

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΕΡΕΟΥ CAD ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Γόγολος Λάμπρος του Ζώη

A.M:45857

Επιβλ. Καθ. Βασίλειος Σαγιάς

Κωνσταντίνος Στεργίου

Πειραιάς, 2021

Υπογραφές τριμελούς επιτροπής εξέτασης:

Στεργίου Κωνσταντίνος

Σαγιάς Βασίλειος

Ρώσσης Κυριάκος

Περίληψη : Ο κύριος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της διαδικασίας παραγωγής ενός τρισδιάστατου CAD μοντέλου βασιζόμενο σε αντίστοιχο φυσικό, χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση. Αρχικά, γίνεται αναφορά στον ορισμό της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης, τα πρώτα στάδια της καθώς και τους λόγους χρήσης της. Επίσης, παρουσιάζονται οι διαφορετικές τεχνολογίες τρισδιάστατης σάρωσης που υπάρχουν, καθώς και τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Δίνονται επίσης πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων προγραμμάτων CAD και επεξεργασίας πλέγματος. Κατά την πειραματική διαδικασία, γίνεται ένα παράδειγμα τρισδιάστατης απεικόνισης ενός ποντικιού με τη χρήση δύο δυσδιάστατων φωτογραφιών. Στη συνέχεια με την χρήση μιας σειράς σαρώσεων δύο αντικειμένων (ένα ποντίκι και έναν εκτοξευτήρα νερού) και έπειτα από τις κατάλληλες κατεργασίες, δημιουργούνται με δύο διαφορετικούς τρόπους τα CAD στερεά. Τέλος, σχολιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας, βγαίνουν τα ανάλογα συμπεράσματα και γίνεται μια συζήτηση πιθανής εξέλιξης.

Λέξεις κλειδιά: αντίστροφη μηχανική, αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση, τρισδιάστατη απεικόνιση, σάρωση, ανάλυση σάρωσης

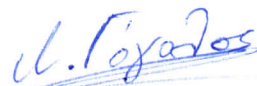
Abstract: *The main goal of the dissertation is to analyze the production process of a three-dimensional CAD model based on a corresponding physical, using different methods of reverse engineering design. First, a reference is made to the definition of reverse engineering design, its early stages as well as the reasons for its use. Also, the different 3D scanning technologies that are available are presented, as well as the device used in the experimental procedure. Information is also provided on the features of the available CAD and grid processing programs. During the experimental process, an example of 3D illustration of a mouse is made using two 2D photos. Consequently, by using a series of scans on two objects (a mouse and a water jet) and after the appropriate processing, the CAD solids are created with two different ways. Finally, the results of the process are commented on, the corresponding conclusions are drawn and a discussion of a possible development takes place.*

Keywords: reverse engineering, three-dimensional illustration, scanning, scan analysis

Δήλωση ακαδημαϊκής ακεραιότητας

(Declaration of academic integrity)

Ο υπογράφων υπεύθυνα δηλώνει ότι η παρούσα εργασία με τίτλο «Παραγωγή στερεού CAD μοντέλου με χρήση τεχνολογιών αντίστροφης μηχανικής» είναι προϊόν δικής του δουλειάς και ότι όλες οι πηγές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την σύνταξη της αναφέρονται πλήρως.



Λάμπρος Γόγολος

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την υποστήριξη κατά την διάρκεια των σπουδών και της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και τους επιβλέποντες καθηγητές κ. Σαγιάς Βασίλειος και κ. Κωνσταντίνος Στεργίου που με βοήθησαν στην διεκπεραίωση της.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη μελέτη της διαδικασίας της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης ενός αντικειμένου. Γίνεται σύγκριση των διαφορετικών τεχνικών αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης. Παρατίθενται πληροφορίες οι οποίες αποτελούν το θεωρητικό μέρος και είναι απαραίτητες για την κατανόηση του πειραματικού μέρους που ακολουθεί. Στη συνέχεια με χρήση εικόνων, αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθείται, ώστε να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή. Τέλος, γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη μελέτη, βγαίνουν τα ανάλογα συμπεράσματα και γίνεται μια συζήτηση πιθανής εξέλιξης της διαδικασίας και των μέσων (προγράμματα, σαρωτές κ.λ.π.) που χρησιμοποιήθηκαν.

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ

Ως κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της διαδικασίας της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης. Η διαδικασία αυτή, πραγματοποιείται βάση πραγματικών συνθηκών με χρήση σύγχρονων προγραμμάτων και ειδικού σαρωτή δομημένου λευκού φωτός. Λόγω της απαίτησης της εκπόνησης της μελέτης σε πραγματικές συνθήκες αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης, ως δευτερεύοντας στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση τυχών αδυναμιών που εμφανίζονται είτε λόγω του εξοπλισμού που υπάρχει διαθέσιμος, είτε λόγω αδυναμίας του λογισμικού καθώς και πιθανές λύσεις τους.

2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Η αντίστροφη μηχανική ή πιο ορθά αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση έχει περιγράψει με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς τρόπους είναι ότι η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση (Wang, 2010) (στα αγγλικά Reverse Engineering) είναι μια διαδικασία μέτρησης, ανάλυσης και δοκιμής για την ανακατασκευή μιας εικόνας «καθρέπτη» ενός αντικειμένου ή ανάκτησης ενός γεγονότος που έγινε στο παρελθόν. Είναι μια τεχνολογία επαν-εφεύρεσης, ένας οδικός χάρτης που οδηγεί στην ανοικοδόμηση και την ανακατασκευή. Είναι επίσης η τέχνη της εφαρμοσμένης επιστήμης, με σκοπό τη διατήρηση της αρχικής πρόθεσης του αρχικού αντικειμένου. Ένας άλλος τρόπος ορισμού της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης στον μηχανολογικό σχεδιασμό, (Anwer and Mathieu, 2016) μπορεί να οριστεί ως την προσέγγιση που «ξεκινά την διαδικασία επανασχεδιασμού» ενός προϊόντος στην οποία, αυτό το προϊόν παρατηρείται, αποσυναρμολογείται, δοκιμάζεται και αναλύεται με σκοπό την κατανόηση της λειτουργικότητας, μορφής, των φυσικών ιδιοτήτων και των δυνατοτήτων συναρμολόγησης του. Χρησιμοποιείται δηλαδή ως μια μέθοδος που έχει ως σκοπό την κατανόηση πως ένα προϊόν λειτουργεί και την διαδικασία αναπαραγωγής του, για την δημιουργία ενός υποκατάστατου μοντέλου ή κλώνου, το οποίο θα έχει ενισχυμένες αποδόσεις μετά την ενσωμάτωση των γνώσεων στο νέο σχεδιασμό.

