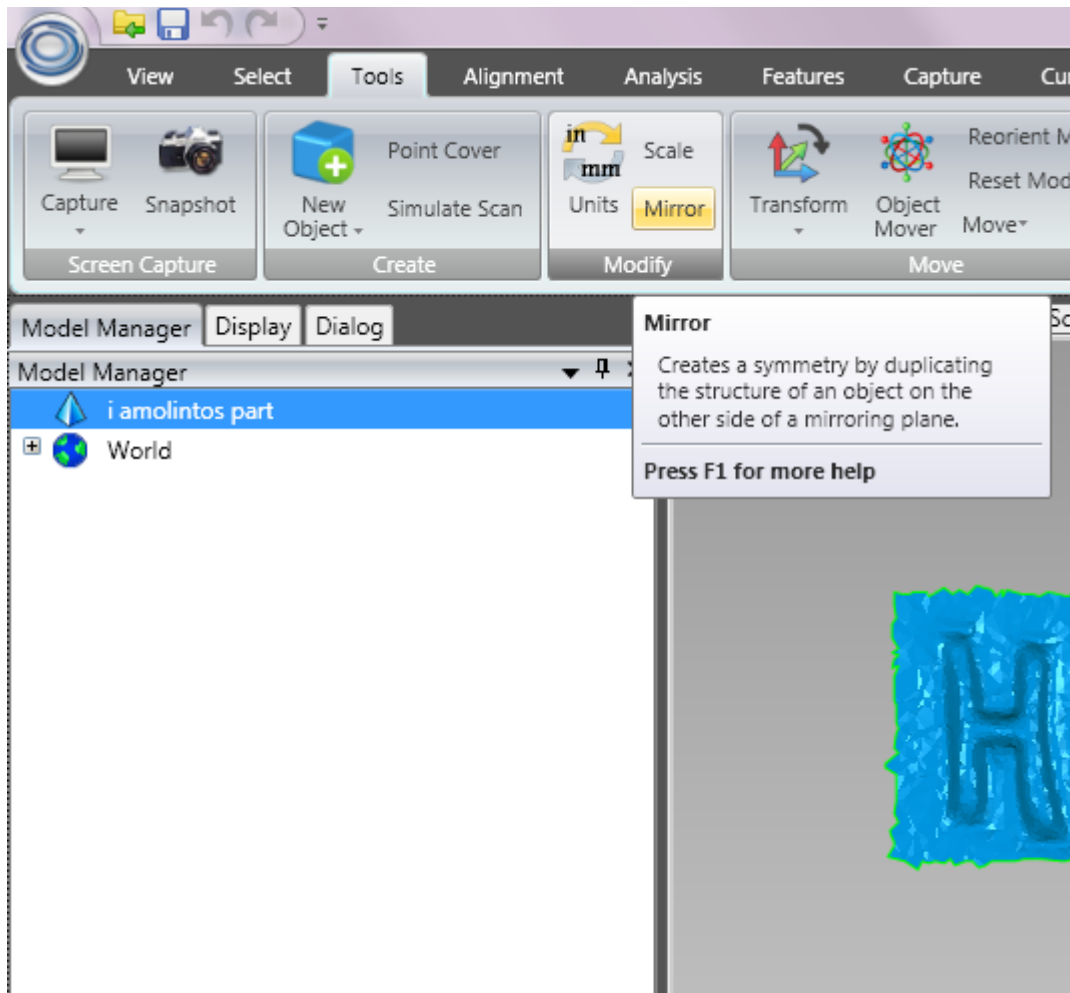


Σχήμα 3.41 : Αποθήκευση του νέου αντικειμένου σε επιθυμητό τύπο αρχείου

### 3.5 Αντικατοπτρισμός τμήματος του νέφους (Mirror)

Για τον αντικατοπτρισμό ενός αντικειμένου δηλαδή ενός τμήματος που έχει δημιουργηθεί σε καινούργιο αντικείμενο, μπορεί γίνει η μετάβαση στο Βήμα 6<sup>ο</sup> της ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΛΛΗΣΗ ΝΕΟΥ ΚΟΜΜΑΤΙΟΥ.

- Βήμα 1<sup>ο</sup>: Στο σημείο αυτό γίνεται η χρήση από το πακέτο εντολών "Tools" της εντολής "Mirror"

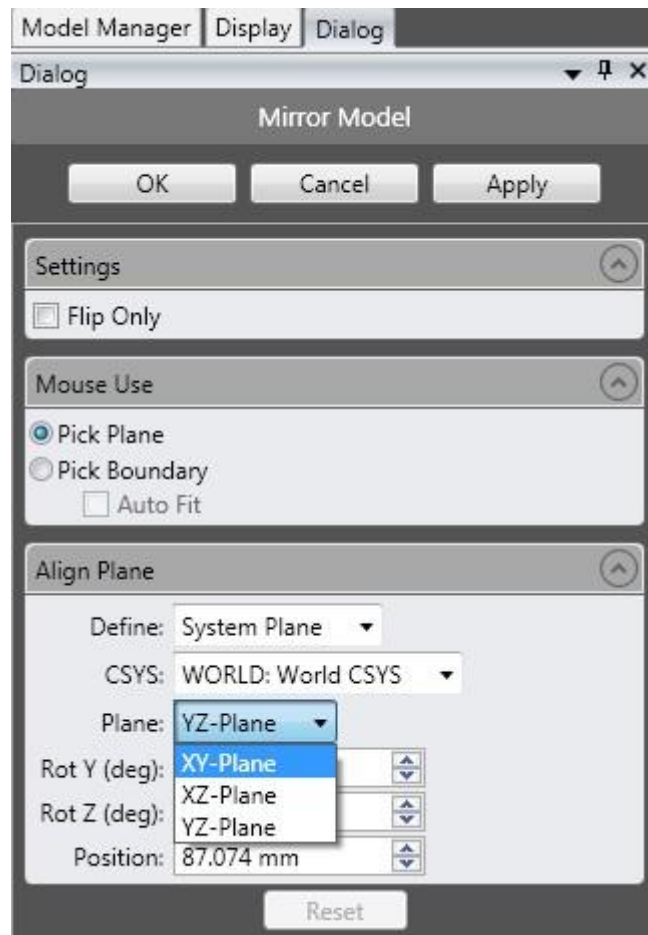


Σχήμα 3.42 : Επιλογή της εντολής "Mirror"

- Βήμα 2<sup>ο</sup>: Σε αυτό το στάδιο γίνεται η επιλογή του άξονα βάσει του οποίου θα γίνει ο αντικατοπτρισμός η δημιουργία δηλαδή του πανομοιότυπου αντικειμένου.

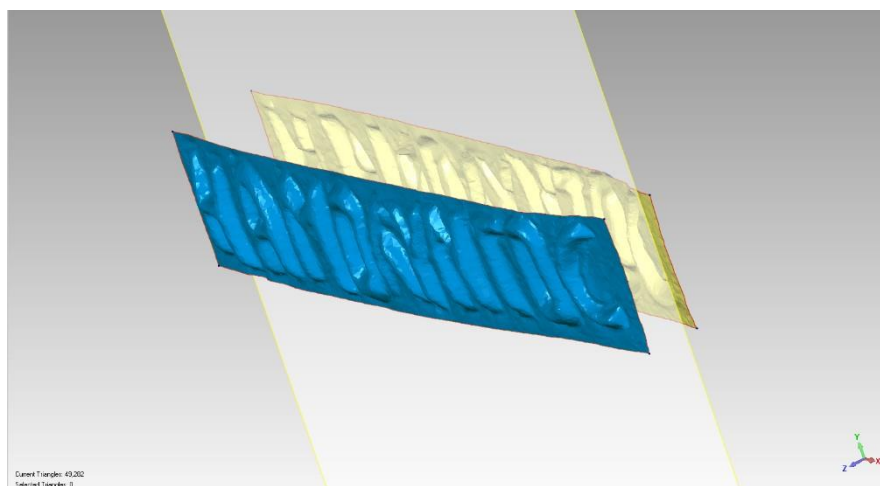
Για να γίνει αυτό υπάρχουν δύο τρόποι:

- Α. Με τον καθορισμό ενός επιπέδου αναφοράς (XY,YZ,XZ) μέσω του οποίου θα γίνει αντανάκλαση του είδωλο. Ο καθορισμός αυτός γίνεται στο παράθυρο διαλόγου.

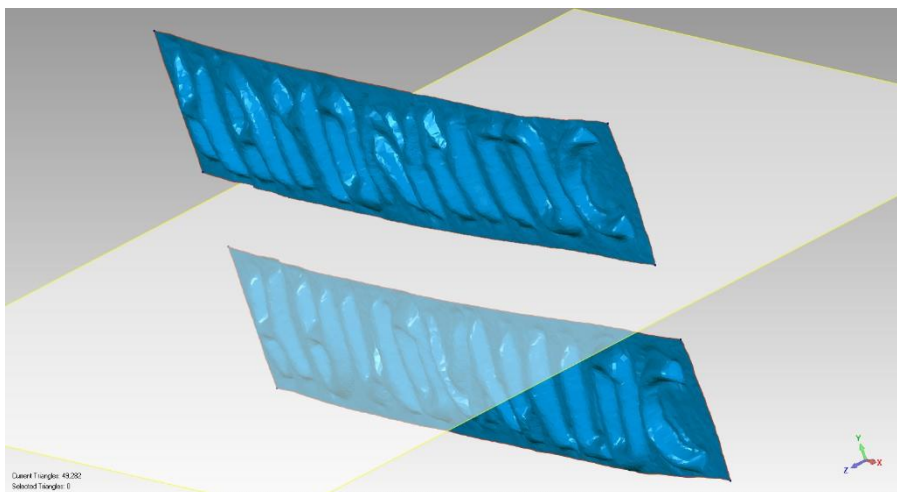


Σχήμα 3.43 : Επιλογή του επιπέδου αναφοράς της εντολής “Mirror”

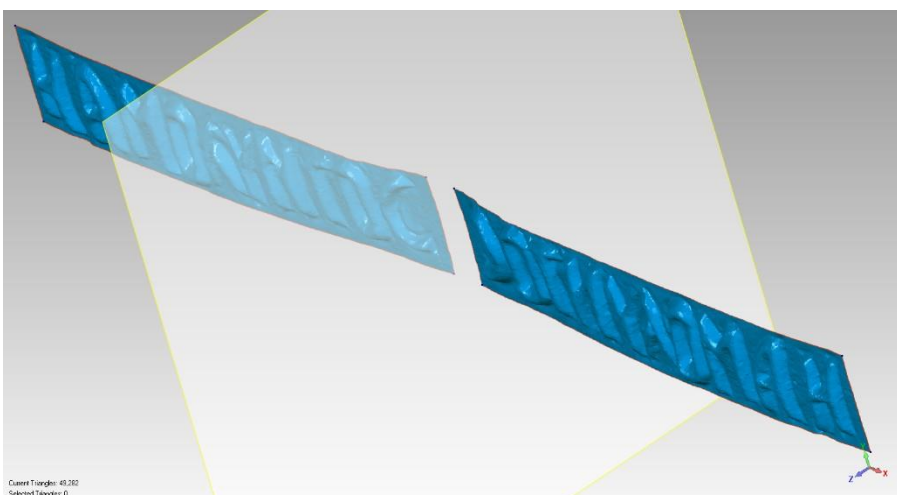
Με αυτόν τον τρόπο και αλλάζοντας τις μεταβλητές που αφορούν την περιστροφή των δύο αξόνων αλλά και την θέση του επιπέδου αναφοράς γίνεται ο ακριβής καθορισμός του μέρους που θα γίνει ο αντικατοπτρισμός του αντικειμένου.



Σχήμα 3.44 : Επίπεδο αναφοράς XY της εντολής “Mirror”



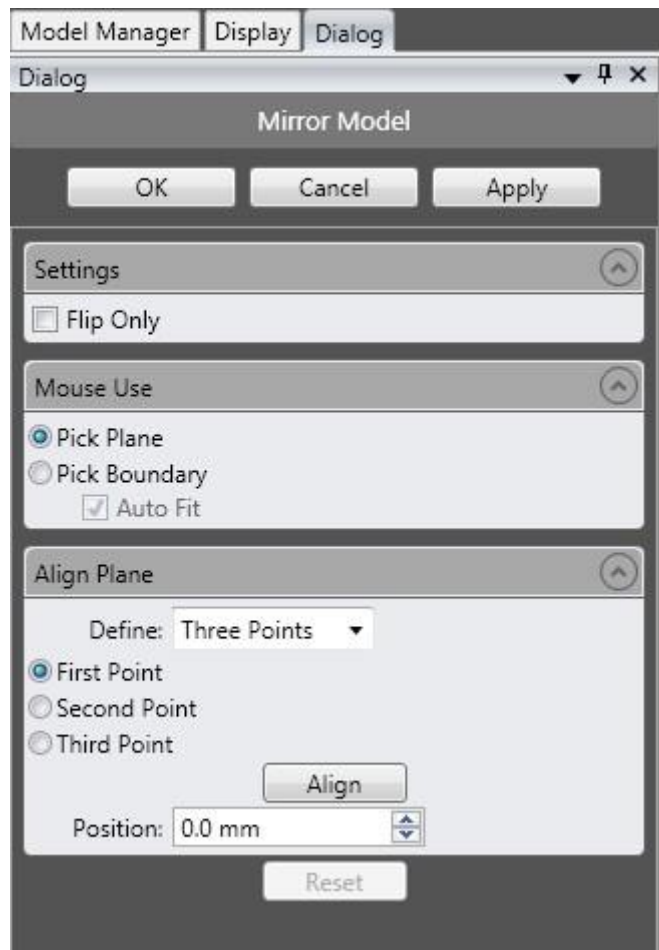
Σχήμα 3.45 : Επίπεδο αναφοράς XZ της εντολής “Mirror”



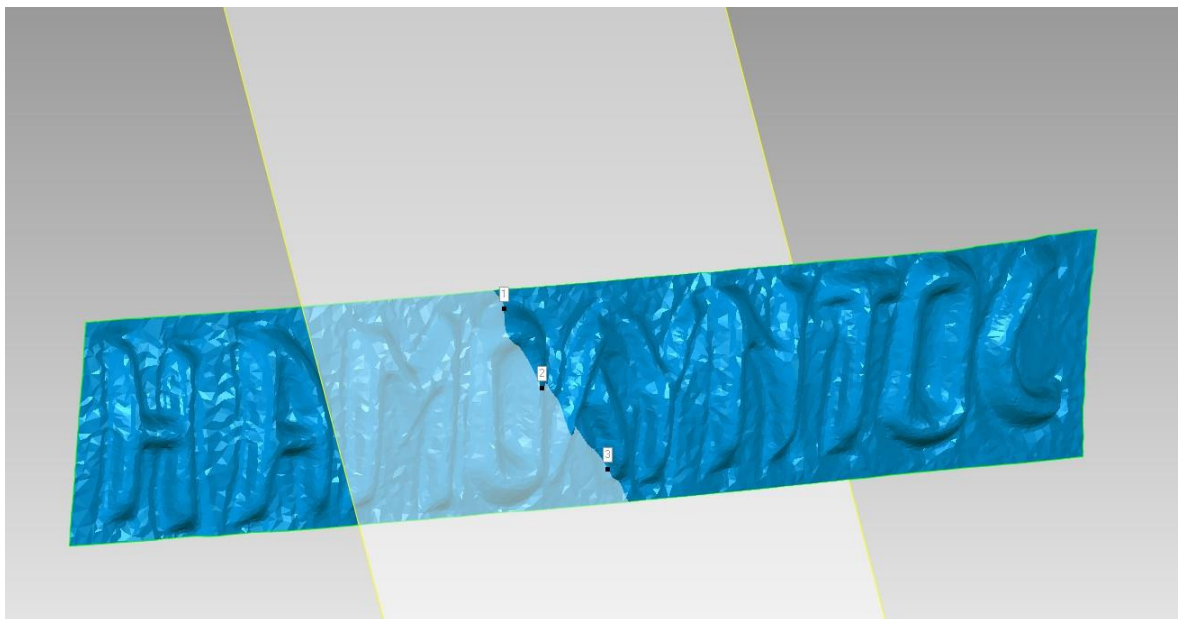
Σχήμα 3.46 : Επίπεδο αναφοράς YZ της εντολής “Mirror”

Β. Με τον καθορισμό τριών σημείων τα οποία είναι ικανά να καθορίσουν ένα επίπεδο σε οποιοδήποτε χώρο στο περιβάλλον εργασίας. Αυτό γίνεται απλώς κάνοντας κλικ στα σημεία που θα καθορίσουν την επιφάνεια αυτή .