Ένας πιο απλός αλλά πολύ εύστοχος ορισμός είναι ότι αντίστροφη μηχανική ή ακόμα καλύτερα αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση (reverse engineering) είναι η διαδικασία ανάλυσης της δομής, της λειτουργίας και του χειρισμού ενός αντικειμένου ή συστήματος με σκοπό την πλήρη κατανόηση του, για την επίτευξη κάποιων στόχων.

2.1 ΣΚΟΠΟΙ ΚΑΙ ΛΟΓΟΙ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Παραπάνω έγινε μια αναφορά στο τι είναι η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι κυριότεροι λόγοι χρήσης αυτής της διαδικασίας (Μπιλάλης and Μαραβελάκης, 2014).

Οι λόγοι για τους οποίους ένας μηχανολόγος μηχανικός μπορεί να θέλει να χρησιμοποιήσει την αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση για την ανάλυση ενός συστήματος ή αντικειμένου είναι δεκάδες. Για παράδειγμα, μπορεί ο αρχικός παραγωγός ενός μελετώμενου προϊόντος να μην είναι την συγκεκριμένη χρονική στιγμή διαθέσιμος ή να έχει κλείσει. Επίσης, μπορεί να μην παράγεται πια αυτό

το προϊόν από τον αρχικό κατασκευαστή και να μην υπάρχουν διαθέσιμα ανταλλακτικά στην αγορά. Μπορεί ακόμα, το κόστος αγοράς ενός ανταλλακτικού να είναι πολύ υψηλό, θέτοντας το οικονομικά ασύμφορο, ενώ με την χρήση της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης το κόστος δημιουργίας του να είναι πολύ μικρότερο. Σε πολλές περιπτώσεις, ο αρχικός παράγωγος υπάρχει αλλά αρνείται να διαθέσει πληροφορίες (π.χ. σχέδια) για ένα προϊόν ή ακόμα και να το πουλήσει. Ένα πράγμα που ήταν πιο σύνηθες τα παλαιότερα χρόνια, είναι η μη ύπαρξη των αρχικών σχεδίων ενός προϊόντος, ή να έχουν χαθεί ή να είναι σε μη επεξεργάσιμη μορφή.

Ένας άλλος λόγος που μπορεί να θέλει ένας μηχανολόγος μηχανικός να αναλύσει ένα αντικείμενο είναι διότι υπάρχουν κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά σε αυτό, τα οποία πρέπει να εξαλειφθούν. Για παράδειγμα μπορεί να παρατηρείται υπερβολική φθορά λόγω της γεωμετρίας του σε κάποια σημεία τα οποία μπορούν να διορθωθούν.

Επιπρόσθετα, γίνεται πολλές φορές χρήση της διαδικασίας της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης, για την επιθεώρηση ή την πραγματοποίηση ποιοτικού ελέγχου σε ένα αντικείμενο. Για παράδειγμα στο πρωτάθλημα της Formula 1, μετά από κάθε αγώνα, γίνεται ποιοτικός έλεγχος σε διάφορα κομμάτια του μονοθεσίου με σκοπό την βελτίωση του.



Εικόνες 2.1.1-2.1.2: ¹Στιγμές από την σάρωση του κωνικού ρύγχους του μονοθεσίου της Red Bull Racing Formula One Team με χρήση σαρωτή λέιζερ

Πολλές φορές γίνεται χρήση της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης για την ανάλυση ανταγωνιστικών προϊόντων, με σκοπό την κατανόηση των αρχών λειτουργίας τους, καθώς και την εύρεση θετικών και αρνητικών χαρακτηριστικών. Η ακριβής αντιγραφή ενός προϊόντος με σκοπό το κέρδος

¹ Εικόνες από: <https://www.redbull.com/int-en/videos/the-story-of-the-nose-cone-red-bull-racing-formula-one-team>

αποτελεί συνήθως ποινικό αδίκημα μιας και τα περισσότερα σχέδια των προϊόντων που βρίσκονται στην αγορά είναι κατοχυρωμένα με πατέντες. Παρόλα αυτά, η παράβαση πατεντών είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται συχνά, ειδικά μεταξύ χωρών που δεν έχουν φιλικές σχέσεις μεταξύ τους. Παραδείγματος χάριν, η κινεζική κυβέρνηση κατηγορείται από την αμερικανική κοινότητα ότι το πολεμικό της αεροσκάφος J-31 είναι αποτέλεσμα αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης επί του F-35, τουλάχιστον ως προς το εξωτερικό κομμάτι (Maldonado, 2015).



Εικόνα 2.1.3: ²Το κινέζικο πολεμικό αεροσκάφος J-31 (αριστερά), το αμερικάνικο πολεμικό αεροσκάφος F-35 (δεξιά)

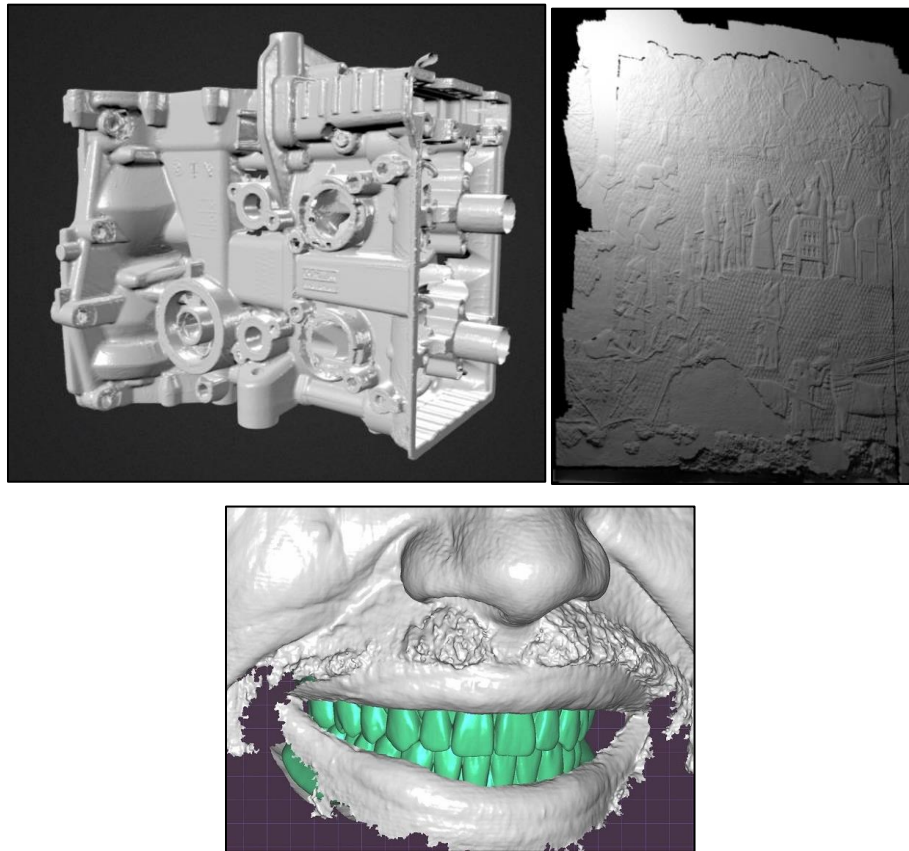
Ένας άλλος λόγος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση για την ανάλυση ενός προϊόντος, είναι η ανάγκη για την ανάπτυξη μίας νέας μέθοδου παραγωγής του ή της βελτίωσης της υπάρχουσας. Μπορεί επίσης να υπάρχει η ανάγκη για την ανάπτυξη νέων προϊόντων με βάση το μελετώμενο, με σκοπό την αντικατάσταση ξεπερασμένων υλικών ή απαρχαιωμένων διαδικασιών κατασκευής με σύγχρονες που είναι λιγότερο κοστοβόρες, πιο γρήγορες, αποτελεσματικότερες και ασφαλέστερες.

Πολύ συχνά συναντιέται η χρήση της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης σε εφαρμογές τοπογραφικές, αρχιτεκτονικές και ψηφιοποιήσεις ιστορικών μνημείων. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι διότι με τη χρήση της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης αυτές οι διαδικασίες γίνονται πολύ ταχύτερες και με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια. Λόγω της μεγάλης ακρίβειας, τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μεγάλη αύξηση στη χρήση της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης σε διάφορες ιατρικές εφαρμογές όπως είναι η χειρουργική και η οδοντιατρική (π.χ. δημιουργία οδοντικού εμφυτεύματος με βάση την οδοντοστοιχία του ασθενούς).

² Εικόνα από: <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/g23303922/china-copycat-air-force/>

Επιπρόσθετα, γίνεται χρήση της για την δημιουργία ρουχισμού με ανθρωπόμορφα χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, σε πολλά αθλήματα που οι ομάδες και οι αθλητές βασίζονται σε ότι πλεονέκτημα μπορούν να αξιοποιήσουν, χρησιμοποιούν την αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση για να φτιάξουν ρουχισμό που θα τους δώσει το προβάδισμα έναντι του ανταγωνισμού.

Τέλος, χρησιμοποιείται η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση στις τέχνες, όπως για παράδειγμα είναι η σάρωση του προσώπου κάποιου/κάποιου ηθοποιού για την δημιουργία τρισδιάστατης μάσκας με βάση της γεωμετρίας του (Tóth and Živčák, 2014) .



Εικόνες 2.1.4-2.1.6: ³ Σάρωση κελύφους (μπλοκ) κινητήρα αυτοκινήτου, ⁴ σάρωση ανάγλυφου της πολιορκίας του Lachich απ' το βρετανικό μουσείο, ⁵ σάρωση οδοντοστοιχίας ασθενούς.

³ Εικόνα από: <https://www.artec3d.com/cases/dental-implants>

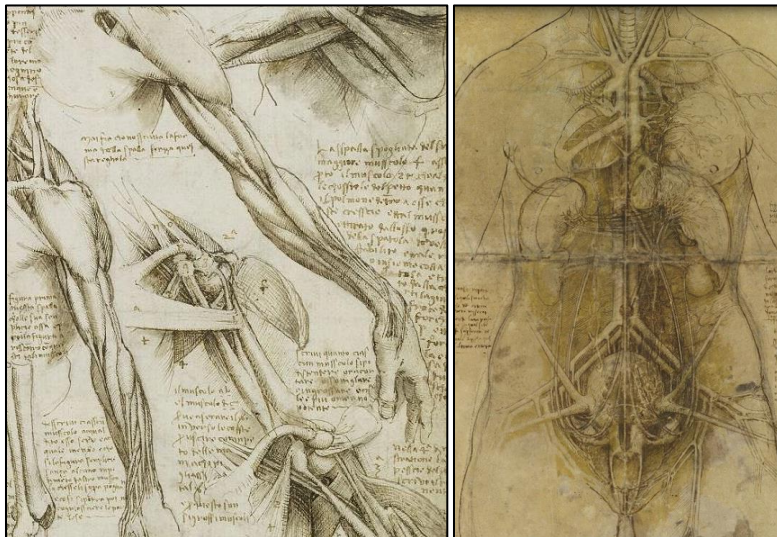
⁴ Εικόνα από: <https://www.artec3d.com/cases/british-museum-captures-its-assyrian-relief-collection-3d>

⁵ Εικόνα από: <https://sketchfab.com/3d-models/engine-block-3d-scan-e5968de5b81f4d0f8886427f4dd170e5>

2.2 ΠΡΩΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΛΙΓΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση είναι μια διαδικασία πολύ παλιά αφού προκύπτει και βασίζεται στην αέναη περιέργεια του ανθρώπου της κατανόησης και αξιοποίησης του κόσμου γύρω του. Ουσιαστικά, οποιαδήποτε ανακάλυψη του ανθρώπου βασίζεται στην διαδικασία αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης είτε αυτή έχει ως έμπνευση κάποιο φυσικό φαινόμενο ή αντικείμενο, είτε βασίζεται σε κάποιο άλλο δημιούργημα του ανθρώπου.

Ένας απ' τους σπουδαιότερους ανθρώπους που βασίστηκαν στην αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση σε μεγάλο μέρος της ζωής του για την μελέτη της φύσης και του τριγύρω περιβάλλοντος του, ήταν ο Leonardo da Vinci (Messler, 2014), ή πιο σωστά ο Leonardo di ser Piero da Vinci (1452–1519 μ.Χ.), ο οποίος ήταν Ιταλός ζωγράφος κατά την αναγέννηση, καθώς και εκτός πολλών άλλων, μηχανολόγος μηχανικός, μελετητής ανατομίας, χαρτογράφος και εφευρέτης. Έκανε μελέτες τόσο σε νεκρά, ζωντανά ζώα όσο και σε ανθρώπινα πτώματα για να ολοκληρώσει την έρευνα του στην ανατομία και να ικανοποιήσει την ακόρεστη περιέργειά του. Πολλοί ειδικοί υποστηρίζουν (Program, 2010) ότι αν είχε ολοκληρώσει το έργο του πάνω στην ανατομία του ανθρώπου, το έργο του θα μπορούσε να είναι καλύτερο από το μέχρι και σήμερα πιο ολοκληρωμένο βιβλίο ανατομίας, ονομαζόμενο Gray's Anatomy του Henry Gray (πρώτη κυκλοφορία 1858) το οποίο βρίσκεται σήμερα στην 42^η έκδοση του.