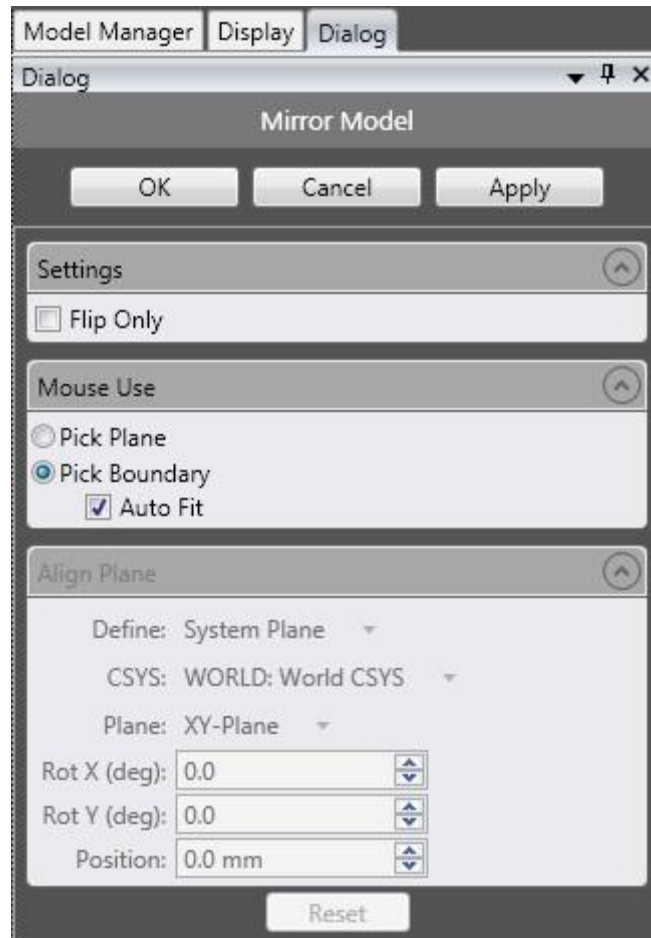


Σχήμα 3.47 : Ρύθμιση του επίπεδο αναφοράς βάσει των τριών σημείων της εντολής “Mirror”

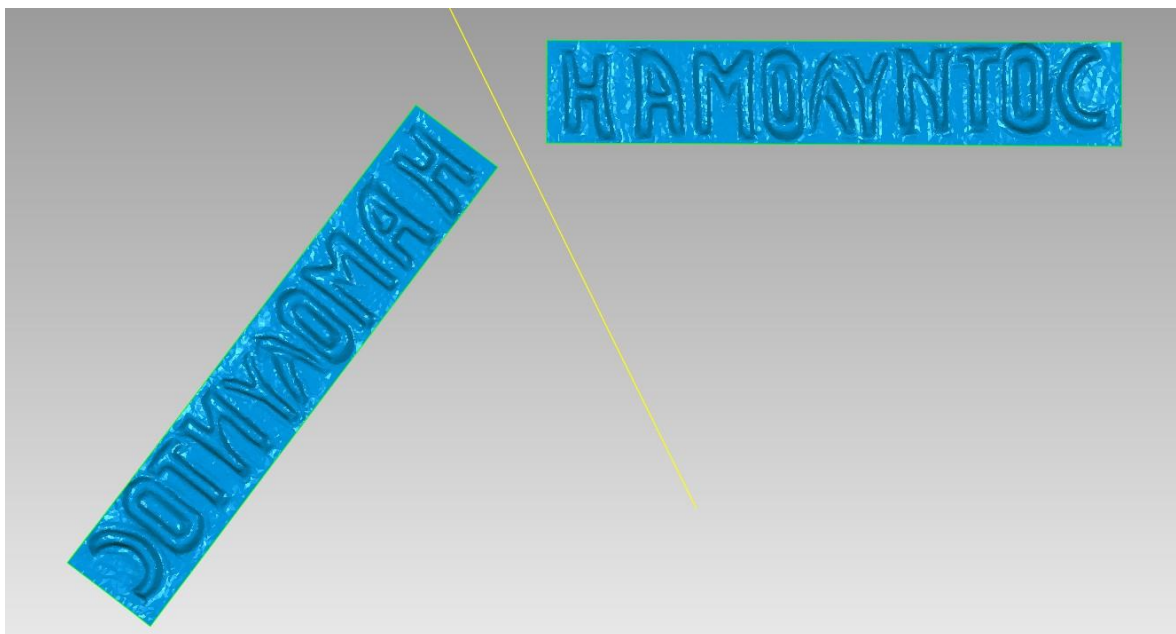


Σχήμα 3.48 : Επίπεδο αναφοράς βάσει των τριών σημείων της εντολής “Mirror”

C. Με τον καθορισμό μιας γραμμής η οποία θα βρίσκεται πάνω στο επίπεδο που έχει οριστεί και θα λειτουργήσει ως γραμμή αναφοράς του αντικειμένου που θα αντικατοπτριστεί .

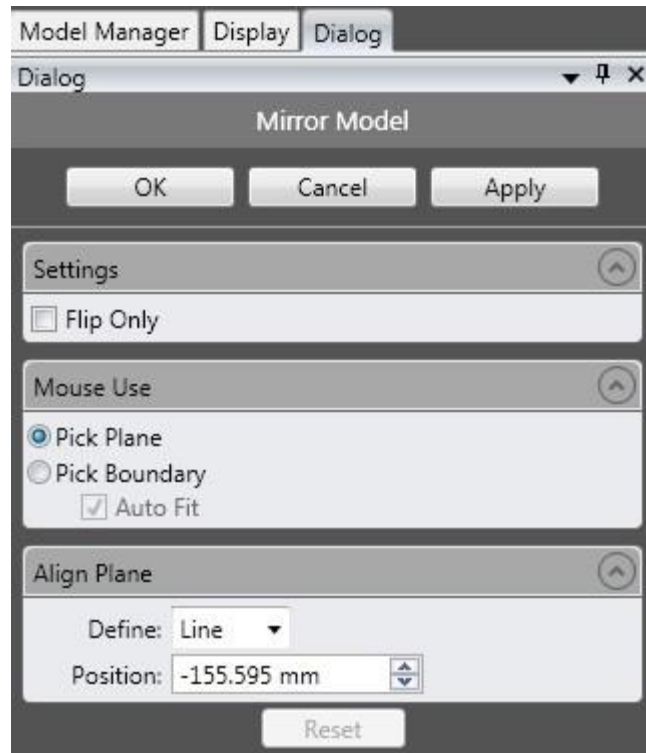


Σχήμα 3.49 : Ρύθμιση του επίπεδο αναφοράς βάσει μίας γραμμής που σχεδιάζεται

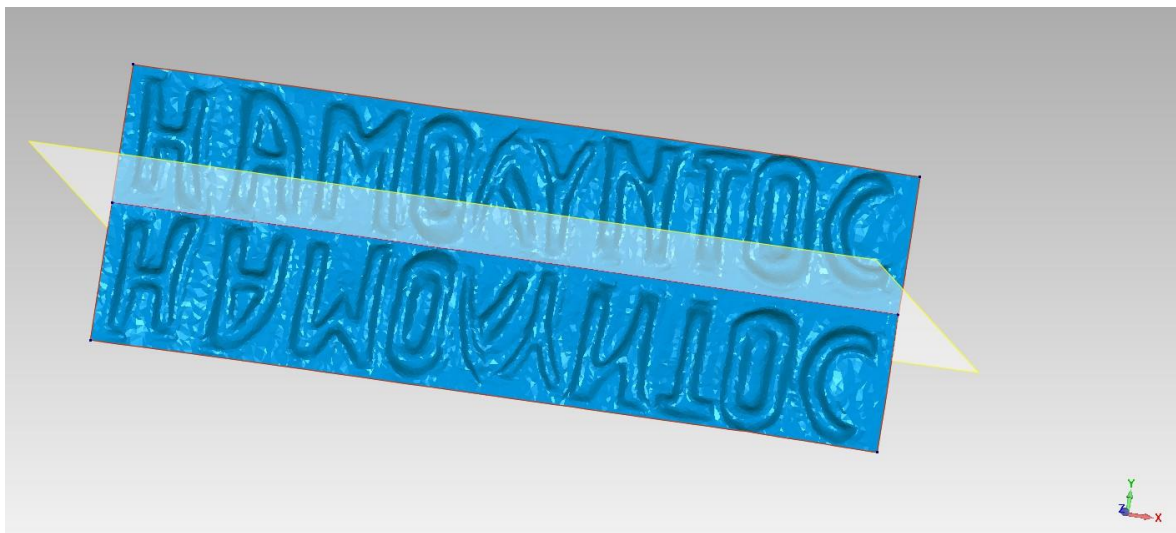


Σχήμα 3.50 : Επίπεδο αναφοράς βάσει μίας γραμμής

D. Ένας άλλος διαφορετικός τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει η επιλογή του επιπέδου είναι ως μια συνορογραμμή (Boundary) δηλαδή την ακμή ή αλλιώς το τέλος μίας πλευράς του πλέγματος των πολυγώνων εφόσον βέβαια αυτό είναι ακριβώς καθορισμένο. Χρησιμοποιώντας αυτό το σύνορο δημιουργεί ένα επίπεδο που να βρίσκεται πάνω σε αυτό το επίπεδο.

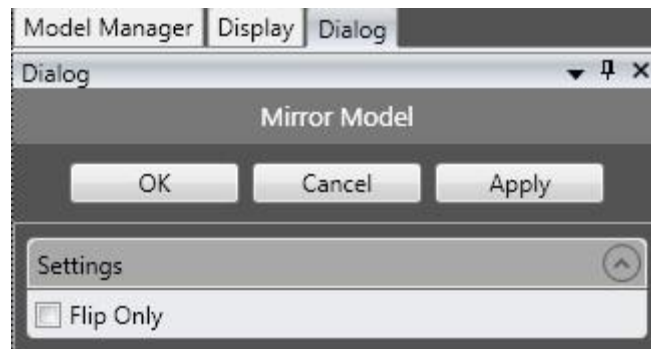


Σχήμα 3.51 : Ρύθμιση του επιπέδου αναφοράς βάσει ενός συνόρου



Σχήμα 3.52 : Επίπεδο αναφοράς βάσει ενός συνόρου

Στην περίπτωση που επιλεγθεί η επιλογή “Flip Only” γίνεται μόνο ο αντικατοπτρισμός του αντικειμένου και δημιουργείται μόνο το είδωλό του ενώ το πραγματικό διαγράφεται.

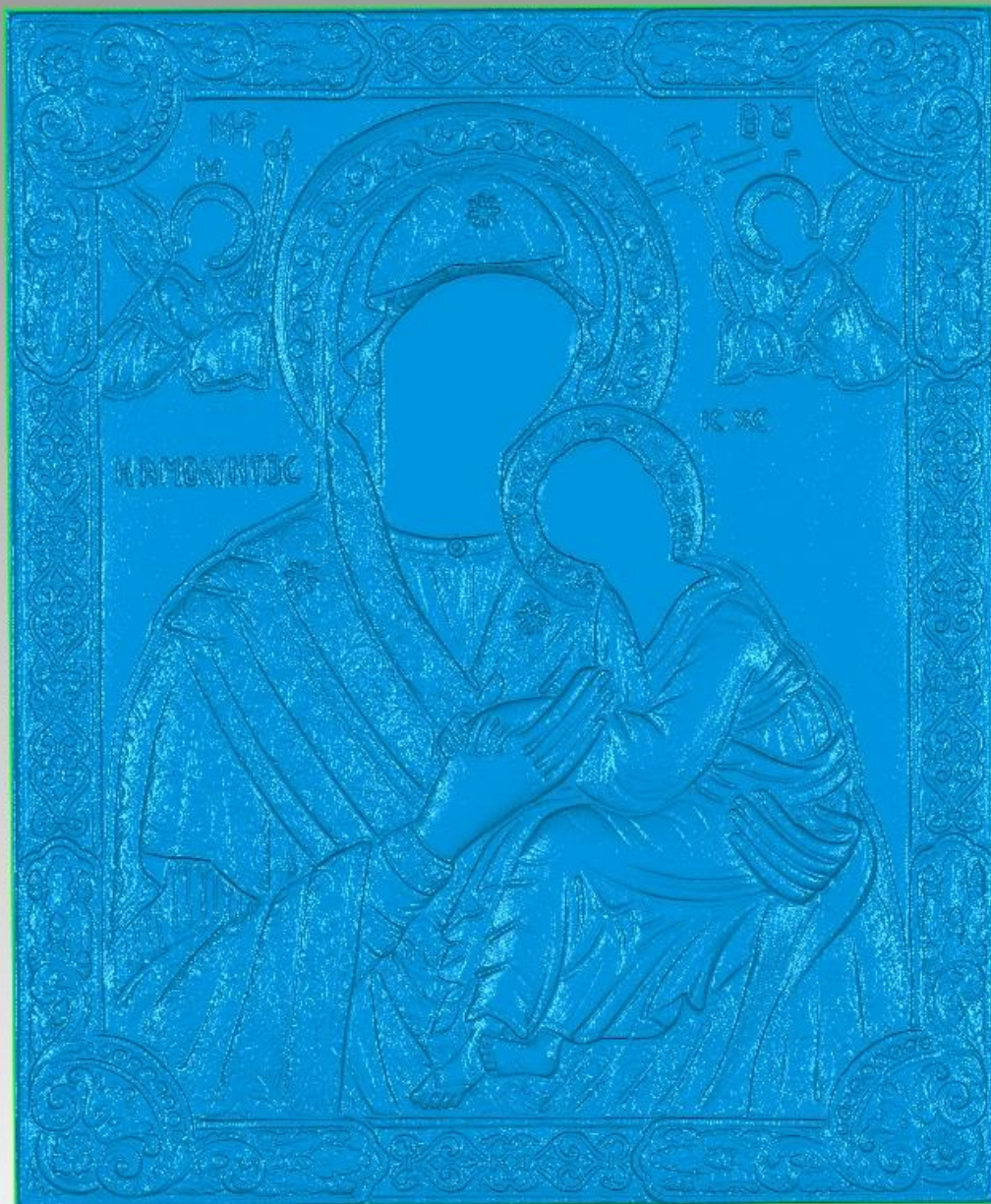


Σχήμα 3.53 : Ρύθμιση της επιλογής “Flip Only”



#### 4. ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΕΛΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτό το στάδιο ύστερα από την αναλυτική παρουσίαση των επιμέρους εντολών που παρουσιάστηκαν θα γίνει αναφορά στον συνδυασμό όλων αυτών μαζί βάση του οποίου έγινε η επεξεργασία του αρχικού νέφους σημείων με σκοπό την δημιουργία της σύνθεσης του του μοντέλου επιφανείας και ύστερα του τελικού δοκιμίου που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Η σύνθεση αυτή είναι ικανή να περιγράψει όλες τις σημαντικές εντολές που αναλύθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας καθώς και άλλες μικρότερες αλλά εξίσου σημαντικές.



Σχήμα 4.1: Αρχικό νέφος σημείων με απλή κοπή των περιθωρίων

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το αρχικό νέφος σημείων το οποίο είναι σκαναρισμένο σε διαστάσεις πραγματικές με την καλύτερη ακρίβεια που μπορεί να έχει από θέμα γραφικών. Το νέφος αυτό έχει μετατραπεί σε πλέγμα πολύγωνων ενώ επίσης έχει γίνει κοπή των περιθωρίων της κορνίζας σύμφωνα με τα επίπεδα που είναι παράλληλα με τα επίπεδα του συστήματος συντεταγμένων (System Datum Plane).





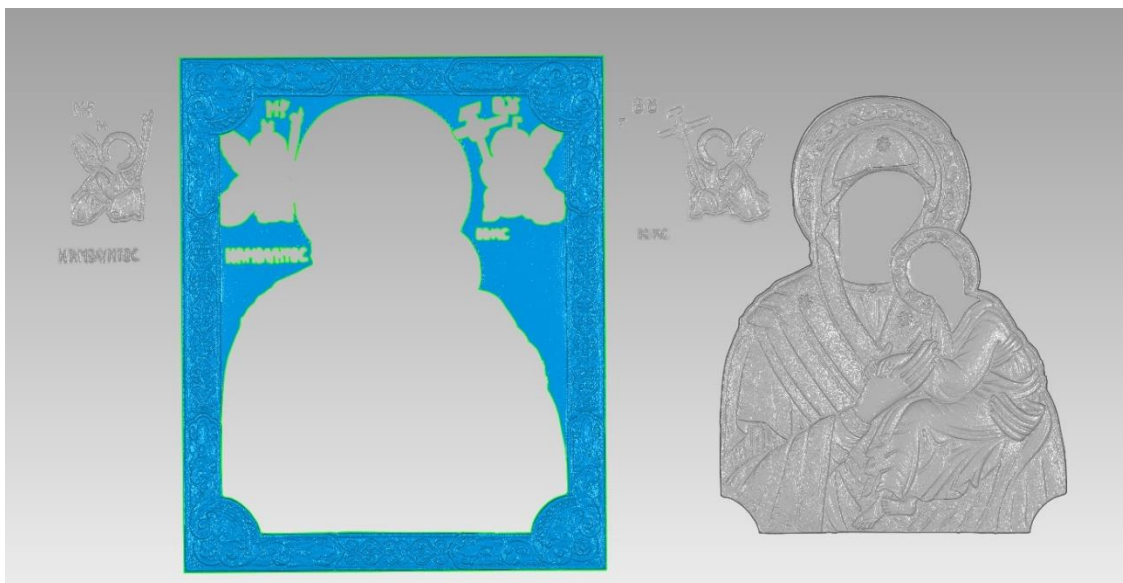
Σχήμα 4.2: Δοκιμαστική κοπή και σύνθεση των διαφόρων τμημάτων της Εικόνας με χρήση πλήθους εντολών όπως: Move, scale, copy, rotate, mirror

Σε αυτό το στάδιο απεικονίζεται στο σχήμα 4.2 η πρώτη προσπάθεια σύνθεσης όλων των εντολών η οποία αντιμετώπισε αρκετές δυσκολίες και δεν προχώρησε σε περισσότερη επεξεργασία. Η βασική δυσκολία που αντιμετωπίστηκε ήταν το γεγονός ότι η κοπή των επιμέρους αντικειμένων δεν έγινε με τον σωστό τρόπο όπως θα δειχθεί παρακάτω. Ένα άλλο βασικό πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν με τα ανισοεπίπεδα που δημιουργήθηκαν από την αντιγραφή, την μετακίνηση και αλλαγή διαστάσεων των επιμέρους τμημάτων που είχε σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί να γίνει η εννοποίησή τους σε ένα συνολικό νέφος σημείων ξανά.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος που αναφέρθηκε προηγουμένως χρησιμοποιήθηκε μία άλλη εντολή για την αποκοπή τμήματος του νέφους σημείων συγκεκριμένα η εντολή “Trim with Curve” όπως εμφανίζεται στο σχήμα 4.3. Η εντολή αυτή ακολουθεί ακριβώς τα σημεία που έχουν οριστεί από τον χρήστη δημιουργώντας μία καμπύλη που να μπορεί να περάσει από πολύ δύσκολα σημεία με ένα πολύ φυσικό και αισθητικό αποτέλεσμα καθώς για να το κάνει αυτό θα πρέπει η καμπύλη να περάσει από μέσα από τα πολύγωνα τα οποία κόβονται και χωρίζονται σε δύο αντίστοιχα πολύγωνα συνολικού εμβαδού ίδιο με το αρχικό. Με πιο απλά λόγια η εντολή αυτή δημιουργεί καινούργια σημεία στον χώρο έτσι ώστε να περάσει η καμπύλη από τα επιθυμητά σημεία ακριβώς.