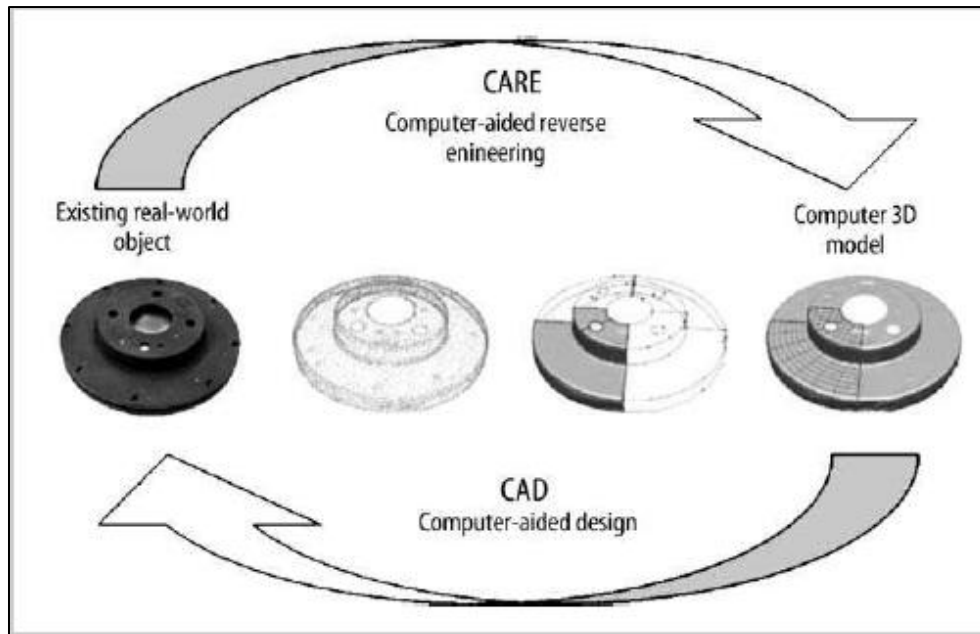
Εικόνα 2.2.1-2.2.2: ⁶Σχέδια ανατομίας του Leonardo da Vinci

⁶ Εικόνα από: <https://imgur.com/gallery/XVLHA/comment/672101867>

2.3 Η ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΗΜΕΡΑ

Οι ρυθμοί εξέλιξης της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης αναπτυσσόταν μέχρι πρόσφατα με σταθερούς ρυθμούς. Τα τελευταία χρόνια όμως, έχουν παρουσιαστεί μεγάλα άλματα στη ταχύτητα εκτέλεσης της διαδικασίας, στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της καθώς και στη μείωση του κόστους της. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης και εξέλιξης της τεχνολογίας των λογισμικών προγραμμάτων (όπως είναι η ανάπτυξη των CAD,CAM προγραμμάτων) καθώς και μιας σχετικά νέας τεχνολογίας στον κλάδο της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης, αυτής των σαρωτών.

Σήμερα, ουσιαστικά με την χρήση ταχύτατα αναπτυσσόμενων τεχνολογιών, όπως είναι των CAD (Computer Aided Design) και CAM (Computer Aided Manufacturing) προγραμμάτων, η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση έχει μετατραπεί σε αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση με την βοήθεια υπολογιστή (CARE, Computer Aided Reverse Engineering). Το CARE ορίζεται ως την δημιουργία ενός CAD μοντέλου από ένα μελετώμενο από αντικείμενο. Είναι ουσιαστικά το ακριβώς αντίθετο της συνήθους χρήσης των CAD (Computer Aided Design) προγραμμάτων, δηλαδή της δημιουργίας ενός αντικειμένου με βάση ενός σχεδίου του υπολογιστή.



Εικόνα 2.3.1: ⁷ Διαδικασία του CARE και του CAD

⁷ Εικόνα από: (Raja, Vinesh, Fernandes, 2008)

2.4 ΣΤΑΔΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΟΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

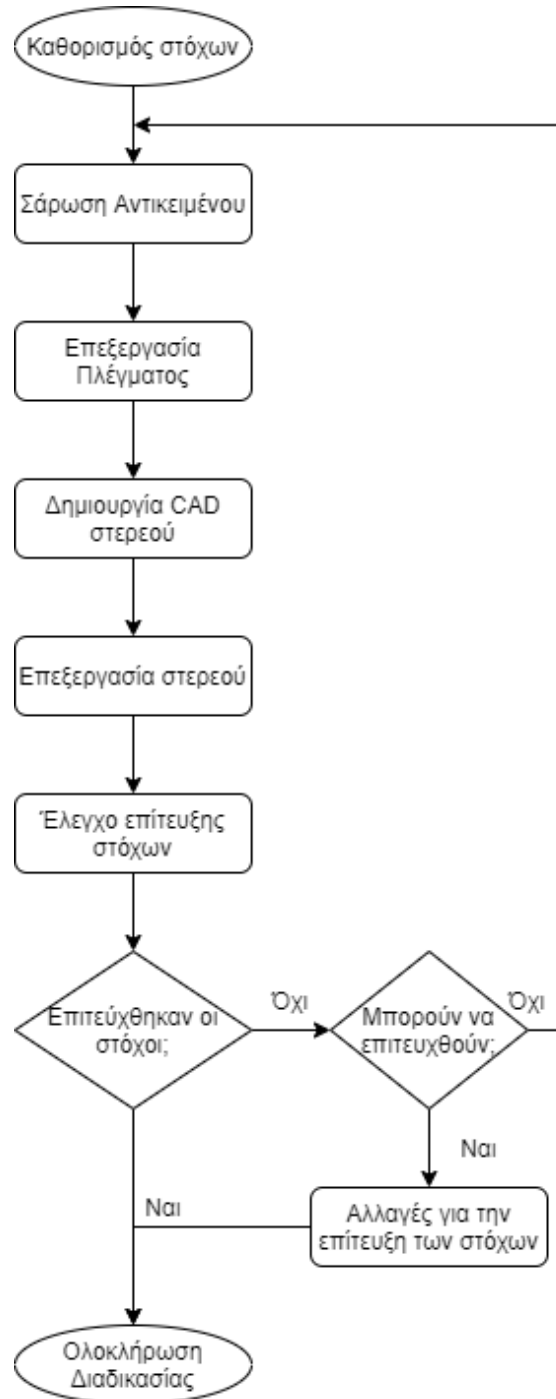
Στη συνέχεια θα αναλυθεί η διαδικασία της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης ενός αντικειμένου με χρήση σαρωτή και CAD προγράμματος.