Σχήμα 4.3: Χρήση καινούργιας εντολής για την καλύτερη κοπή των τμημάτων της εικόνας



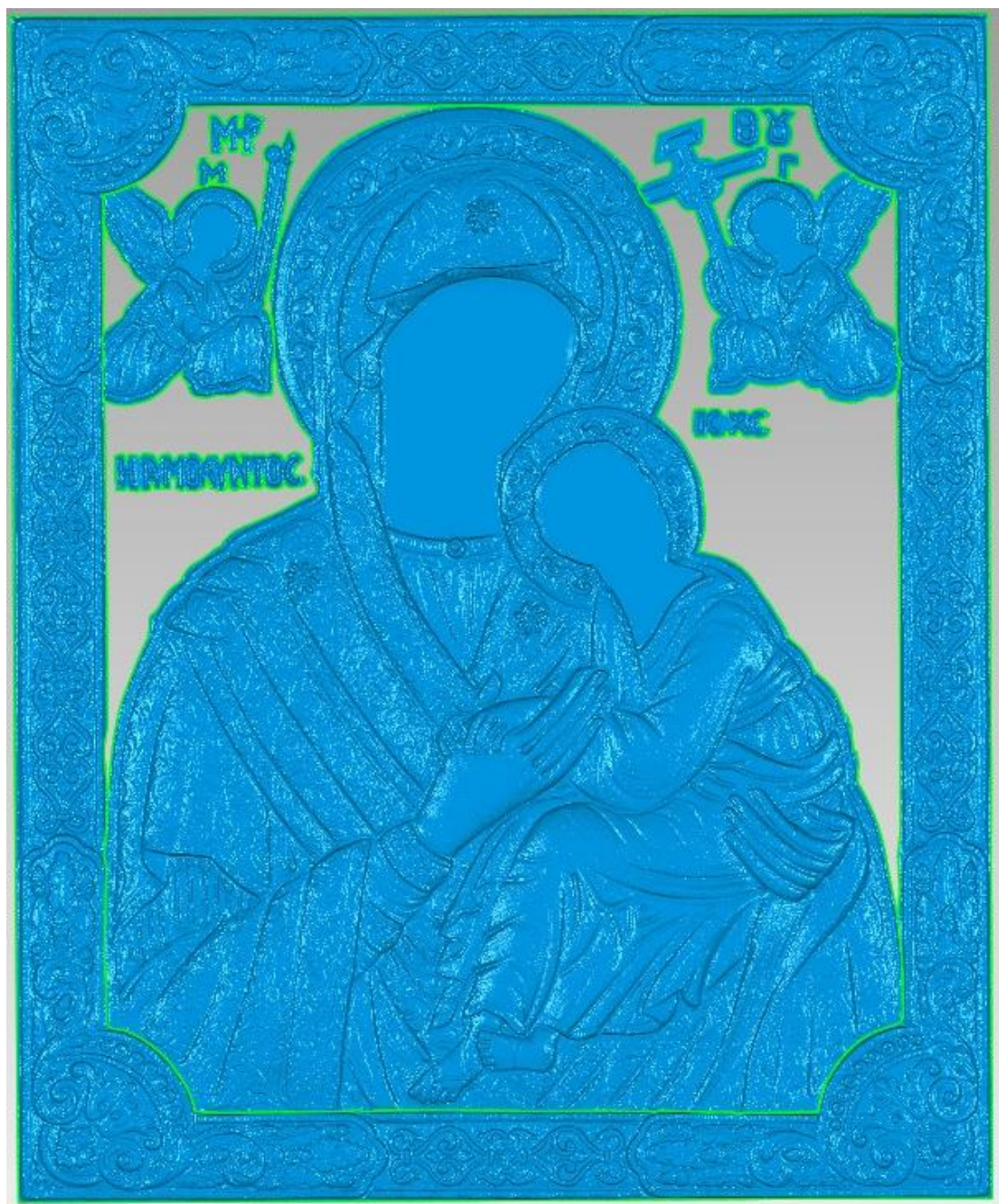
Σχήμα 4.4 : Στάδιο κοπής των επιμέρους τμημάτων



Στο σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο από το στάδιο που έγινε η κοπή των επιμέρους τμημάτων με χρήση της προαναφερθείσας εντολής τα οποία μετατοπίστηκαν προσωρινά στις θέσεις που φαίνονται έτσι ώστε να μπορέσει να γίνει καλύτερα η επεξεργασία και η κοπή της κορνίζας όπως τα φανεί παρακάτω.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι κατά την διαδικασία της κοπής ένας μεγάλος αριθμός των πολυγώνων του πλέγματος διαγράφηκε αλλά χωρίς να χαθεί η ακρίβεια στα τμήματα που είναι επιθυμητά παρά μόνο στο πίσω χώρο (Background) το οποίο θα φανεί στην πορεία της εργασίας πως θα τροποποιηθεί πάντα με το ελάχιστο σφάλμα.

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζονται όλα τα τμήματα που κοπήκαν με την εντολή “Trim with Curve” στις αρχικές θέσεις που είχαν στο αρχικό πλέγμα. Επιλέχθηκαν όλα μαζί για να εμφανίζονται στο ίδιο χρόνο και για αυτό το λόγο υπάρχει και το πράσινο περίγραμμα γύρω από το κάθε τμήμα.

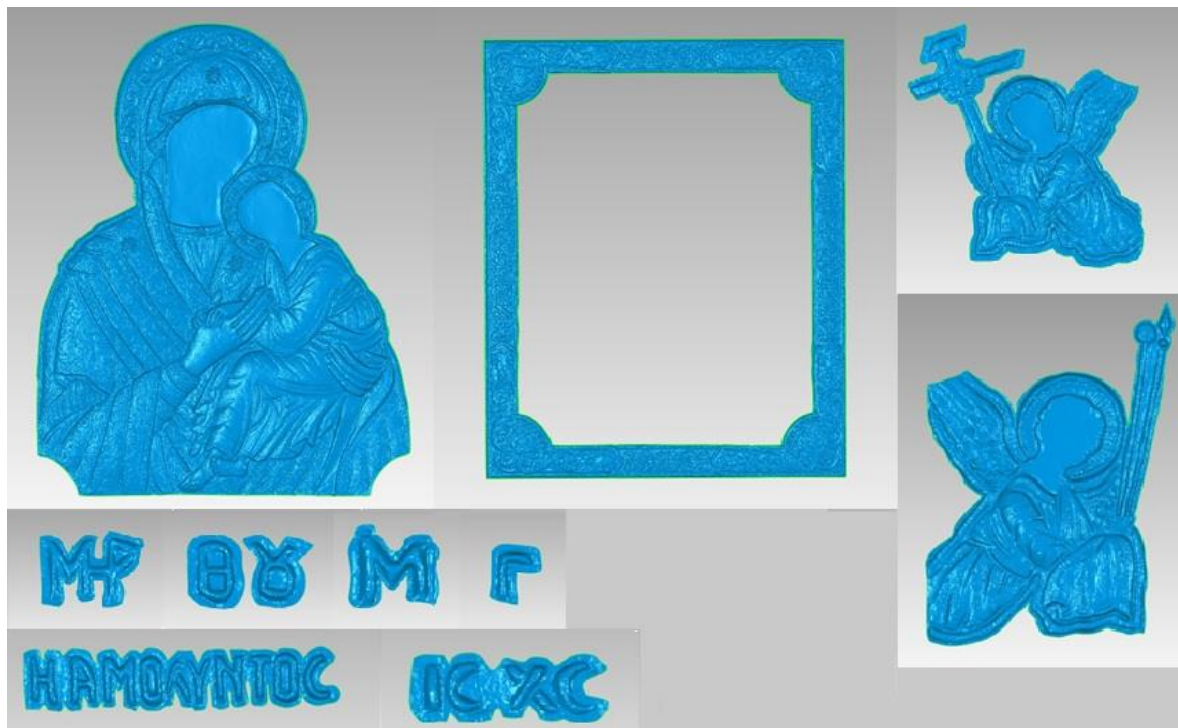


Σχήμα 4.5 : Όλα τα επιθυμητά τμήματα κομένα στις αρχικές τους θέσεις



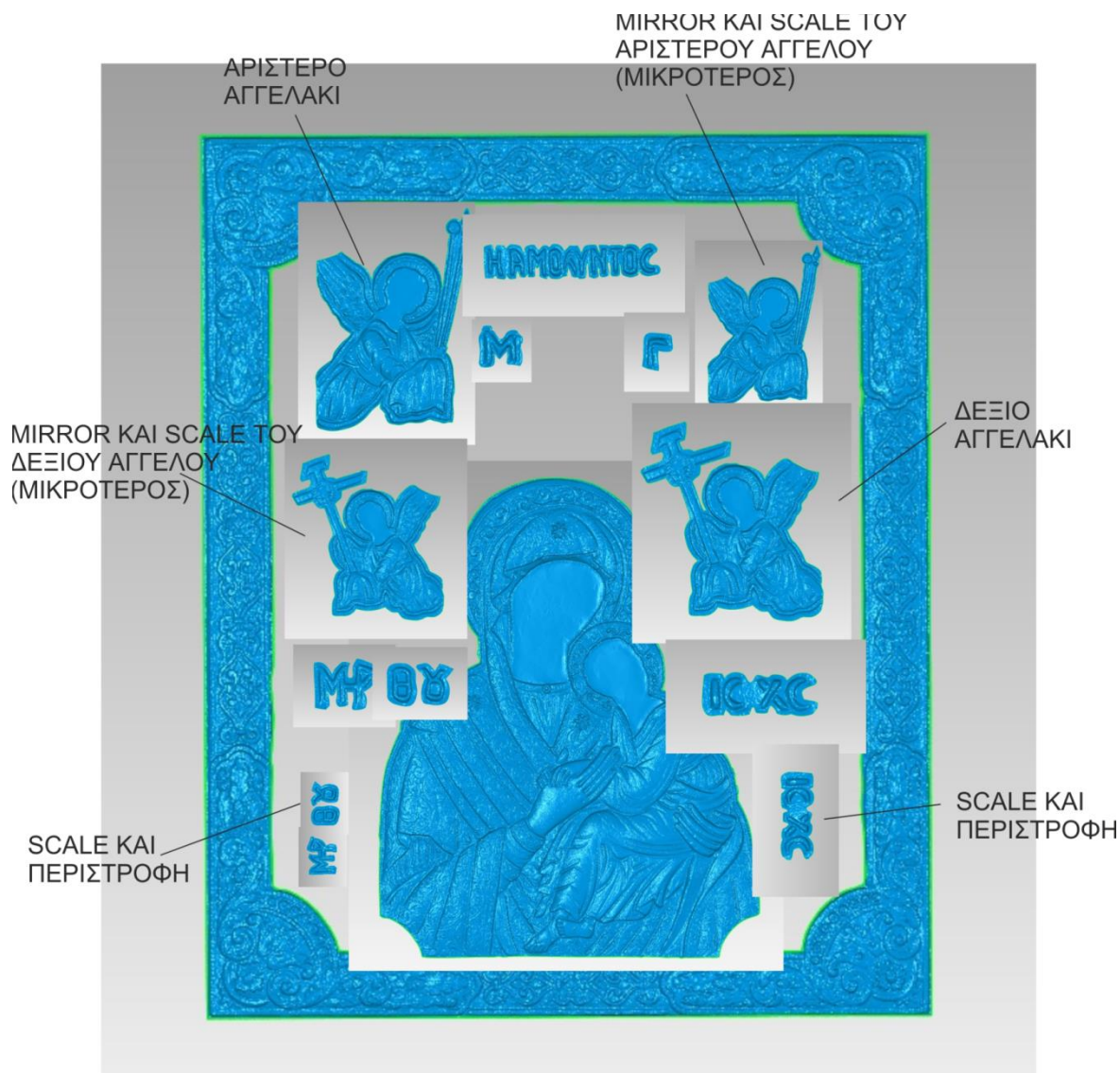
Σε αυτό το σημείο παρατίθενται τα επιμέρους τμήματα στην τελική κοπή τους όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα με την απόκρυψη των υπολοίπων. Τα τμήματα διαχωρίστηκαν στα εξής όπως παρουσιάζονται και στο σχήμα 4.6 :

1. Παναγία
2. Κορνίζα
3. Δεξιός Άγγελος
4. Αριστερός Άγγελος
5. Η Αμόλυντος
6. Μ
7. Γ
8. ΜΡ
9. ΘΥ
10. ΙC ΧC



Σχήμα 4.6 : Επιμέρους τμήματα κομμένα σε ξεχωριστές φωτογραφίες

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η αρχική ιδέα της σύνθεσης μαζί με μία μικρή περιγραφή των εντολών που είναι απαραίτητες για χρήση η οποία έγινε από μία πρόχειρη ένωση των επιμέρους τμημάτων που φαίνονται στο σχήμα 4.6.

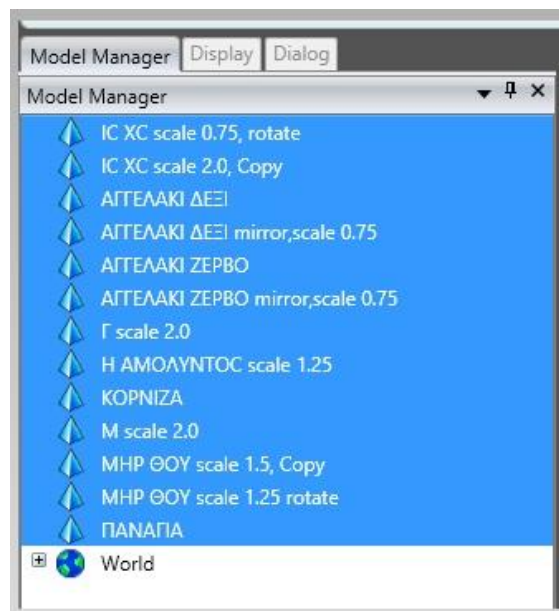


Σχήμα 4.7 : Αρχική ιδέα των επιμέρους τμημάτων της σύνθεσης

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.8 η τελική σύνθεση του μοντέλου επιφανείας της σύνθεσης με τα αυθεντικά τμήματα όπως έγινε χρησιμοποιώντας την εντολή “Exact Mover” στο Geomagic. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα επιμέρους τμήματα αυτά δεν εφάπτονται μεταξύ τους και αποτελούν το καθένα μόνο του ένα ξεχωριστό αντικείμενο (Object) τα ονόματα των οποίων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.9 μαζί με μία μικρή περιγραφή της επεξεργασίας που είχε το καθένα ξεχωριστά.



Σχήμα 4.8 : Τελική σύνθεση πραγματικού μοντέλου με την χρήση των εντολών



Σχήμα 4.9 : Παράθυρο με τα επιμέρους τμήματα και οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν



Στο σημείο αυτό πραγματοποιήθηκε η προσθήκη ενός τμήματος της κορνίζας το οποίο έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να μην είναι εμφανής. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα αυτής της διαδικασίας:

Βήμα 1<sup>ο</sup>: Κόπηκε ένα τμήμα το οποίο ήταν συμμετρικό ως προς ένα άξονα που περνούσε από το κέντρο του όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10 έτσι ώστε η επανάληψή του να έχει ένα ωραίο αισθητικό αποτέλεσμα αλλά καθώς και να ταιριάζει όσο το δυνατό περισσότερο με το υπόλοιπο τμήμα.



Σχήμα 4.10 : Επιλογή του τμήματος της κορνίζας για επεξεργασία.

Βήμα 2<sup>ο</sup>: Με την χρήση της εντολής “Object Mover” μετακινήθηκε το νέο αντικείμενο του τμήματος της κορνίζας στον κενό χώρο όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.

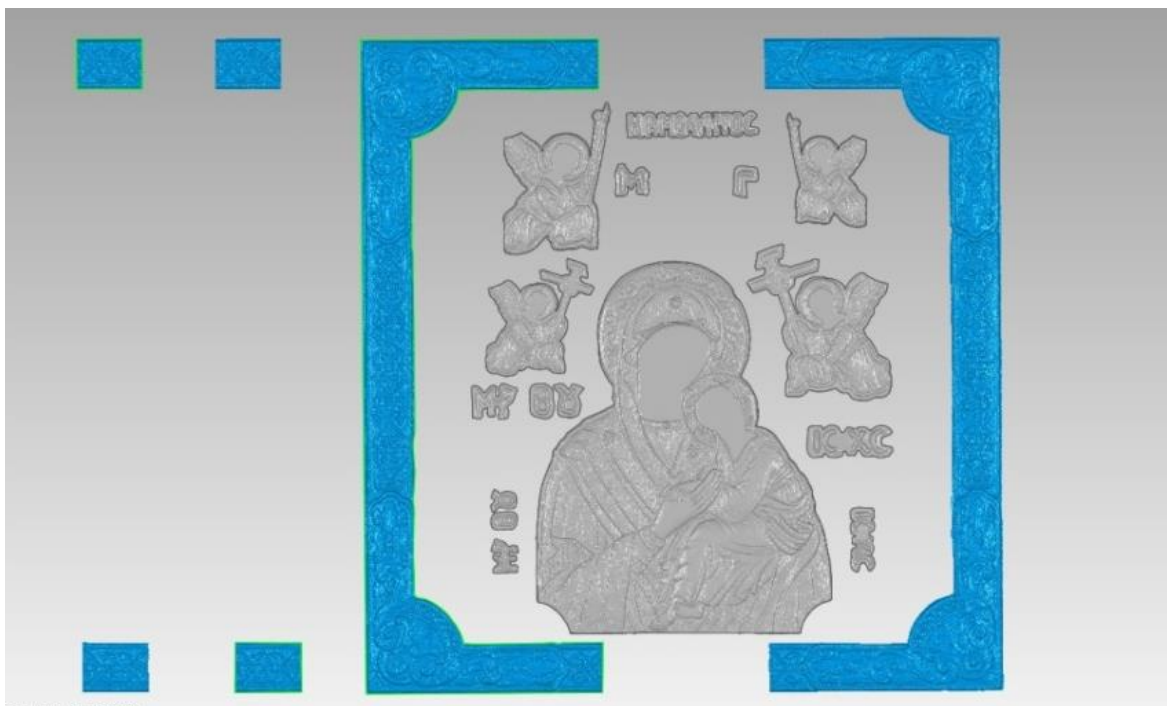
Βήμα 3<sup>ο</sup>: Στο στάδιο αυτό πραγματοποιήθηκε η αντιγραφή του τμήματος με την χρήση της εντολής “Mirror” ως προς το επίπεδο που ορίστηκε το οποίο ήταν παράλληλο ως προς την μία του πλευρά.

Βήμα 4<sup>ο</sup>: Το επόμενο βήμα ήταν να δημιουργηθεί ο χώρος στα τμήματα της κορνίζας που είχαν μείνει και αυτό πραγματοποιήθηκε με την χρήση της εντολής “Object Mover” και μετέπειτα η μετακίνηση του αρχικού τμήματος και του τμήματος που αντιγράφηκε.

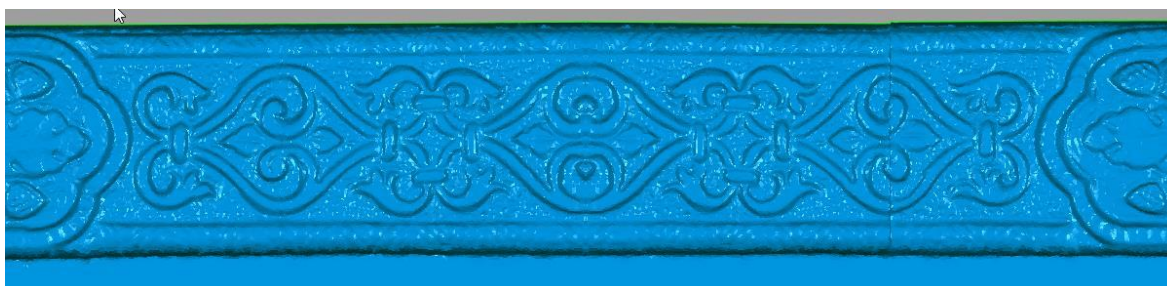
Βήμα 5<sup>ο</sup>: Τελικά για να ενωθούν όλα τα τμήματα και να δημιουργηθεί ένα ωραίο αισθητικό αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκε η εντολή “Fill Single” και η υποεντολή της “Partial” που δίνει την δυνατότητα να γεμίζονται κενά χωρίς απαραίτητα να είναι κλειστό σχήμα (τρύπα). Η περιγραφή της εντολής αυτής παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η προσθήκη του τμήματος αυτού της κορνίζας έχει ένα πλεονέκτημα το οποίο δίνει την δυνατότητα μεγένθυσης κατά πλάτος χωρίς την αναλογική μεγένθυση που θα είχε επιτευχθεί με την χρήση της εντολής “Scale”.

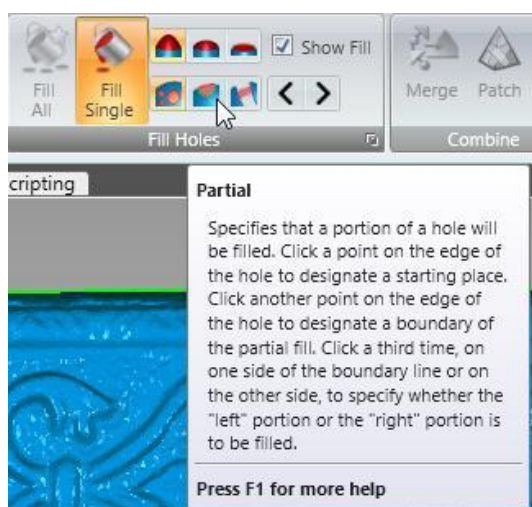




Σχήμα 4.11 : Παρουσίαση των κομμένων και αντιγραμμένων τμημάτων της κορνίζας πριν την εννοποίησή τους.



Σχήμα 4.12 : Επάνω τμήμα κορνίζας μετά την ενοποίηση τους .



Σχήμα 4.13 : Παρουσίαση της εντολής “Fill Single” και της υποεντολής της “Partial”

Στο σημείο αυτό έγινε η πρώτη προσπάθεια ενοποίησης όλων των αντικειμένων σε ένα ενιαίο μοντέλο επιφάνειας ή οποία δεν στέφθηκε με επιτυχία για λόγους που δεν έγιναν αντιληπτοί από την αρχή δεν ήταν εύκολο να προνοηθούν. Η ένωση τους πραγματοποιήθηκε με την χρήση της εντολής “Fill Single” και με τον συνδυασμό των υποεντολών την “Hole”, “Partial”, και “Bridge” στα σημεία που κρίθηκαν απαραίτητες.

Το γεγονός ότι η εικόνα είναι χειροποίητη και κατ’επέκταση τα διάφορα τμήματα της είναι σε διαφορετικά επίπεδα καθώς και ότι αρκετά αντικείμενα μετακινήθηκαν κατά πολύ σε σχέση με τις αρχικές τους θέσεις, οδήγησε το πρόγραμμα να δημιουργήσει ένα πρόβλημα το οποίο δεν ήταν αισθητικό αλλά ούτε σωστό από τεχνικής απόψεως. Αυτό ήταν το ανάγλυφο στον κενό χώρο της σύνθεσης που απεικονίζεται στο σχήμα 4.14 το οποίο απαρτίζεται από τα υψώματα και τα κοιλώματα τα οποία βεβαίως δεν ήταν επιθυμητά.

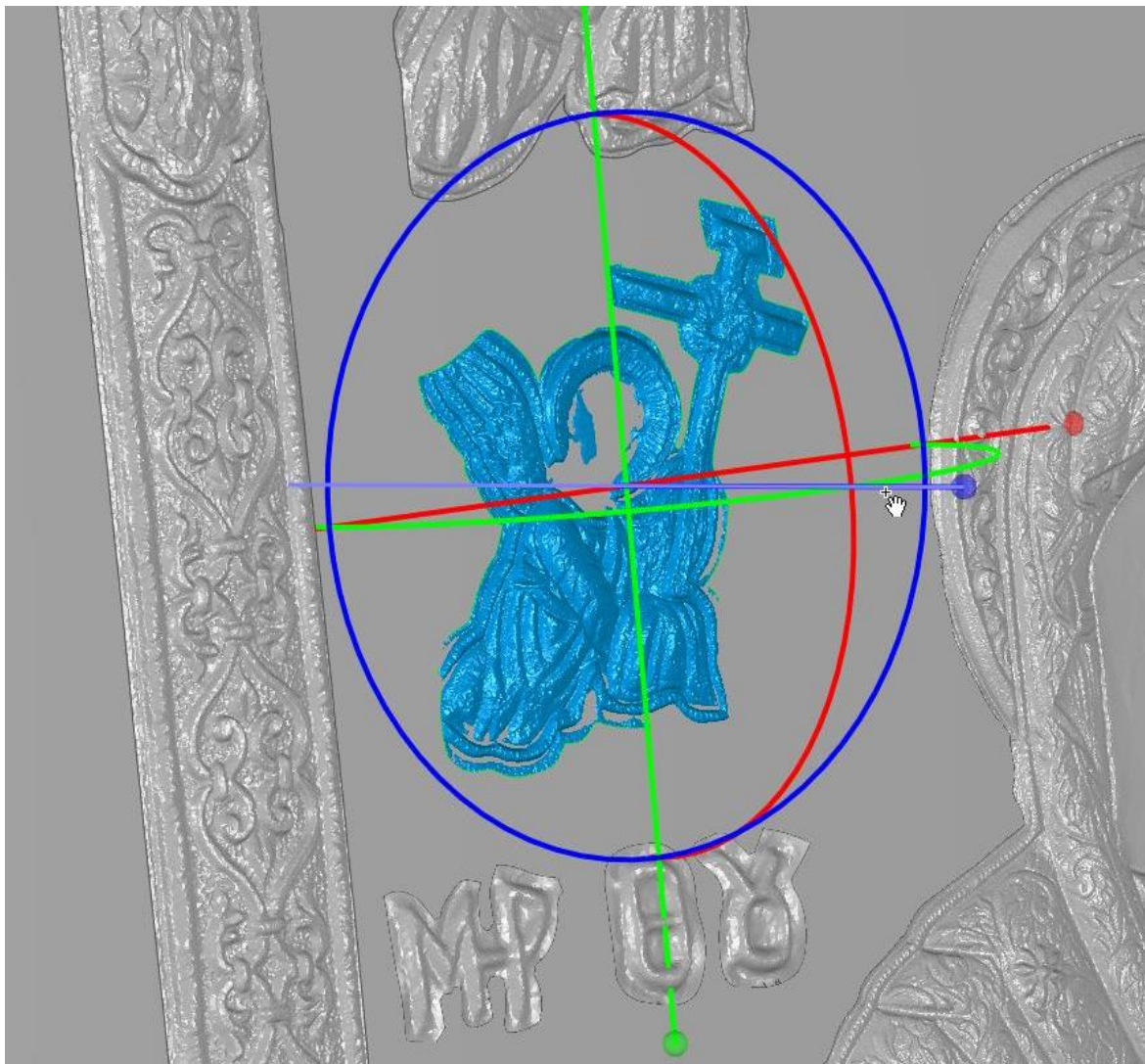


Σχήμα 4.14 : Εμφάνιση του προβλήματος που υπήρξε κατά την ένωση των τμημάτων απο όψη υπό γωνία για την καλύτερη εμφάνιση του ανάγλυφου που δημιουργήθηκε.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, επινοήθηκε μια διαδικασία η οποία περιγράφεται αναλυτικά στα παρακάτω βήματα:



Βήμα 1<sup>ο</sup> : Επανατοποθέτηση όλων το αντικειμένων ξεχωριστά πάνω σε ένα επίπεδο που δημιουργήθηκε και απεικονίζεται με χρώμα γκρι στο σχήμα 4.15. Το επίπεδο αυτό δημιουργήθηκε με σκοπό απλά την ευθυγράμμιση των αντικειμένων και είχε ως αναφορά το χαμηλότερο σημείο της εικόνας στον άξονα Z. Η μετακίνησε αυτή έγινε αυτή τη φορά και στους 3 άξονες και με πραγματοποιήθηκε με την χρήση της εντολής “Exact Object Mover”.

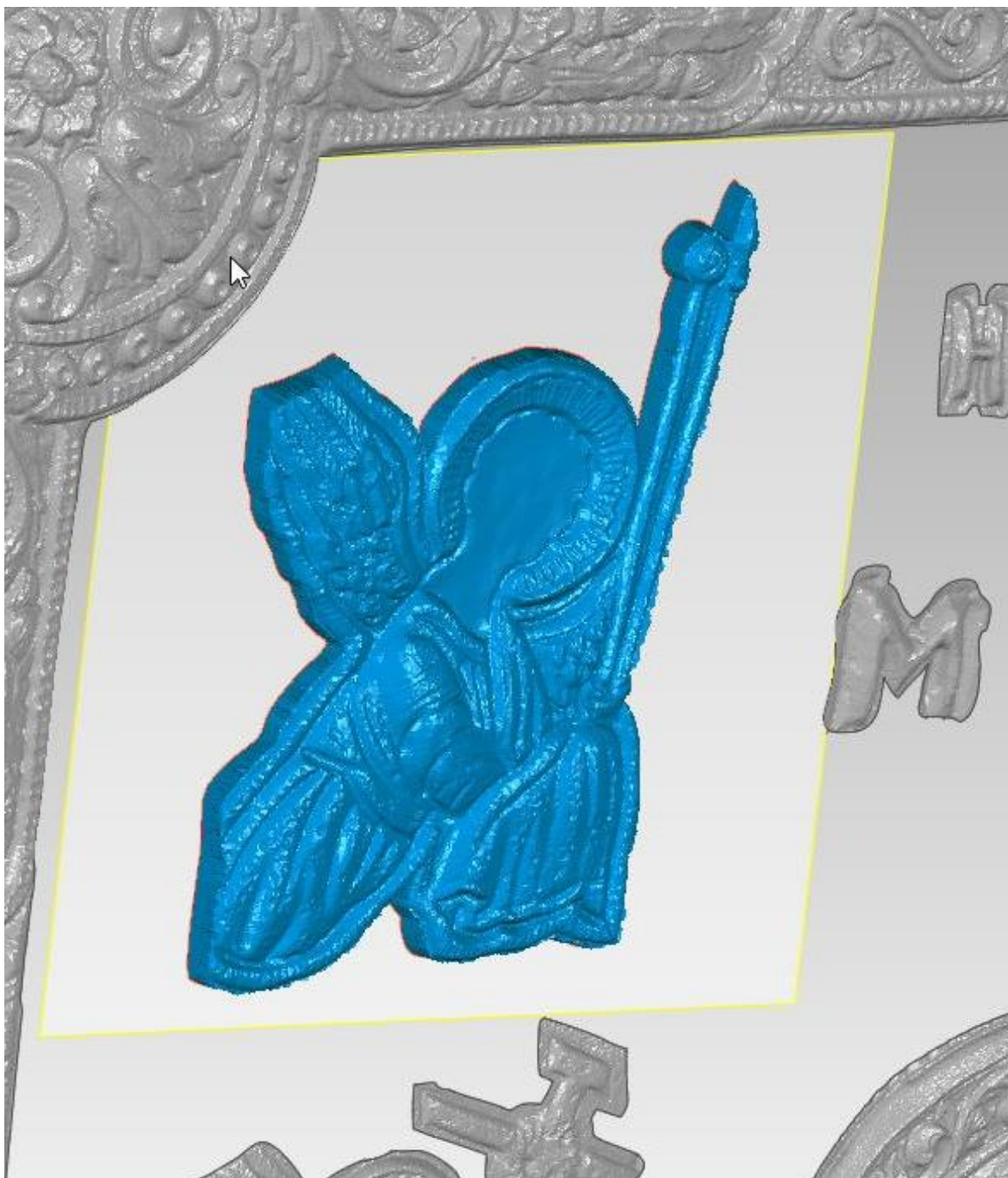


Σχήμα 4.15 : Στιγμιότυπο της επανατοποθέτησης των αντικειμένων ως προς το επίπεδο που δημιουργήθηκε

Βήμα 2<sup>ο</sup> : Σε αυτό το σημείο έγινε η προβολή των ορίων (συνόρων) του καθενός αντικειμένου ξεχωριστά σε ένα επίπεδο το οποίο αυτή την φορά δεν δημιουργήθηκε απλώς ορίστηκε από τον χρήστη με την θέση του να βρίσκεται κοντά στο επίπεδο που είχε δημιουργηθεί προηγουμένως για την ευθυγράμμιση αλλά από την αντίθετη πλευρά (πίσω μέρος) της εικόνας. Αυτό πραγματοποιήθηκε γιατί έτσι τα αντικείμενα επαναπροσδιορίστηκαν και βρέθηκαν όλα στο ίδιο επίπεδο αλλά αυτή τη φορά χωρίς να έχουν ανισοεπίπεδα από την κοπή τους όπως είχαν την προηγούμενη φορά.

Ένα παράδειγμα της προβολής αυτής παρουσιάζεται στο σχήμα 4.16 με αυξημένη την απόσταση του επιπέδου που έγινε η προβολή έτσι ώστε να είναι ορατή η διαφορά από τα πλαίσιά του. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στο τελικό μοντέλο επιφάνειας

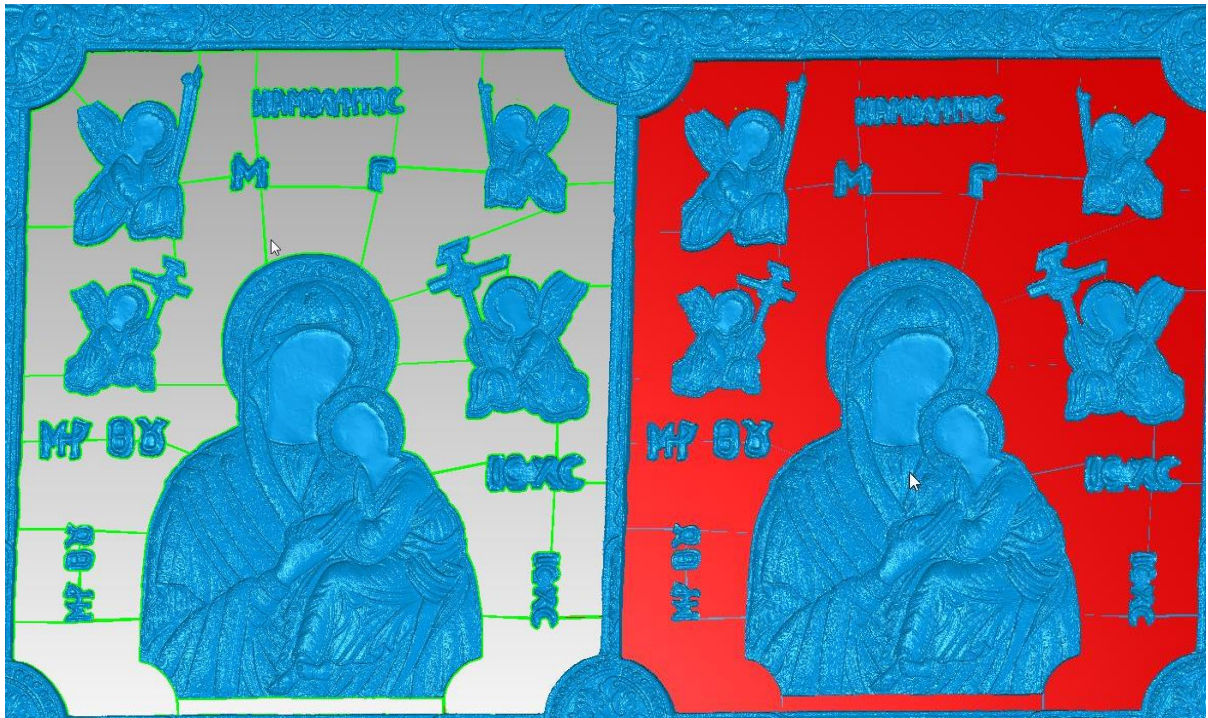
χρησιμοποιήθηκε πολύ μικρότερη απόσταση ακριβώς τόση ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα αλλά χωρίς να παρουσιαστεί κανένα πρόβλημα.