Το πρώτο βήμα είναι να καθοριστεί ο σκοπός ή στόχος της μελέτης (δηλαδή το αποτέλεσμα που πρέπει να επιτευχθεί ολοκληρώνοντας αυτή τη διαδικασία). Είναι πολύ σημαντικό ο στόχος αυτός να είναι ακριβής και ξεκάθαρος, διότι αυτός θα αποτελέσει το μέτρο σύγκρισης της επιτυχίας της διαδικασίας. Στην συνέχεια, γίνεται λήψη των δεδομένων του αντικειμένου που θα μελετηθεί όπως είναι το υλικό κατασκευής του και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Στην σύγχρονη αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση ενός σύνθετου αντικειμένου, η λήψη των γεωμετρικών δεδομένων γίνεται με την χρήση σαρωτών. Παρακάτω θα αναλυθούν τα είδη των σαρωτών που υπάρχουν, αλλά αυτά σε αυτό το σημείο απλά θα αναφερθεί ότι ανάλογα με το υλικό, το μέγεθος και την γεωμετρία του εξαρτήματος ή αντικειμένου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πληθώρα διαφορετικών μηχανημάτων σάρωσης. (Várady, Martin and Cox, 1997) Με τους σαρωτές αυτούς, αφότου γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις, σαρώνονται οι επιφάνειες του μελετώμενου εξαρτήματος και εξάγονται τα δεδομένα των επιφανειών σε τρισδιάστατη μορφή ως ένα πυκνό πλέγμα. Αυτό το σύνολο δεδομένων δημιουργεί ένα οπτικό σκίτσο που αργότερα, με τους κατάλληλους χειρισμούς και επεξεργασίες θα δημιουργήσουν το τελικό CAD μοντέλο. (Schnabel, Wahl and Klein, 2007) Οι κατεργασίες αυτές είναι, η αφαίρεση αχρείαστων τμημάτων σάρωσης όπως είναι το φόντο ή λανθασμένες γεωμετρίες του αντικειμένου, η λείανση και σμίλευση των σαρώσεων, γέμισμα των οπών, διόρθωση των γεωμετριών και η ένωση των σαρώσεων μέχρι να επιτευχθεί το κατάλληλο σχήμα και η επιθυμητή ακρίβεια του αντικειμένου. Αφότου έχουν διορθωθεί οι γεωμετρίες όπου χρειάζεται και έχουν συγχωνευτεί οι σαρώσεις, μέσω του προγράμματος μειώνεται συνήθως ο αριθμός των τριγώνων από το οποίο αποτελείται το πλέγμα.

Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία από τον χρήστη στο πλέγμα του αντικειμένου με τη βοήθεια CAD προγράμματος για την μετατροπή του σε CAD στερεό. Αφότου, δημιουργηθεί το CAD στερεό πραγματοποιείται ένας έλεγχος συγκρίνοντας τις γεωμετρίες του σαρωμένου αντικειμένου και του τελικού CAD στερεού. Στη συνέχεια και με την προϋπόθεση ότι οι αποκλίσεις είναι σε αποδεκτά πλαίσια, γίνονται οι επεξεργασίες που τυχόν έχουν καθοριστεί στο πρώτο βήμα της διαδικασίας.

Τέλος, γίνεται έλεγχος της επίτευξης των στόχων της διαδικασίας. Αν για κάποιο λόγο οι στόχοι που είχαν τεθεί στην αρχή της διαδικασίας δεν επιτεύχθηκαν, τότε βγαίνουν τα κατάλληλα συμπεράσματα και γίνονται αλλαγές στο στερεό ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί ή στην χειρότερη περίπτωση, ξεκινά η διαδικασία από την αρχή.



Σχήμα 2.4.1: Flow chart σταδίων διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής

3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΙ ΣΑΡΩΤΕΣ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην διαδικασία της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με την βοήθεια υπολογιστή χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές ένας σαρωτής. Σαρωτής (scanner) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που είναι συνδεδεμένη με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή και ψηφιοποιεί το σημείο σάρωσης ενός μελετώμενου αντικειμένου για την αποτύπωση του σε μορφή μίας εικόνας, (π.χ. φωτογραφίας, σχεδίου, πλέγματος) σε δυσδιάστατη ή τρισδιάστατη μορφή.

Στη συνέχεια θα γίνει μια αναφορά στα είδη των σαρωτών.

3.1 ΕΙΔΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ

Οι σαρωτές για την απόκτηση των δεδομένων με σκοπό την δημιουργία του τρισδιάστατου πλέγματος των μελετώμενων αντικειμένων, χωρίζονται ανάλογα με τον αισθητήρα σάρωσης που χρησιμοποιούν σε δύο βασικές κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή του **σαρωτή με αισθητήρα επαφής (contact scanners)** (Raja and Fernandes, 2008; Chien *et al.*, 2018). Σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούνται οι λεγόμενες ως εργαλειομηχανές μετρήσεως συντεταγμένων (Coordinate Measuring Machine -CMM) οι οποίες έχουν συνήθως ανοχές της τάξης +0.01 με +0.02mm. Ωστόσο, ανάλογα με το μέγεθος του εξαρτήματος που σαρώνεται, αυτή η τεχνική μπορεί να αποδειχθεί πάρα πολύ αργή διότι κάθε σημείο του πλέγματος δημιουργείται διαδοχικά απ' την άκρη του αισθητήρα ένα προς ένα. Επίσης, αυτά τα μηχανήματα για να λαμβάνουν καλές μετρήσεις, πρέπει να ασκείται μια ορισμένη πίεση στο αντικείμενο σάρωσης καθιστώντας αδύνατη την ακριβή μέτρηση μαλακών αντικειμένων. Οι σαρωτές αυτοί, είναι εφαρμοσμένοι πάνω σε ρομποτικούς βραχίονες και η ακίδα οδηγείται είτε με το χέρι του χειριστή που σαρώνει, είτε είναι προγραμματισμένος ο βραχίονας να ακολουθεί την περίμετρο του αντικειμένου μέσω κάποιου υπολογιστικού συστήματος. Συνήθως, αυτή η κατηγορία χρησιμοποιείται για περιπτώσεις που οι απαιτήσεις ακριβείας των μετρήσεων του αντικειμένου είναι πολύ μεγάλες, όπως η αεροναυπηγική.

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία σαρωτών είναι αυτή των **σαρωτών χωρίς επαφή (non-contact scanners)**, όπου σε αντίθεση με τους σαρωτές με αισθητήρα επαφής, χαρακτηρίζονται (εκτός απτό γεγονός ότι δεν χρειάζονται να έρχονται σε άμεση επαφή με το αντικείμενο μελέτης) απ' την συγκριτικά μεγάλη ταχύτητα σάρωσης ακόμα και για ογκώδη αντικείμενα. Οι σαρωτές αυτοί στηρίζονται σε δύο βασικές

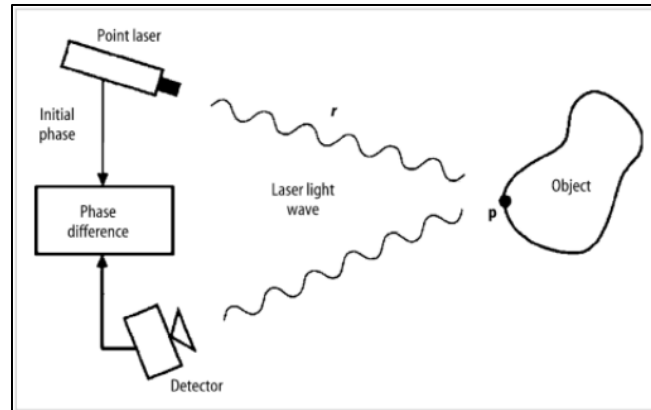
υποκατηγορίες (Μπιλλάλης and Μαραβελάκης, 2014). Οι σαρωτές χωρίς επαφή βασίζονται στην αρχή ενεργού στερεοσκοπικού φωτισμού (active illumination stereo) ή αλλιώς απλή ενεργού στερεοσκοπικού (active stereo). Υπάρχουν τρεις τεχνικές για τον έλεγχο του φωτός με σκοπό την απόκτηση των τρισδιάστατων δεδομένων.