Σχήμα 4.16 : Παρουσίαση ενός σταδίου της προβολής των αντικειμένων στο επίπεδο που ορίστηκε

Βήμα 3<sup>ο</sup> : Σε τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκε η σύνθεση των επιμέρους τμημάτων με τις βελτιωμένες θέσεις του αλλά και συνορογραμμές τους. Χρησιμοποιήθηκε η εντολή “Fill Single” και με τον συνδυασμό των υποεντολών της : “Hole”, “Partial”, και “Bridge” όπως παρουσιάζονται και στο σχήμα 4.17. Η εμφανιζόμενη χρώματος κόκκινης επιφάνειας αποτελείται από τα τρίγωνα που δημιουργήθηκαν για την κάλυψη του κενού χώρου καθώς και την ενοποίηση όλων των τμημάτων σε ένα ενιαίο μοντέλο επιφάνειας.





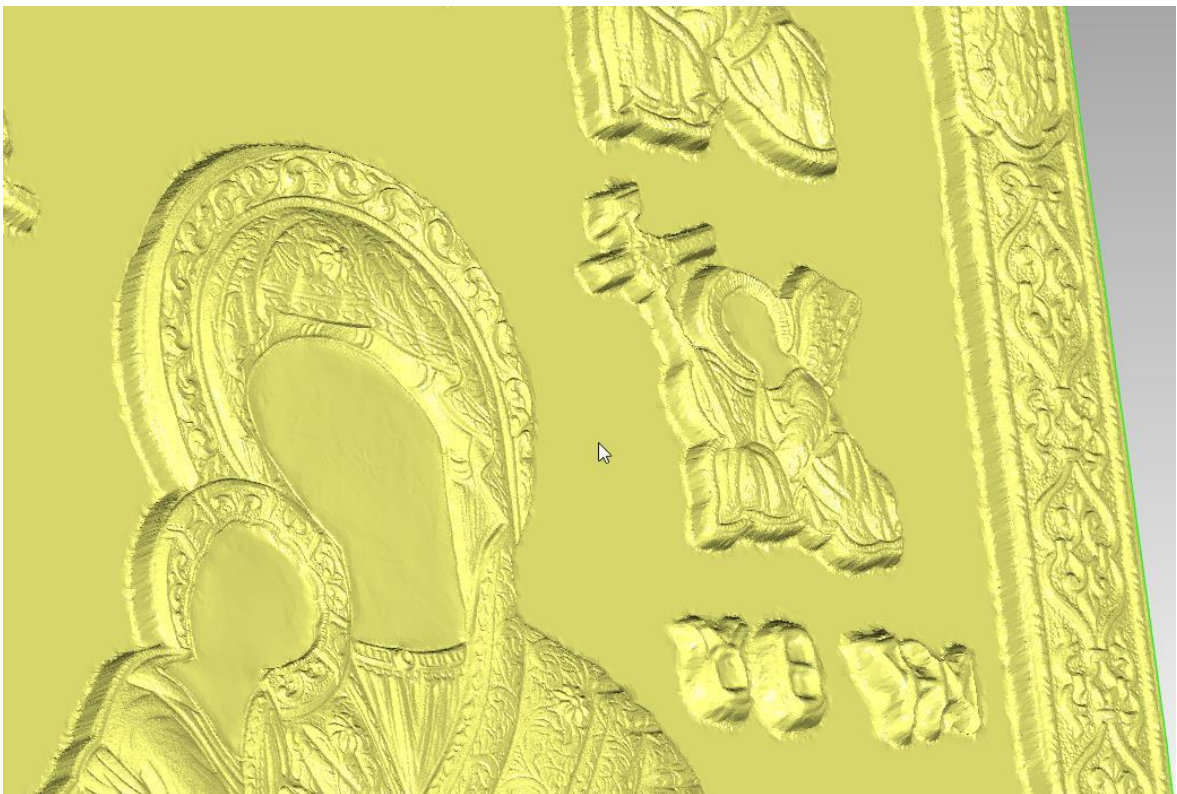
Σχήμα 4.17 : Εμφάνιση της διαδικασίας ενοποίησης των τμημάτων

Στα σημεία που δημιουργούνταν ανάγλυφες επιφάνειες με την βελτίωση αυτή, παρατηρείται μια ενιαία επιφάνεια ομοιόμορφη και επίπεδη όπως θα ήταν επιθυμητό. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 4.17 το τελικό αποτέλεσμα είναι αισθητικό και ομοιογενές.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι στο τελικό δοκίμιο δεν είναι τόσο μεγάλη η προβολή των συνороγραμμών και ότι ο λόγος που τονίστηκε τόσο σε αυτές τις απεικονίσεις είναι δοκιμαστικός και για δοθεί έμφαση στο αποτέλεσμα.



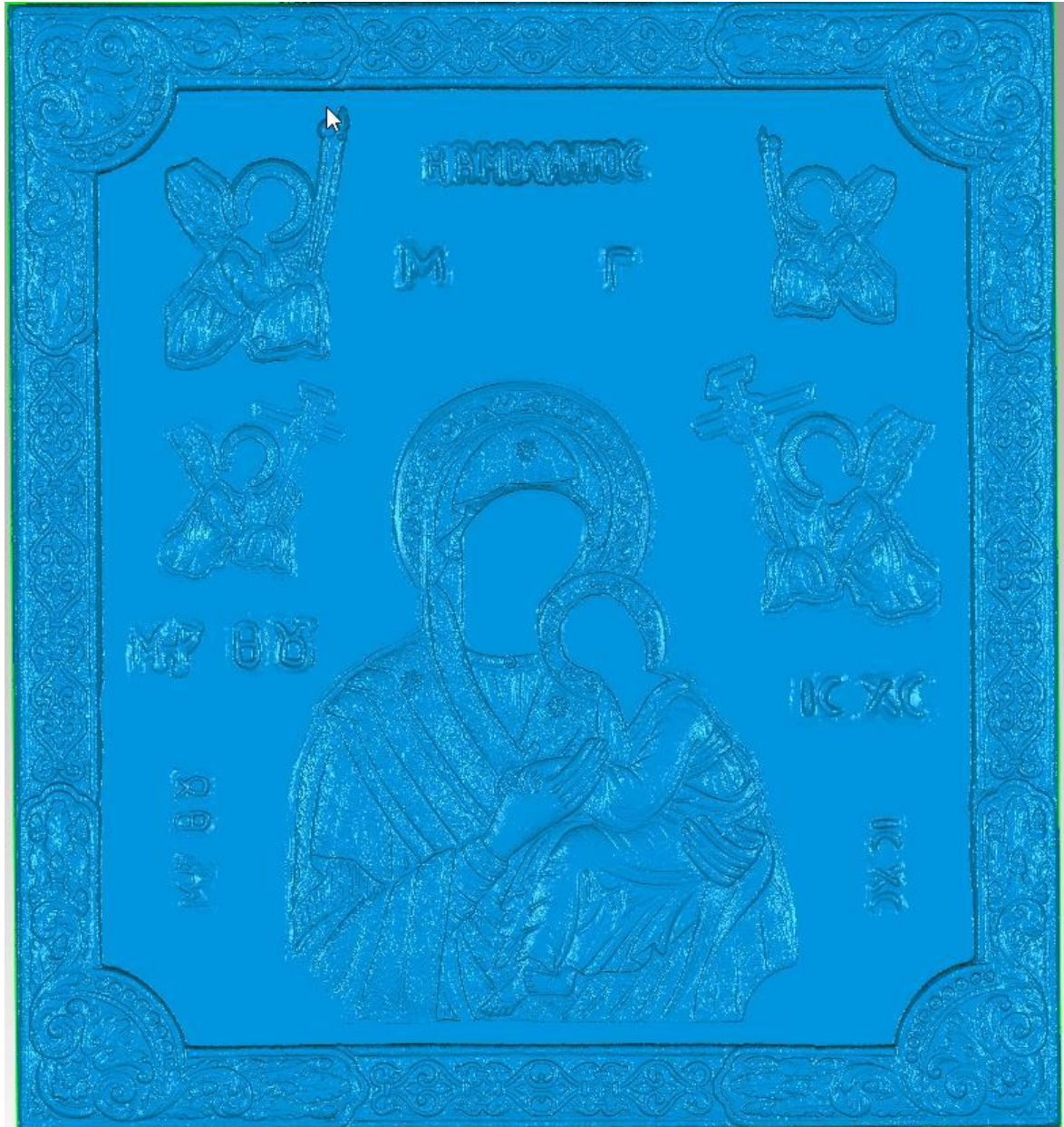
Σχήμα 4.17: Παρουσίαση του δοκιμαστικού μοντέλου επιφανείας της σύνθεσης μετά την βελτίωση που περιγράφηκε παραπάνω



Σχήμα 4.18 : Παρουσίαση του δοκιμαστικού μοντέλου επιφανείας της σύνθεσης απο την πίσω του όψη



Πρέπει να αναφερθεί ότι η πίσω επιφάνεια όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.18 πρέπει να είναι συνεχόμενη και να είναι ένα ενιαίο πλέγμα χωρίς να έχει διαφορετικά επίπεδα και ανεξάρτητα τμήματα, έτσι ώστε να μπορεί να αποθηκευτεί σε μορφή .stl και να μπορέσει να βγει κώδικας για την περεταίρω επεξεργασία και κοπή της σε CNC που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Αυτό αναφέρεται γιατί κατά την δοκιμή διαφόρων εντολών παρατηρήθηκαν αλληλοεπικαλύψεις του πλέγματος οι οποίες ήταν εμφανείς μόνο από την πίσω όψη αλλά θα δημιουργούσαν προβλήματα και στην μπροστινή μελλοντικά.



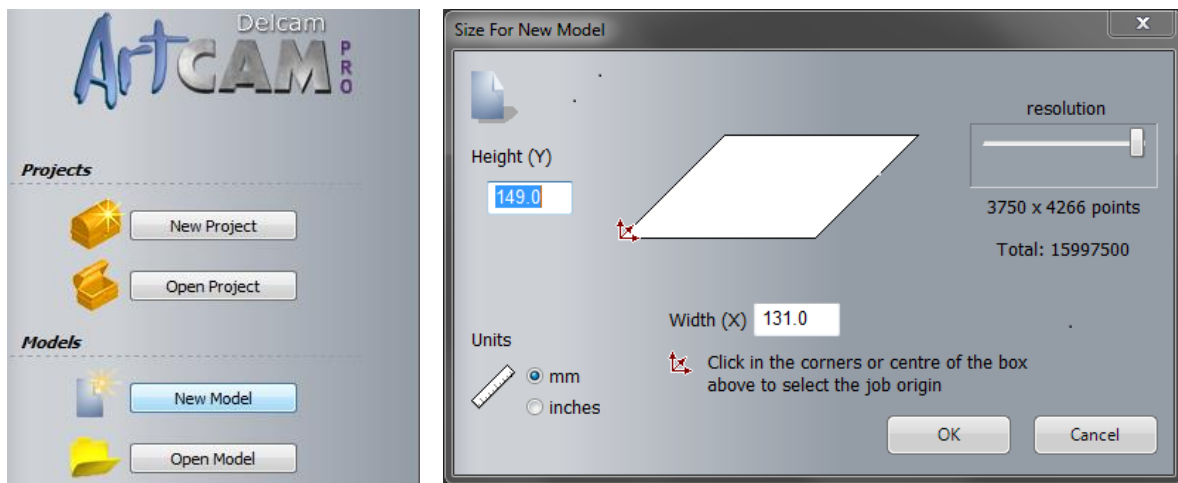
Σχήμα 4.13 : Ολόκληρη η απεικόνιση του μοντέλου επιφανείας της τελικής σύνθεσης

## 5. ΚΩΔΙΚΑΣ ΚΑΘΟΔΗΓΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία δημιουργίας του κώδικα καθοδήγησης (G-code) του κέντρου κατεργασίας η οποία στην συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα ArtCAM v.2012. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί η κατεργασία του τελικού δοκιμίου στη εργαλειομηχανή φρεζαρίσματος ψηφιακής καθοδήγησης (CNC) DMU 50 eco της εταιρίας DMG.

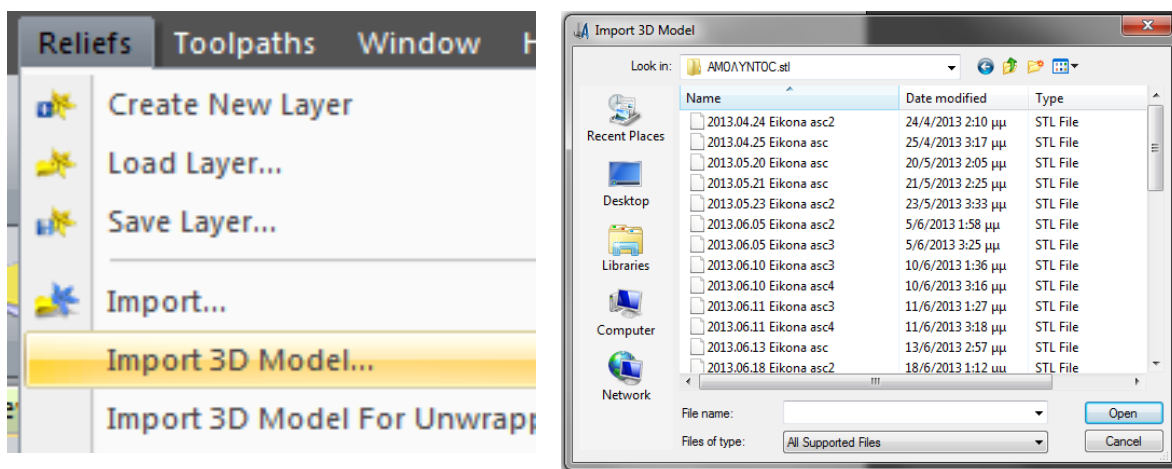
Βήμα 1ο : Αρχικά έγινε η δημιουργία ενός μοντέλου στο πρόγραμμα και ορίσθηκαν οι αρχικές διαστάσεις όπως φαίνονται στο σχήμα 5.1.

Μετά την επιλογή της προηγούμενης εντολής εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο πρέπει να εισαχθούν οι διαστάσεις του νέου μοντέλου που θα δημιουργηθεί.



Σχήμα 5.1 : Παρουσίαση της αρχικής εικόνας δημιουργίας Νέου μοντέλου και παράθυρο για την εισαγωγή των διαστάσεων του Νέου μοντέλου που θα δημιουργηθεί

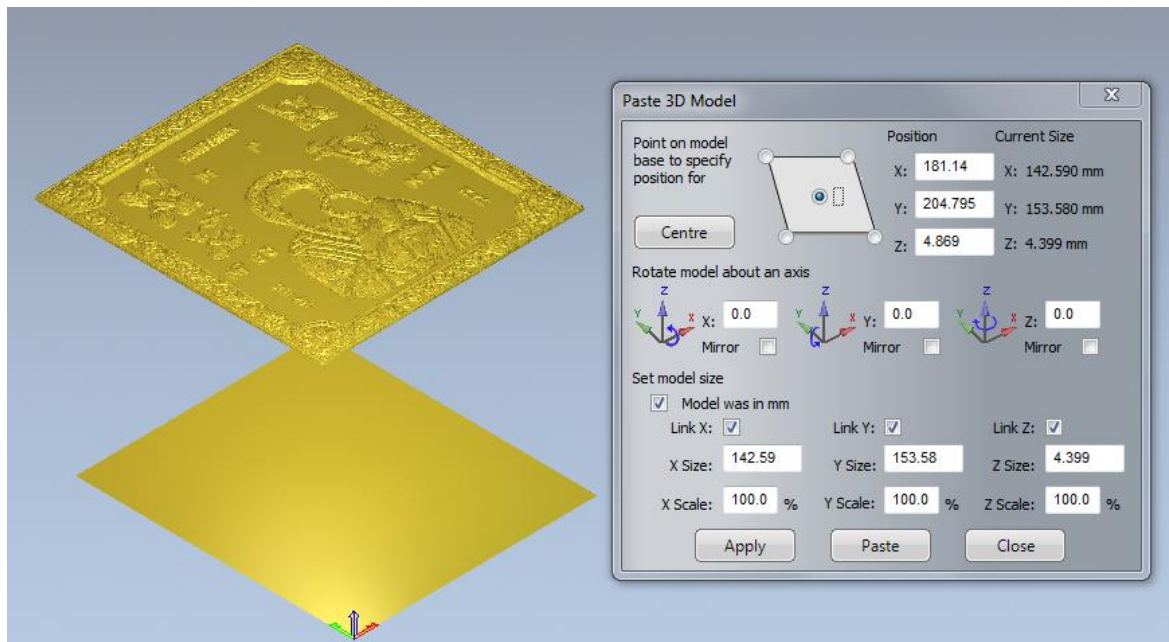
Βήμα 2ο : Στην πορεία εισάχθηκαν το τελικό μοντέλο επιφάνειας το οποίο είχε δημιουργηθεί από το Geomagic Studio 2012 στο προηγούμενο κεφάλαιο της μορφής .stl . Αυτό πραγματοποιήθηκε με την χρήση της εντολής “Relief” και της υποεντολής της “Import 3D model” όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2 : Εντολή για την εισαγωγή του μοντέλου επιφάνειας και παράθυρο για επιλογή

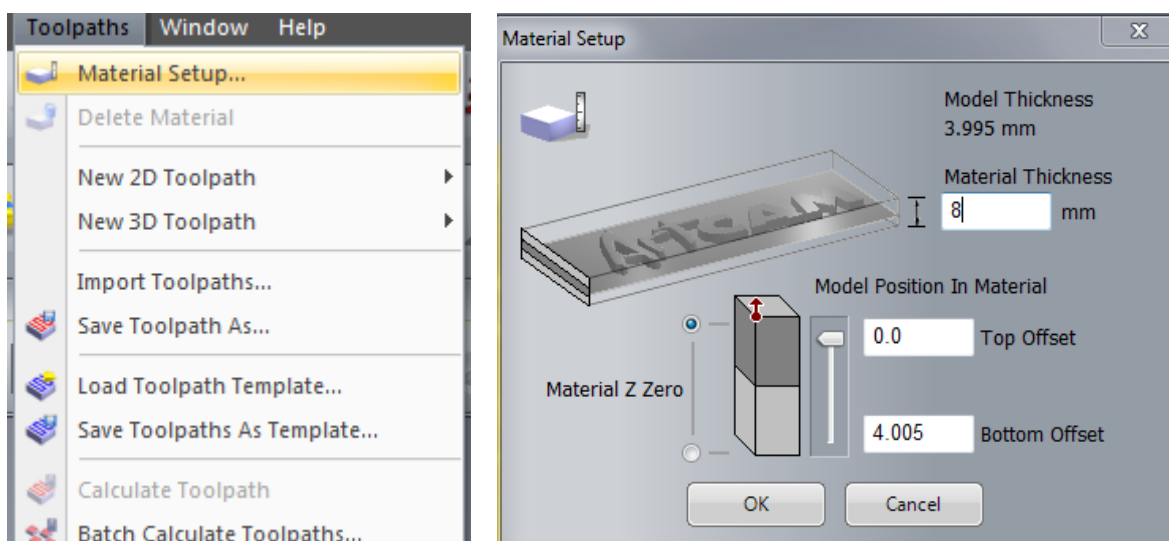


Βήμα 3<sup>ο</sup> : Το επόμενο παράθυρο που ανοίγει αυτόματα μετά την επιλογή και την εισαγωγή του μοντέλου επιφάνειας είναι αυτό που εμφανίζεται στο σχήμα 5.3. Στο παράθυρο αυτό γίνεται η τοποθέτηση του μοντέλου επιφάνειας πάνω σε ένα επίπεδο διαστάσεων που ορίστηκαν από τον χρήστη στο προηγούμενο βήμα. Επίσης γίνεται και η περιστροφή του συστήματος συντεταγμένων ανάλογα με την εργαλειομηχανή. Στην προκειμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η εντολή “Centre” με την οποία το μοντέλο επιφάνειας ευθυγραμμίστηκε με το επίπεδο καθώς και το σύστημα αξόνων να ξεκινά από το κάτω αριστερό άκρο του μοντέλου.