Εικόνα 3.1.1: ⁸Ακίδα από σαρωτή με αισθητήρα επαφής

Η πρώτη τεχνική ελέγχου του φωτός είναι της **συνεχούς διαμόρφωσης κύματος (continuous wave modulation)**. Σε αυτή τη τεχνική, χρησιμοποιείται μια συνεκτική δέσμη φωτός (laser) η οποία προσβάλλει ένα σημείο του αναλυόμενου αντικειμένου. Στη συνέχεια αυτή η δέσμη ανακλάται από το αντικείμενο πάνω σε ένα ειδικά κατασκευασμένο δέκτη. (Raja, Vinesh, Fernandes, 2008; Tóth and Živčák, 2014) Η απόσταση αυτού του σημείου υπολογίζεται από την διαφορά φάσης του μεταδιδόμενου κύματος σε σχέση με εκείνο που είναι ανακλώμενο απ' την επιφάνεια του αντικειμένου. Η ακρίβεια των μετρήσεων αυτής της κατηγορίας εξαρτάται απ' την ακρίβεια των μετρήσεων της διαφοράς φάσης και το μήκος κύματος της δέσμης φωτός. Ένα παράδειγμα χρήσης του είναι στην οδοντιατρική.

⁸ Εικόνα από: <https://www.3erp.com/blog/everything-about-coordinate-measuring-machine/>



Εικόνα 3.1.2: ⁹Σκαρίφημα συνεχούς διαμόρφωσης κύματος

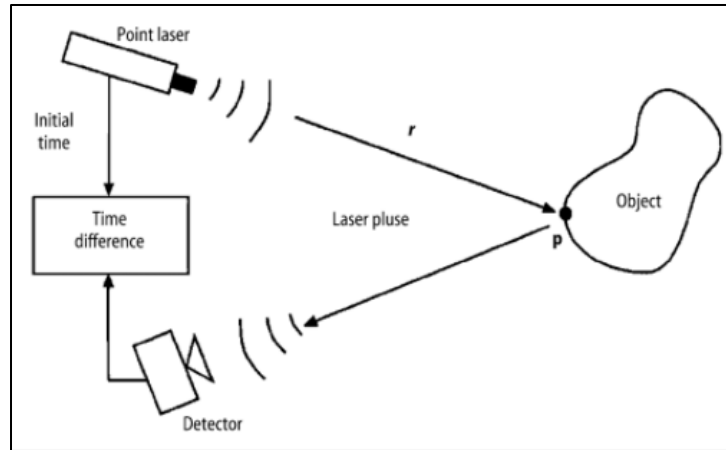
Η δεύτερη τεχνική ελέγχου φωτός είναι ο **προσδιορισμός του χρόνου πορείας (time-of-flight estimation)**. Σε αντίθεση με την παραπάνω κατηγορία, ο προσδιορισμός του χρόνου πορείας βασίζεται σε παλμό λέιζερ και όχι κύμα. Το σύστημα προσδιορισμού χρόνου πορείας (TOF) μετράει την απόσταση ρ , (Lichti and Harvey, 2002; Plaue, 2009) παρατηρώντας τον χρόνο ταχύτητας μεταξύ δύο σημείων Δt μίας δέσμης φωτός. Ο γενικός τύπος στον οποίο βασίζεται αυτή η τεχνική απόκτησης των τρισδιάστατων δεδομένων είναι η εξής:

$$\rho = \frac{1}{2} c \Delta t$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός (299.792.458 m/s). Για να είναι δυνατή η μέτρηση, προϋπόθεση είναι ότι ο φωτοαισθητήρας να λάβει αρκετό παλμό ενέργειας απ' την ανακλώμενη επιφάνεια του αντικειμένου. Το ρεύμα που παράγεται από τον ανιχνευτή πρέπει να υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο «κατώφλι» για να μπορέσει να μετρηθεί ο χρόνος επιστροφής.

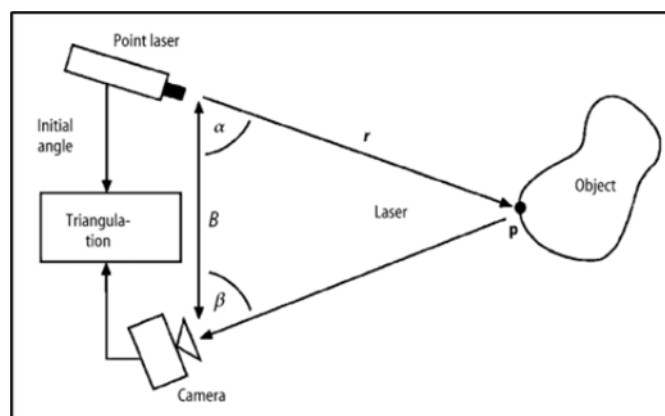
Οι σαρωτές αυτοί (Boehler *et al.*, 2002) είναι σε θέση να μετρήσουν αντικείμενα σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις απ' τους σαρωτές τριγωνισμού. Ωστόσο, είναι λιγότερο ακριβείς, ειδικά σε κοντινή απόσταση. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την καταγραφή μεγάλων αντικειμένων και για σαρώσεις από απόσταση. Για το λόγο αυτό, παρατηρούμε αυτή τη τεχνολογία (η τεχνολογία λέγεται και LIDAR) να χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές στα νέα «έξυπνα» αυτοκίνητα που έχουν ενεργά συστήματα ασφαλείας και τεχνολογία αυτόματης οδήγησης.