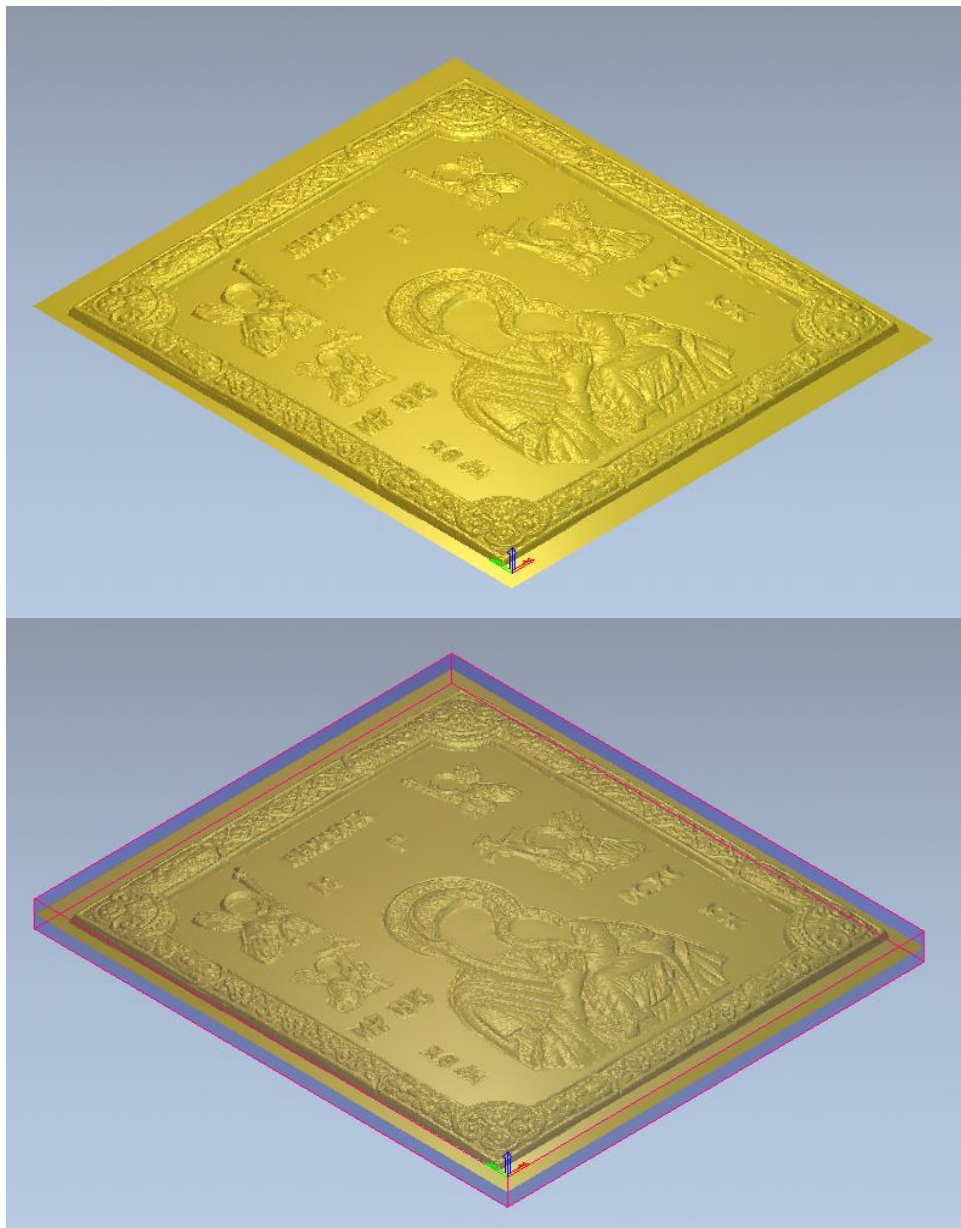
Σχήμα 5.3 : Τοποθέτηση του μοντέλου επιφάνειας πάνω στο επίπεδο

Βήμα 4<sup>ο</sup> : Στο σημείο αυτό γίνεται η εισαγωγή του υλικού έτσι ώστε να μπορέσει να υπολογίσει το πρόγραμμα τα διαφορετικά πάχη και τις διαδρομές που θα ακολουθήσει. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4 γίνεται η εισαγωγή του πάχους του υλικού για να υπολογιστεί συναρτήσει του βάθους του μοντέλου ο κώδικας καθοδήγησης όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 5.4 : Εισαγωγή του πάχους του υλικού

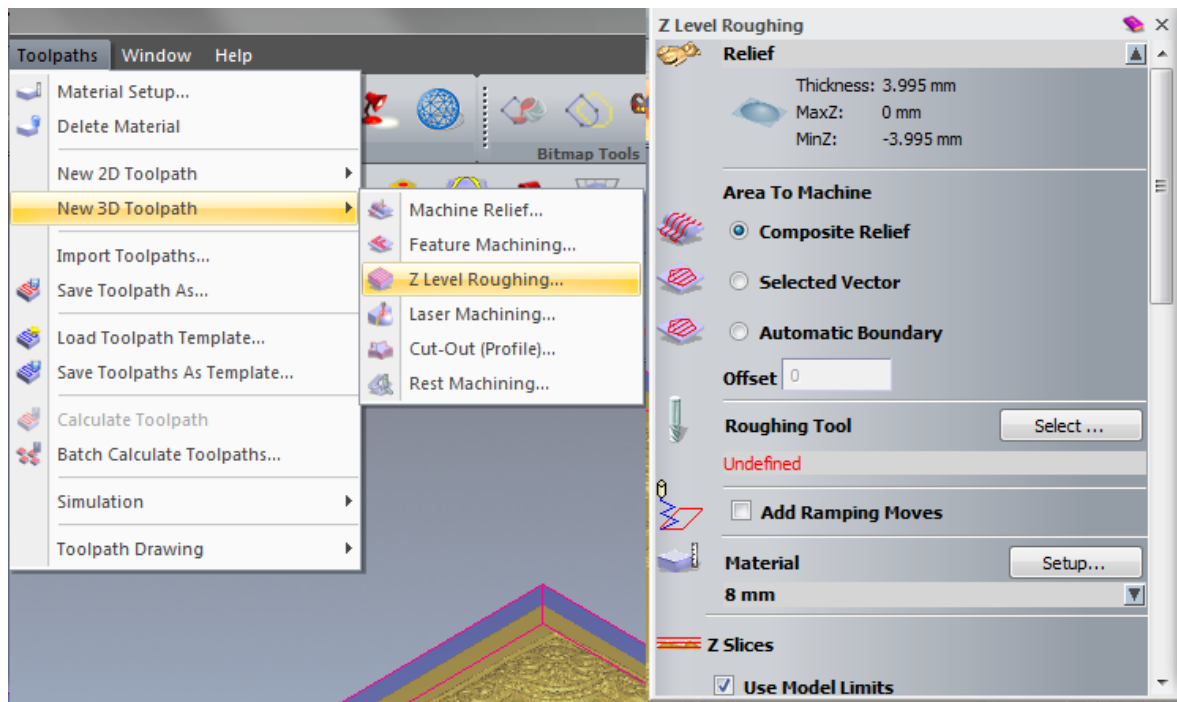
Στο σχήμα 5.5 φαίνεται το μοντέλο επιφάνειας πριν και μετά την εισαγωγή του υλικού όπου δίνεται μία πρώτη εντύπωση για το πώς είναι και το πώς θα γίνει μελλοντικά το δοκίμιο.



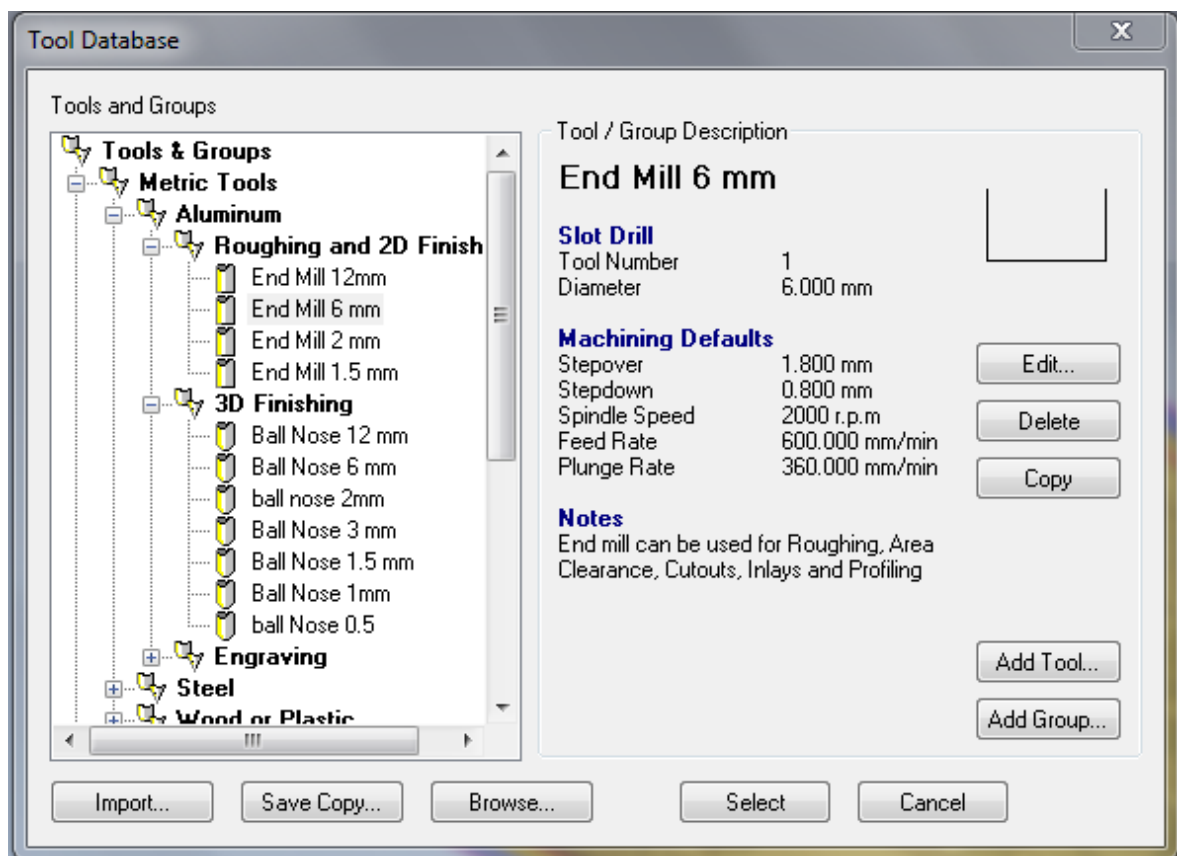
Σχήμα 5.5 : Αναπαράσταση μοντέλου επιφάνειας χωρίς και με το υλικό

Βήμα 5<sup>ο</sup> : Η εισαγωγή των μονοπατιών κατεργασίας (Toolpaths) γίνεται με την χρήση της εντολής “Toolpaths” της υποεντολής της “New 3D Toolpath” και της “Z Level Roughing” όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 στην περίπτωση εκχόνδρισης . Στην συνέχεια με την επιλογή της εντολής “Roughing Tool” εμφανίζεται το παράθυρο στο οποίο γίνεται η επιλογή του κοπτικού εργαλείου ανάλογα με το είδος της κατεργασίας και του υλικού όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7.

Η ρύθμιση των παραμέτρων της κατεργασίας όπως η ταχύτητα περιστροφής, ταχύτητα πρόωσης, το βήμα του κοπτικού και πολλές άλλες γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.6 : Επιλογή την δημιουργίας διαδρομής εργαλείου (Toolpath) για εκχόνδριση (Roughing)



Σχήμα 5.7 : Επιλογή κοπτικού εργαλείου

Σχήμα 5.8 : Ρύθμιση των παραμέτρων της κατεργασίας

Αναλυτικά οι παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν στην συγκεκριμένη κατεργασία με κοπτικό εργαλείο εκχόνδρισης “End Mill” είναι οι ακόλουθοι :

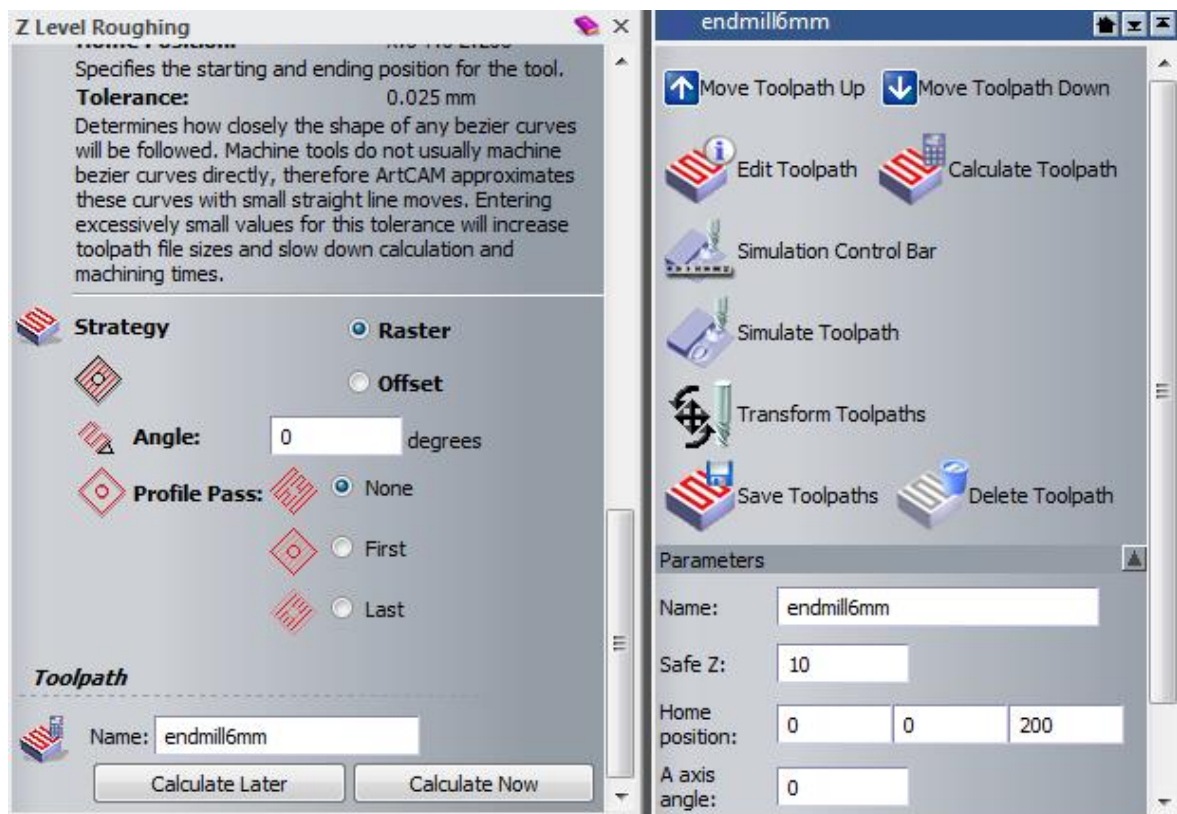
- Διάμετρος κοπτικού με μονάδα μέτρησης (mm).
- “Stepdown” το αξονικό βάθος κοπής με μονάδα μέτρησης (mm).
- “Stepover” το ακτινικό βάθος κοπής μονάδα μέτρησης (mm) ή ποσοστό τοις εκατό της διαμέτρου.
- “Spindle Speed” ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου με μονάδα μέτρησης (rpm)
- “Feed Rate” πρόωση με μονάδα μέτρησης (mm/min)
- “Plunge Rate” ταχύτητα εισχώρησης με μονάδα μέτρησης (mm/min)

Βήμα 6<sup>ο</sup> : Μετά την επιλογή και την ρύθμιση των παραμέτρων του κοπτικού πρέπει να γίνει ο υπολογισμός της διαδρομής εργαλείου χρησιμοποιώντας την εντολή “Calculate Now” ή την εντολή “Calculate Toolpath” όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 5.9 στις εικόνες αντίστοιχα.