⁹ Εικόνα 3.1.2-3.1.4 από: (Raja, Vinesh, Fernandes, 2008)



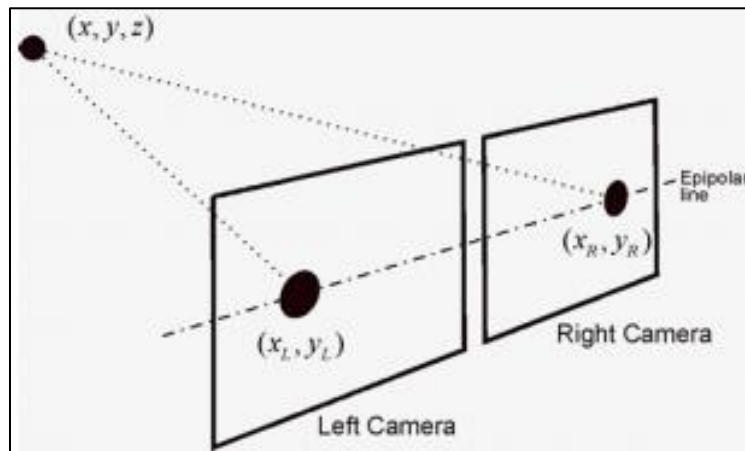
Εικόνα 3.1.3: Σκαρίφημα προσδιορισμού χρόνου πορείας

Η τελευταία τεχνική ελέγχου του φωτός είναι αυτή του **τριγωνισμού του φωτός με λέιζερ (Laser light triangulation)**. Σ' αυτή την κατηγορία ενεργού στερεοσκοπικού φωτισμού, χρησιμοποιείται ένα λέιζερ που εκπέμπει μία ακτίνα πάλι, αλλά ο αισθητήρας που συλλέγει το ανακλώμενο σήμα είναι μία κάμερα. Η γεωμετρία του σαρωμένου αντικειμένου αναγνωρίζεται από το σημείο που θα «χτυπήσει» η ακτίνα λέιζερ τον αισθητήρα (sensor) της κάμερας. Η κάμερα καθώς και το λέιζερ αφότου έχουν βαθμονομηθεί, δεν πρέπει να κουνηθούν κατά την διάρκεια της σάρωσης για να διασφαλιστεί η ακρίβεια της μέτρησης. Μία άλλη παράμετρος που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την ακρίβεια της σάρωσης είναι η ανάλυση της κάμερας. Παρ' όλα αυτά, επηρεάζεται επίσης (Curless and Levoy, 1996; Boehler *et al.*, 2002; Lanman and Taubin, 2009) απ' τις γεωμετρικές διαστάσεις, το επίπεδο ανακλαστικότητας του μελετώμενου αντικειμένου και τις συνθήκες φωτισμού που επικρατούν. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον ως μετρητικά όργανα σε διάφορες βιομηχανίες.



Εικόνα 3.1.4: Σκαρίφημα τριγωνισμού φωτός με laser

Ένας άλλος τρόπος απόκτησης δεδομένων είναι με την χρήση της **στερεοσκοπικής όρασης (Stereovision)**. Η στερεοσκοπική όραση, που αποτελεί μια υποκατηγορία της φωτογραμμετρίας, που βασίζεται στη χρήση δύο καμερών που βρίσκονται σε προκαθορισμένες θέσεις μεταξύ τους. Αυτές οι κάμερες, αφότου έχει τοποθετηθεί το αντικείμενο μελέτης στην κατάλληλη θέση παίρνουν εικόνες του από το σημείο που βρίσκονται. Αυτές οι εικόνες συσχετίζονται μεταξύ τους για την δημιουργία ενός «χάρτη βάθους». (Strobl *et al.*, 2009) Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας για την τρισδιάστατη ανάλυση, είναι το σχετικά χαμηλό κόστος των αισθητήρων για μια αρκετά καλή ανάλυση σάρωσης του αντικειμένου αν και αυτό εξαρτάται πολύ από τις συνθήκες φωτισμού του περιβάλλοντος λήψης της εικόνας, μιας και όπως οι απλές κάμερες που βρίσκονται στην αγορά, οι κάμερες της στερεοσκοπικής όρασης δεν μπορούν να λάβουν τις κατάλληλες σαρώσεις σε χαμηλό φωτισμό. Επίσης αυτή η τεχνική, απαιτεί υψηλή επεξεργαστική ισχύ (processing power), το οποίο σημαίνει ότι ο ηλεκτρονικός υπολογιστής ο οποίος θα επεξεργαστεί τις εικόνες πρέπει να είναι ισχυρός. Ακόμα, απαιτεί σημαντικό χώρο για την σωστή διάταξη των καμερών και πρέπει να γίνει χρήση κατάλληλων φακών ανάλογα με τη θέση που βρίσκονται στο χώρο.



Εικόνα 3.1.5: ¹⁰Σκαρίφημα στερεοσκοπικής όρασης με χρήση δύο καμερών για την δημιουργία τρισδιάστατου σημείου από δύο διαφορετικών δισδιάστατων σημείων

Ο τελευταίος τρόπος απόκτησης τρισδιάστατων δεδομένων είναι με την χρήση **σαρωτή δομημένου φωτός (structured light scanner)**. Οι σαρωτές αυτοί θα αναλυθούν παρακάτω.

¹⁰ Εικόνα από: (Borangi and Dumitrache, 2010)

Παράμετροι	Στερεοσκοπικοί	Δομημένου φωτός	Χρόνου Πορείας (TOF)
Εύρος	Περιορισμένο	Μπορεί να διαμορφωθεί	Μπορεί να διαμορφωθεί
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό	Μεσαίο
Πολυπλοκότητα λογισμικού	Μεγάλη	Μεσαία	Μικρή
Ακρίβεια βάθους	Μικρή	Μεγάλη	Μεσαία
Απόδοση σε χαμηλό φωτισμό	Χαμηλή	Καλή	Καλή
Επιρροή από φως του Ηλίου	Μικρή	Μεγάλη	Μικρή
Μέγεθος	Μεγαλώνει με το εύρος	Μεγαλώνει με το εύρος	Μικρό
Οπτικό πεδίο	Τυπ. <90 μοιρών	Τυπ. <90 μοιρών	Μπορεί να διαμορφωθεί

Πίνακας 3.1.1: ¹¹ Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τρισδιάστατων αισθητήρων

Γενικά, η σάρωση τρισδιάστατων δεδομένων χωρίς επαφή έχει επικρατήσει σε σχέση με την σάρωση με επαφή στο ευρύ κοινό. Οι κυριότεροι λόγοι είναι, η υψηλότερη ταχύτητα σάρωσης, η μεγαλύτερη φορητότητα του εξοπλισμού και η δυνατότητα πολλών σαρωτών χωρίς επαφή να αποτυπώνουν του χρώμα του σαρωμένου αντικειμένου. Επίσης, σε αντίθεση με τους σαρωτές επαφής, οι σαρωτές χωρίς επαφή δεν χρειάζονται μεγάλη εμπειρία για την εξοικειωθεί ο χρήστης τους. Τέλος, σε αντίθεση με τους σαρωτές επαφής, έχουν την δυνατότητα σάρωσης εύπλαστων αντικειμένων χωρίς την παραμόρφωση τους.