Βήμα 7<sup>ο</sup> : Στο σημείο αυτό μπορεί να γίνει η προσομοίωση της διαδρομής του εργαλείου που θα ακολουθηθεί βάσει του κώδικα καθοδήγησης που σχεδιάστηκε το οποίο πραγματοποιείται με την χρήση της εντολής “Simulation Toolpath” ή της “Simulation Control Bar” για καλύτερο έλεγχο των ταχυτήτων, όπως παρατηρείται στο δεξί παράθυρο στο σχήμα 5.9.

Μια αναπαράσταση της προσομοίωσης των μονοπατιών καθοδήγησης γίνεται στο σχήμα 5.10 στο οποίο φαίνονται τα τελικά στάδια της προσομοίωσης των τριών διαφορετικών διαδρομών εργαλείου που υπολογίστηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Στο σχήμα 5.11 παρατηρείται η πλάγια όψη αυτών.



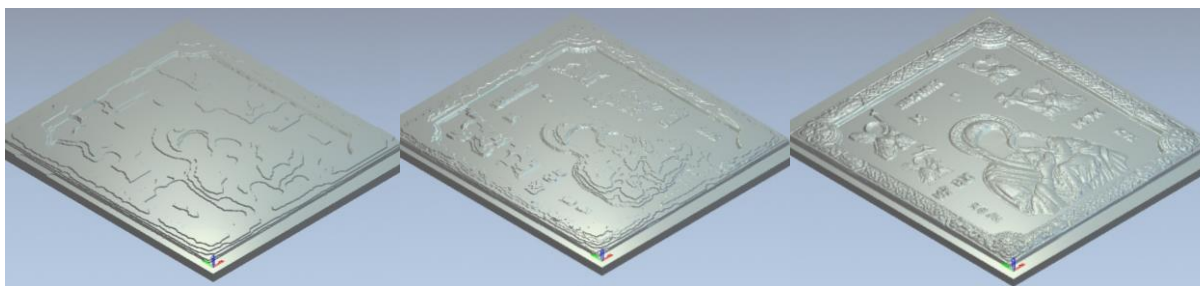


Σχήμα 5.9 : Επιλογή της εντολής για τον υπολογισμό της διαδρομής εργαλείου (Toolpaths)

Για την κατανόηση των λεπτομερειών και της ακρίβειας που μπορεί να επιτευχθεί στην προσομοίωση της διαδρομής εργαλείου ανάλογα με τις ρυθμίσεις των παραμέτρων, και την επιλογή κοπτικού εργαλείου, παρουσιάζεται στο [σχήμα 5.12](#) ένα πολύ κοντινό σημείο της κορνίζας με καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων στο τελικό στάδιο της προσομοίωσης διαφορετικών διαδρομών εργαλείου φινιρίσματος.



Σχήμα 5.10 : Προσομοίωση τριών διαδρομών εργαλείου σε πρόσοψη

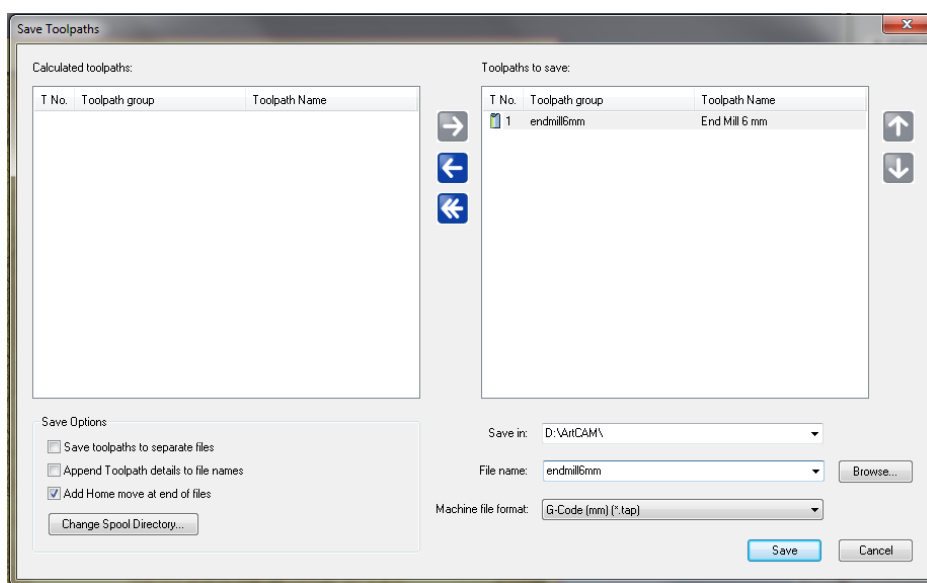


Σχήμα 5.11 : Προσομοίωση τριών διαδρομών εργαλείου σε πλάγια όψη



Σχήμα 5.12 : Απεικόνιση λεπτομερειών τριών διαφορετικών διαδρομών εργαλείου φινιρίσματος στο στάδιο της προσομοίωσης

Βήμα 8<sup>ο</sup> : Σε τελικό στάδιο γίνεται η αποθήκευση της διαδρομής εργαλείου “Toolpath” σε επιθυμητή μορφή. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας την εντολή “Save Toolpath”. Στην πορεία ανοίγει το παράθυρο που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.13 στο οποίο γίνεται η επιλογή της διαδρομής εργαλείου που είναι επιθυμητό για αποθήκευση καθώς και της μορφής στην οποία θα γίνει η αποθήκευση. Στην συγκεκριμένη εργασία το αρχείο ήταν αναγκαίο να αποθηκευτεί σε μορφή “G-Code .tap” έτσι ώστε να μπορεί να αναγνωρισθεί από την εργαλειομηχανή φρεζαρίσματος ψηφιακής καθοδήγησης (CNC) DMU 50 eco της εταιρίας DMG.



Σχήμα 5.13 : Αποθήκευση της διαδρομής εργαλείου (Toolpaths)

Οι παραπάνω εντολές που περιγράφηκαν υπάρχουν επίσης και στην κεντρική μπάρα του προγράμματος με τις ίδιες ονομασίες δεν αναφέρθηκαν χάριν συντομίας.

Αξιοσημείωτο είναι το ότι η διαδικασία που περιγράφηκε στα παραπάνω βήματα αποτελούσε τα βήματα που είναι απαραίτητα για την κατεργασία της εκχόνδρισης (Roughing). Στην περίπτωση που είναι επιθυμητή ή κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη και άλλων μονοπατιών κατεργασίας (Toolpaths) επαναλαμβάνεται η διαδικασία από το Βήμα 5<sup>ο</sup> και μετά με τις όποιες αλλαγές κοπτικών εργαλείων ή ρυθμίσεις των παραμέτρων κοπής.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν οι εξής διαδρομές εργαλείου όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1 με τις παραμέτρους των συνθηκών κοπής που φαίνονται στον πίνακα 5.2.

Κατεργασία	Τύπος κατεργασίας	Κοπτικά εργαλεία	Διάμετρος (mm)
1 <sup>η</sup>	Εκχονδινση (Roughing)	End Mill	6
2 <sup>η</sup>	Εκχονδινση (Roughing)	End Mill	2
3 <sup>η</sup>	Φινίρισμα (Finishing)	Ball Nose	2

Πίνακας 5.1 : Κατεργασίας μονοπατιών

Κατεργασία	Stepover (mm)	Stepdown (mm)	Spindle Speed (rpm)	Feed Rate (mm/min)	Plunge Rate (mm/min)
1	1.800	0.800	2000	300.000	180.000
2	0.600	0.500	2000	250.000	120.000
3	0.100	0.100	6000	120.000	60.000

Πίνακας 5.2 : Παράμετροι συνθηκών κοπής των κατεργασιών

## 6. ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα στάδια της κατεργασίας που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια κατασκευής του τελικού καλούπιδι αποτύπωσης στην εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος ψηφιακής καθοδήγησης (CNC) DMU 50 eco της εταιρίας DMG σχήμα 6.1 σε συνεργασία με την συσκευή προρύθμισης εργαλείων MICROSET Uno 115 eco που προσφέρει σημαντική οικονομία χρόνου και ακρίβεια στις μετρήσεις των εργαλείων και την έγκαιρη αναγνώριση φθαρμένων εργαλείων. Η συσκευή αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2. Πρωτού την κατασκευή του τελικού καλούπιδι θα γίνει μια σύντομη αναφορά στην κατασκευή του δοκιμαστικού δοκιμίου.



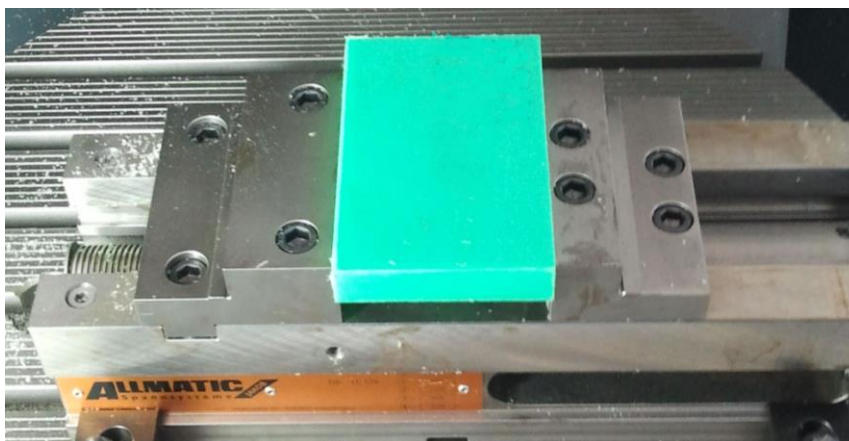
Σχήμα 6.1 : Εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος ψηφιακής καθοδήγησης (CNC) DMU 50 eco

Το δοκιμαστικό δοκίμιο που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3 στο αποτελείται από πλαστικό υλικό πράσινου χρώματος και οι διαστάσεις του οποίου είναι : 140 mm μήκος, 100 mm πλάτος και 20 mm βάθος. Εφαρμόστηκαν οι ίδιες συνθήκες κοπής (κοπτικά εργαλεία, ρυθμίσεις παραμέτρων) με τις συνθήκες που θα εφαρμοστούν στο τελικό καλούπι αποτύπωσης έτσι ώστε να γίνει μια προβα για το τελικό αποτέλεσμα.

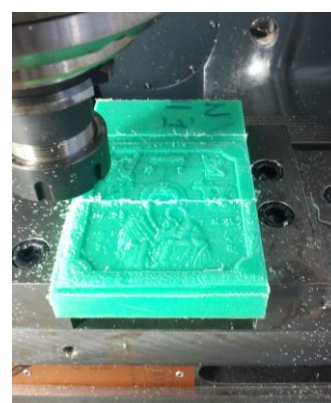
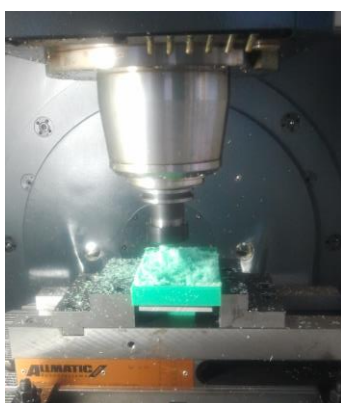


Σχήμα 6.2 : Συσκευή προρύθμισης εργαλείων MICROSET Uno 115 eco



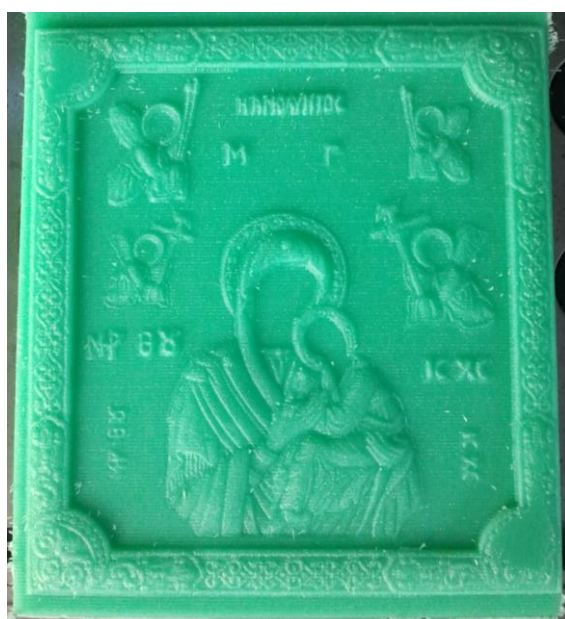


Σχήμα 6.3 : Δοκιμαστικό πλαστικό δοκίμιο πριν την κατεργασία του



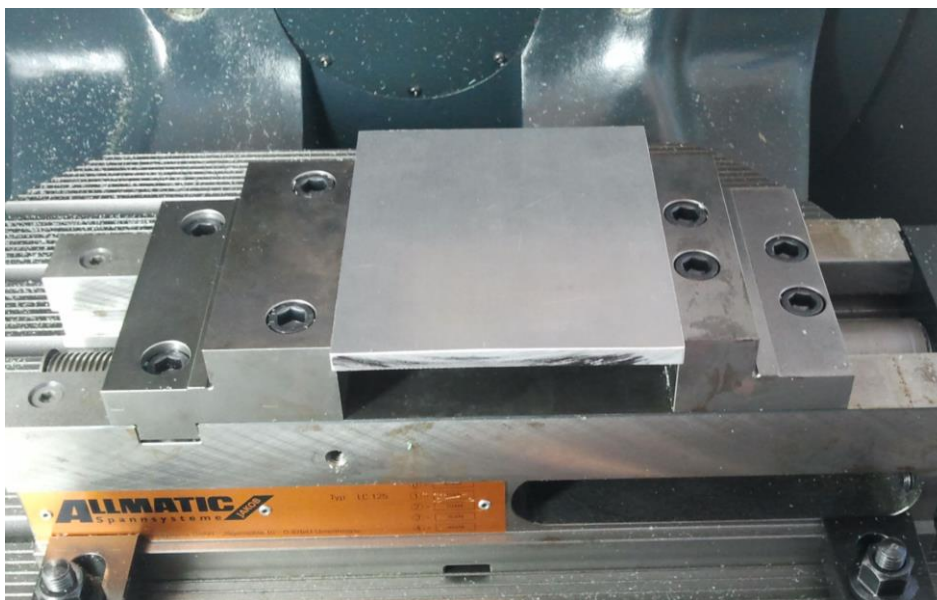
Σχήμα 6.4 : Διαδοχικά στάδια κατεργασίας διαφορετικών μονοπατιών (Toolpaths)

Στο δοκιμαστικό δοκίμιο λόγω των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής τα απόβλητα τις κατεργασίας παρέμεναν κολιμένα επάνω στο υπόλοιπο τεμάχιο χωρίς να επηρεάζουν την τελική επιφάνεια. Στο σχήμα 6.5 παρουσιάζεται το τελικό δοκιμαστικό δοκίμιο.



Σχήμα 6.5 : Δοκιμαστικό πλαστικό δοκίμιο

Σε τελευταίο στάδιο της εργασίας πραγματοποιήθηκε η κατασκευή του τελικού καλουπιού αποτύπωσης σε υλικό αλουμινίου AL-7075 και οι διαστάσεις του οποίου είναι : 149 mm μήκος, 131 mm πλάτος και 8 mm βάθος. Οι συνθήκες κοπής (κοπτικά εργαλεία, ρυθμίσεις παραμέτρων) ήταν ίδιες με τις συνθήκες που εφαρμόστηκαν στο δοκιμαστικό δοκίμιο αφού ήταν ικανοποιητική η ακρίβειά τους και το αισθητικό τους αποτέλεσμα. Μοναδική αλλαγή ήταν η κλιμάκωση του τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας στις νέες διαστάσεις του τελικού καλουπιού. Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζεται το δοκίμιο πρώτου γίνει η κατεργασία του.



Σχήμα 6.6 : Αρχικό ακατέργαστο δοκίμιο αλουμινίου

Σε επόμενο βήμα πραγματοποιήθηκε η πρώτη διαδρομή εργαλείου εκχόνδρισης (End Mill) διαμέτρου 6 χιλιοστών του οποίου το αποτέλεσμα παρατηρείται στο σχήμα 6.7.



Σχήμα 6.7 : Πρώτη διαδρομή εργαλείου με κοπτικό εργαλείο (End Mill 6mm)

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η δεύτερη διαδρομή εργαλείου εκχόνδρισης με κοπτικό εργαλείο (End Mill) διαμέτρου 2 χιλιοστών του οποίου το αποτέλεσμα παρατηρείται στο σχήμα 6.8.





Σχήμα 6.8 : Δεύτερη διαδρομή εργαλείου με κοπτικό εργαλείο (End Mill 2mm)

Σε τελικό στάδιο πραγματοποιήθηκε τη τρίτη διαδρομή εργαλείου φινιρίσματος (Finishing) με κοπτικό εργαλείο (Ball Nose) διαμέτρου 2 χιλιοστών το οποίο ήταν και το τελευταίο στάδιο της συνολικής κατεργασίας καθώς το αποτέλεσμα του ήταν σε πολύ μεγάλο βαθμό ικανοποιητικό και παρουσιάζεται στο σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9 : Τρίτη διαδρομή εργαλείου με κοπτικό εργαλείο (Ball Nose 2mm)

## 7. ΣΥΝΟΨΗ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η μία σύνοψη όλων των σταδίων της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων και διαπιστώσεων που προήλθαν από το πέρας της. Στην εργασία αυτή εξετάστηκε ο τρόπος με τον οποίο διασυνδέονται τρεις διαφορετικές διαδικασίες της αντίστροφης μηχανικής.

Σε αρχικό στάδιο πραγματοποιήθηκε η περιγραφή πλήθους εντολών για την επεξεργασία ενός νέφους σημείων (Point Cloud) με την χρήση του λογισμικού Geomagic Studio v.2012 το οποίο αποδείχθηκε ότι αποτελεί ένα σημαντικό αλλά και πολύ ευχρηστο εργαλείο για την διαδικασία αυτή.

Με την χρήση λοιπόν όλων των εντολών που προαναφέρθηκαν και χρησιμοποιώντας όλη την εμπειρία που αποκτήθηκε, έγινε η σύνθεση του τελικού μοντέλου επιφάνειας της σύνθεσης της εικόνας που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η διαδικασία αποδείχθηκε πολύ δημιουργική καθώς εμπειρείχε πολλά στάδια τα οποία στηρίζονταν στην κρίση του χρήστη του προγράμματος και όχι αποκλειστικά στις δυνατότητες του προγράμματος οι οποίες βεβαίως ήταν απαραίτητες. Βασικός στόχος σε όλη την διάρκεια αυτής της διαδικασίας ήταν η αποφυγή των πολλών παρεμβάσεων στα επιμέρους τμήματα του νέφους σημείων διότι ήταν επιθυμητό να διατηρηθεί η αρχική πληροφορία, η ακρίβεια. Ένας πολύ σημαντικός λόγος που είναι απαραίτητο να αναφερθεί ήταν ο σεβασμός προς τα απεικονιζόμενα πρόσωπα ο οποίος ήταν σημαντικός περιορισμός για τον τρόπο με τον οποίο θα γινόταν η σύνθεση και έπειτα η μετατροπή της εικόνας.

Όσον αφορά το στάδιο της εξαγωγής του κώδικα καθοδήγησης στο πρόγραμμα ArtCAM v.2012 διεξήχθη χωρίς προβλήματα καθώς αποτελεί μια καθορισμένη διαδικασία απαραίτητη στον χώρο του CAD/CAM. Οι δυνατότητες του προγράμματος αυτού είναι ποικίλες, η περιγραφή των οποίων δεν αποτελούσε κύριο σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σε τελικό στάδιο έγινε η κατεργασία του τελικού καλουπιού αποτύπωσης στην εργαλειομηχανή φραιζαρίσματος ψηφιακής καθοδήγησης (CNC) DMU 50 eco της εταιρίας DMG. Το αποτέλεσμα του οποίου είτε από τεχνική άποψη είτε από αισθητική ήταν ικανοποιητικό αρκετά παραπάνω από τις προσδοκίες που υπήρχαν στην αρχή της εργασίας. Παρόλες τις ελάχιστες τεχνικές δυσκολίες και χρονικές καθυστερήσεις που προέκυψαν, η διαστατική ακρίβεια και η τελική σύνθεση δικαίωσαν το αποτέλεσμα στο οποίο είναι δύσκολο να παρατηρηθεί τυχόν ατέλεια ή αστοχία.

Συμπερασματικά, οι διαδικασίες που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αποτελούν βασικές γνώσεις της εφαρμογής της αντίστροφης μηχανικής που αποκτήθηκαν από το πέρας της διπλωματικής εργασίας αυτής. Οι διαδικασίες αυτές βεβαίως μπορούν να εφαρμοστούν εκτός από τον κλάδο που αφορά την διάσωση και την αντιγραφή Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς, σε οποιοδήποτε άλλο κλάδο της Αντίστροφης Μηχανικής αναλόγως με τους στόχους της κάθε περίπτωσης.



## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zhou H. and Xue Z., 1987. Research and development of CAD/CAM in the Chinese shipbuilding industry. *Computers in Industry*, 8, 209-213.
- [2] Lee H.S. and Chang S.L., 2003. Development of a CAD/CAE/CAM system for a robot manipulator. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 100-104.
- [3] Herkommer F. and Bley B., 1996. CAD/CAM for the prefabrication of brickwork. *Automation in Construction*, 4, 321-329.
- [4] Wu T., Portheine F., Popovic A., Bast P., Wehmoeller M. and Radermacher K., 2003. An interface for the data exchange between CAS and CAD/CAM systems. *International Congress Series*, 1256, 703-709.
- [5] Tsitrou E.A., Northeast S.E. and Van Noort R., 2007. Evaluation of the marginal fit of three margin designs of resin composite crowns using CAD/CAM. *Journal of Dentistry*, 35, 68-73.
- [6] Quaas S., Rudolph H. and Luthardt R.G., 2007. Direct mechanical data acquisition of dental impressions for the manufacturing of CAD/CAM restorations. *Journal of Dentistry*, 35, 903-908.
- [7] Ciocca L., De Crescenzo F., Fantini M. and Scotti R., 2009. CAD/CAM and rapid prototyped scaffold construction for bone regenerative medicine and surgical transfer of virtual planning: A pilot study. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 33, 58-62.
- [8] Chang T.C., Wysk R.A. and Davis R.P., 1982. Interfacing CAD and CAM - A study in hole design. *Computers & Industrial Engineering*, 6, 91-102.
- [9] Kochan D., 1984. Integrated information processing for manufacturing—from CAD/CAM to CIM. *Computers in Industry*, 5, 311-318.
- [10] Dodonov S.B. and Visikirsky V.A., 1989. Interactive CAD/CAM in Engineering Industry. *Computers in Industry*, 11, 223-227.
- [11] Buxey G., 1992. CAD-CAM in Australia: flexibility quality and manufacturing strategy. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 5, 300-310.
- [12] Bettig B. and Shah J., 1999. An object-oriented program shell for integrating CAD software tools. *Advances in Engineering Software*, 30, 529-541.
- [13] Abouel Nasr E.S. and Kamrani A.K., 2006. A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system. *Computers & Industrial Engineering*, 51, 389-415.
- [14] Managaki M., Kawagoe K. and Naniwada M., 1984. A model and its implementation in a practical CAD/CAM database. *Computers in Industry*, 5, 319-327.
- [15] Kimura F., Kawabe S., Sata T. and Hosaka M., 1984. A study on product modelling for integration of CAD/CAM. *Computers in Industry*, 5, 239-252.
- [16] Tamm B., Kyttnen R., Vilipylä J. and Pruuden J., 1984. A system for CAD/CAM software development and implementation. *Computers in Industry*, 5, 367-376.
- [17] Xu X.W., He Q., 2004. Striving for a total integration of CAD, CAPP, CAM and CNC. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 20, 101-109.
- [18] Bloor M.S. and Owen J., 1991. CAD/CAM product-data exchange: the next step. *Computer-Aided Design*, 23, 237-243.
- [19] Kruth J.P. and Peters J., 1986. Steps Towards an Integrated CAD/CAM System for Mould Design and Manufacture: Anisotropic Shrinkage, Component Library and Link to NC Machining and EDM. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 35, 83-88.
- [20] Kao Y.C. and Lin C., 1996. CAD/CAM collaboration and remote machining. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 9, 149-160.
- [21] Yoshikawa H. and Uehara K., 1985. Design Theory for CAD/CAM Integration. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 34, 173-178.
- [22] Rabemanantsoa M. and Pierre S., 1996. An artificial intelligence approach for generating assembly sequences in CAD/CAM. *Artificial Intelligence in Engineering*, 10, 97-107.

- [23] Züst R., Taiber J. and Schultschik R., 1990. Knowledge-Based Process Planning System for Prismatic Workpieces in a CAD/CAM-Environment. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 39, 493-496.
- [24] Zhao W., Yang Y., Wang Z. and Zhang Y., 2004. A CAD/CAM system for micro-ED-milling of small 3D freeform cavity. *Journal of Materials Processing Technology*, 149, 573-578.
- [25] Yue S., Wang G., Yin F., Wang Y and Yang J., 2003. Application of an integrated CAD/CAE/CAM system for die casting dies. *Journal of Materials Processing Technology*, 139, 465-468.
- [26] Chérif M., Thomas H., Furet B. and Hascoët J.Y., 2004. Generic modelling of milling forces for CAD/CAM applications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 29-37.
- [27] Zhang Z. and Sarhadi M., 1996. An integrated CAD/CAM system for automated composite manufacture. *Journal of Materials Processing Technology*, 61, 104-109.
- [28] Yang D.Y., Ahn D.G., Lee C.H., Park C.H. and Kim T.J., 2002. Integration of CAD/CAM/CAE/CP for the development of metal forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 26-34.
- [29] Park K., Kim Y.S., Kim C.S. and Park H.J., 2007. Integrated application of CAD/CAM/CAE and RP for rapid development of a humanoid biped robot. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 609-613.
- [30] VáradyT., Martin R.R. and Cox J., 1997. Reverse engineering of geometric models - an introduction. *Computer-Aided Design*, 29, 255-268.
- [31] Fischer A., 2000. Multi-level models for reverse engineering and rapid prototyping in remote CAD systems. *Computer-Aided Design*, 32, 27-38.
- [32] Bagci E., 2009. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. *Advances in Engineering Software*, 40, 407-418.
- [33] Zhang Y.F., Nee A.Y.C., Fuh J.Y.H., Neo K.S. and Loy H.K., 1996. A neural network approach to determining optimal inspection sampling size for CMM. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 9, 161-169.
- [34] Ciocca L. and Scotti R., 2004. CAD-CAM generated ear cast by means of a laser scanner and rapid prototyping machine. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 92, 591-595.
- [35] Arayici Y., 2007. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. *Automation in Construction*, 16, 816-829.
- [36] Sun Y., Lü P. and Wang Y., 2009. Study on CAD&RP for removable complete denture. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 93, 266-272.
- [37] Willis A., Speicher J. and Cooper D.B., 2007. Rapid prototyping 3D objects from scanned measurement data, *Image and Vision Computing*, 25, 1174-1184.
- [38] Wang L., Zhao Y., Chen F. and Han Y., 2011. The 3D CT reconstruction algorithm to directly reconstruct multi-characteristic based on EMD. *Measurement*, 44, 2043-2048.
- [39] Hofmann J., Flisch A. and Obrist A., 2004. Adaptive CT scanning - mesh based optimisation methods for industrial X-ray computed tomography applications. *NDT & E International*, 37, 271-278.
- [40] Bartscher M., Hilpert U., Goebbels J. and Weidemann G., 2007. Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56, 495-498.
- [41] Alrashdan, A.; Motavalli, S.; Fallahi, B.: Automatic Segmentation of Digitized Data for Reverse Engineering Applications, *IIE Transactions*, 32(1), 2000, 59-69. DOI: 10.1023/A:1007655430826
- [42] Bernardini, F.; Mittleman, J.; Rushmeier, H.; Silva, C.; Taubin, G.: The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction, Visualization and Computer Graphics, 5(4), 1999, 349-359. DOI:10.1109/2945.817351
- [43] Besl, P.J.; Jain, R.C.: Segmentation Through Variable-Order Surface Fitting, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(2), 1988, 167-192. DOI: 10.1109/34.3881

- [44] Blais, F.: Review of 20 Years of Range Sensor Development, *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), 2004, 231–240. DOI:10.1117/1.1631921
- [45] Chang, K.H.; Magdum, S.; Khera, S.; Goel, V.K.: An Advanced Computer Modeling and Prototyping Method for Human Tooth Mechanics Study, *Annals of Biomedical Engineering*, 31(5), 2003, 621-631. DOI:10.114/1.1568117
- [46] Chang, K.H. and Chen, C., Research and Recommendation of Advanced Reverse Engineering Tools, Final Technical Report, Reference SOW # QIB09-008, September 2010.
- [47] Chang, K.H. and Siddique, Z., "Re-Engineering and Fast Manufacturing for Impact-Induced Fatigue and Fracture Problems in Aging Aircrafts," Final Report, AFOSR Grant F49620-02-1-0336, January 31, 2006.
- [48] Cuccuru, G.; Gobbetti, E.; Marton, F.; Pajarola, R.; Pintus, R.: Fast Low-Memory Streaming MLS Reconstruction of Point-Sampled Surfaces, *Graphics Interface*. 2009, 15-22.
- [49] Edelsbrunner, H.; Kirkpatrick, D.G.; Seidel, R.: On the Shape of A Set of Points In The Plane, *IEEE Transactions on Information Theory*, 29(4), 1983, 551-559. DOI:10.1109/TIT.1983.1056714
- [50] Geomagic, [www.geomagic.com](http://www.geomagic.com)
- [51] Gibson, D., Parametric feature recognition and surface construction from digital point cloud scans of mechanical parts, MS Thesis, The University of Oklahoma, December 2004
- [52] Hansen, G.A.; Douglass, R.W; and Zardecki, Andrew: *Mesh enhancement*. Imperial College Press, 2005, ISBN-13: 978-1860944871
- [53] Hoppe, H.; DeRose, T.; Duchamp, T.; McDONALD, J., and Stuetzle, W.: Mesh Optimization, SIGGRAPH '93 Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM New York, ISBN:0-89791-601-8
- [54] Hoppe, H.; DeRose, T.; Duchamp, T.; McDONALD, J., and Stuetzle, W.: Mesh Optimization, SIGGRAPH '93 Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM New York, ISBN:0-89791-601-8
- [55] Huang, J.; Menq, C.-H.: Automatic Data Segmentation for Geometric Feature Extraction From Unorganized 3-D Coordinate Points, *IIE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3), 2001, 268-279. DOI:10.1109/70.938384
- [56] A Review on Shape Engineering and Design Parameterization in Reverse Engineering 185 *InnovMetric*, [www.innovmetric.com](http://www.innovmetric.com)
- [57] Kazhdan, M.; Bolitho, M.; Hoppe, H.: Poisson Surface Reconstruction, The Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, 2006.
- [58] Li, Z.; Ma, L.; Jin, X.; and Zheng, Z.: A new feature-preserving mesh-smoothing algorithm, *The visual computer* 2009, vol. 25, no2, pp. 139-148
- [59] Liu, Y.; Dong, X.; Peng, W.: Study on Digital Data Processing Techniques for 3D Medical Model, *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 4, 2010, 1-4. DOI:10.1109/ICBBE.2010.5518168
- [60] Lorensen, W.E.; Cline, H.E.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Computer Graphics*, 21(4), 1987. DOI:10.1145/37402.37422
- [61] Lukács, G.; Martin, R.; Marshall, D.: Faithful Least-Squares Fitting of Spheres, Cylinders, Cones and Tori for Reliable Segmentation, *Lecture Notes in Computer Science*, 1406, 1998, 671-686. DOI:10.1007/BFb0055697
- [62] Lv, Y.; Yi, J.; Liu, Y.; Zhao, L.; Zhang, Y.; Chen, J.: Research on Reverse Engineering for Plastic Operation, *Information Technology and Applications*, 2009, 389-391. DOI: 10.1109/IFITA.2009.123
- [63] Marshall, D.; Lukacs, G.; Martin, Ralph.: Robust Segmentation of Primitives from Range Data in the Presence of Geometric Degeneracy, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 23(3), 2001, 304-314. DOI:10.1109/34.910883
- [64] Raja, V.; Fernandes, K.J.: *Reverse Engineering: An industrial Perspective*, Springer-Verlag, London, 2008. DOI:10.1007/978-1-84628-856-2

- [65] Rapidform, INUS Technology, Inc., [www.rapidform.com](http://www.rapidform.com)
- [66] Schroeder, W.J.: A topology modifying progressive decimation algorithm, Eighth IEEE Visualization 1997 (VIS '97), Phoenix, AZ, October 19-October 24, ISBN: 0-8186-8262-0
- [67] Siddique, Z.: Recommended Tool Kit for Reverse Engineering, CASI Summer Research Program 2002, OC-ALC, August 28, 2002
- [68] Silva, J.S.; Chang, K.H.: Design Parameterization for Concurrent Design and Manufacturing of Mechanical Systems, Concurrent Engineering Research and Applications (CERA) Journal, 2002, 10(1), 3-14. DOI:10.1177/1063293X02010001048
- [69] SolidWorks, Inc., [www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)
- [70] Sun, Q.; Chang, K.H.; Dormer, K.; Dyer, R.; Gan, R.Z.: An Advanced Computer-Aided Geometric Modeling and Fabrication Method for Human Middle Ear, Medical Engineering and Physics, 24(9), 2002, 595-606. DOI:10.1016/S1350-4533(02)00045-0
- [71] Thompson, W.B.; Owen, J.C.; de St. Germain, H.J.; Stark, S.R., Jr.; Henderson, T.C.: Feature-Based Reverse Engineering of Mechanical Parts, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 15(1), 1999, 57-66. DOI:10.1109/70.744602
- [72] Tsai, Y.C.; Huang, C.Y.; Lin, K.Y.; Lai, J.Y.; Ueng, W.D.: Development of Automatic Surface Reconstruction Technique in Reverse Engineering, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 42(1-2), 2009, 152-167. DOI:10.1007/S00170-008-1586-2
- [73] Vanco, M.; Brunnert, G.: Direct Segmentation of Algebraic Models for Reverse Engineering, Computing, 72(1-2), 2004, 207-220. DOI:10.1007/S00607-003-0058-7
- [74] Várady, T.; Benkő, P.; Kós, G.: Reverse Engineering Regular Objects: Simple Segmentation and Surface Fitting Procedures, International Journal of Shape Modeling, 4(3-4), 1998, 127-141. DOI:10.1142/S0218654398000106
- [75] Várady, T.; Martin, R.R.; Cox, J.: Reverse Engineering of Geometric Models – An Introduction, Computer-Aided Design, 29(4), 1997, 255-268. DOI:10.1016/S0010-4485(96)00054-1
- [76] Venkataraman, S.; Sohoni, M.; Kulkarni, V.: A Graph-Based Framework for Feature Recognition, Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, 2001, 194-205. DOI:10.1145/376957.376980
- [77] ZCorp, [www.zcorp.com](http://www.zcorp.com)