Παρ' όλα αυτά οι σαρωτές με επαφή έχουν και αυτοί θετικά χαρακτηριστικά έναντι αυτών χωρίς, όπως είναι η καλύτερη δυνατότητα αποτύπωσης οπών και εσοχών. Επίσης χαρακτηρίζονται από την μεγαλύτερη ακρίβεια και την δυνατότητα σάρωσης αντικειμένων με μεγάλη αντανάκλαση. Τέλος, δεν επηρεάζονται καθόλου από τις συνθήκες φωτισμού.

3.2 ΣΑΡΩΤΗΣ LASER Ή ΣΑΡΩΤΗΣ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ

Όπως έγινε αντιληπτό παραπάνω, οι σαρωτές χωρίς επαφή λειτουργούν με διατάξεις που έχουν είτε λέιζερ, είτε σαρωτή δομημένου φωτός για την λήψη των σημείων του μελετώμενου τρισδιάστατου αντικειμένου. Παρακάτω θα γίνει μια περαιτέρω ανάλυση της κάθε διάταξης.

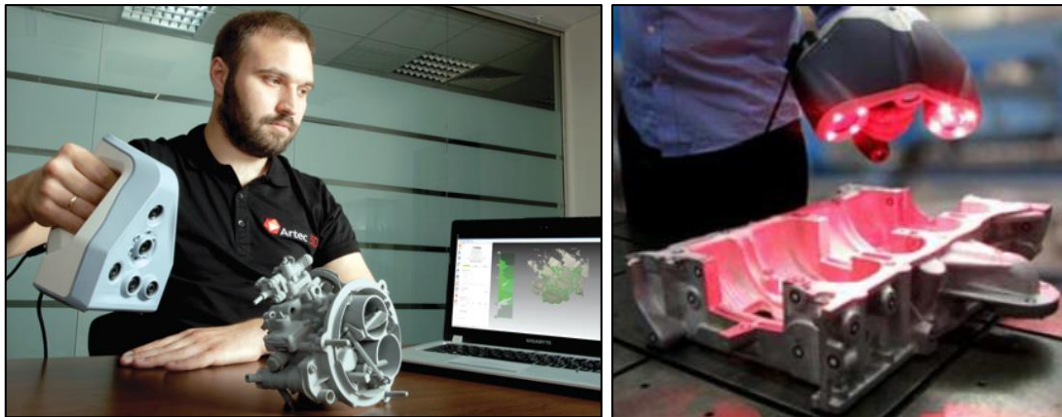
Οι **σαρωτές laser** όπως λέει και το όνομα τους, χρησιμοποιούν laser για την σάρωση του αντικειμένου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σύγχρονα συστήματα που λειτουργούν με laser δεν χρησιμοποιούν σημειακή πηγή φωτός laser, αλλά συστήματα που εκτοξεύουν μια γραμμή φωτός, επιτυγχάνοντας έτσι την

¹¹ Πηγή από: (Melexis, 2020)

ταυτόχρονη σάρωση πολλών σημείων του αντικειμένου. (Herráez *et al.*, 2016) Οι σαρωτές αυτοί, μπορεί να είναι χειρός, όπου η σάρωση του αντικειμένου γίνεται με την μετακίνηση του τρισδιάστατου σαρωτή γύρω από την γεωμετρία του σαρωμένου αντικειμένου ή σταθεροί σαρωτές, όπου η δέσμη του laser σαρώνει μια προκαθορισμένη περιοχή. Η διασφάλιση της ευθυγράμμισης και κατά συνέπεια της ακρίβειας της σάρωσης γίνεται με χρήση, είτε σταθερών στόχων γύρω απ' το μελετώμενο αντικείμενο, είτε με χρήση αυτοκόλλητων ως σημείων αναφοράς πάνω στο αντικείμενο. Στην εικόνα 3.2.2 είναι εμφανή τα αυτοκόλλητα πάνω στο αντικείμενο.

Οι **σαρωτές δομημένου φωτός** χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αυτοί του λευκού και του μπλε φωτός.

Οι **σαρωτές λευκού φωτός** χρησιμοποιούν την τεχνολογία τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων, αλλά αντί για την χρήση laser, γίνεται χρήση σαρωτή-προτζέκτορα που παράγει λευκό φως και προβάλλει ένα σύνολο γραμμικών μοτίβων πάνω στο μελετώμενο αντικείμενο. (Capture 3D, 2020) Η κάμερα που υπάρχει στο σύστημα στη συνέχεια, αξιοποιείται για τον εντοπισμό διακυμάνσεων στις δυσδιάστατες γραμμές των γραμμικών μοτίβων πάνω στο τρισδιάστατο αντικείμενο. Έπειτα, με τη χρήση προηγμένων αλγόριθμων δημιουργείται ένα νέφος σημείων. Τα σημεία αυτά έχουν αποθηκευμένα μέσα τους συντεταγμένες στο καρτεσιανό σύστημα. Το σύνολο αυτών των σημείων δημιουργούν ένα ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο του φυσικού αντικειμένου. Αξίζει να αναφερθεί πως το λευκό φως εμπεριέχει όλα τα μήκη του ορατού φωτός με μήκος περίπου από 400 έως **700nm**.



Εικόνα 3.2.1-3.2.2: ¹²Σάρωση λευκού φωτός με σαρωτή χειρός (Artec 3D), ¹³Σάρωση laser με σαρωτή χειρός (HandySCAN 3D)

¹² Εικόνα από: <https://www.digitalengineering247.com/article/wp-content/uploads/2015/08/fig-01.jpg>


¹³ Εικόνα από: (CREAFORM, 2014)

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
3D σαρωτές laser	Κατάλληλοι για χρήση σε οποιαδήποτε κατάσταση φωτισμού	Δεν έχουν τρομερή ακρίβεια
	Κατάλληλοι για αποτύπωση φθορών, ρωγμών	Έχουν μεγάλη ανάγκη για κατάλληλη τοποθέτηση
	Πιο γρήγορη σάρωση απ' του δομημένου φωτός	Χρειάζεται προφύλαξη απ' τα μάτια
3D σαρωτές δομημένου φωτός	Καλή ακρίβεια	Πιο αργές σαρώσεις
	Δεν χρειάζονται προφυλάξεις	Ακατάλληλοι για σάρωση σε γυαλιστερές επιφάνειες

Πίνακας 3.2.1: Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα σαρωτών laser-δομημένου φωτός

Συγκριτικά με τους σαρωτές λευκού φωτός, οι σαρωτές μπλε φωτός είναι μια νεότερη τεχνολογία. Οι **σαρωτές μπλε φωτός** είναι μια εξέλιξη της τεχνολογίας του λευκού φωτός. Βασίζονται (Chien *et al.*, 2018) στην ίδια τεχνολογία (τριγωνισμός) αλλά με την χρήση του μπλε φωτός αντί για λευκό, το οποίο έχει μικρότερο μήκος κύματος (περίπου 70 nm) με αποτέλεσμα οι μετρήσεις είναι πιο ακριβείς. Επίσης, λόγω του μικρού μήκους κύματος, το φως δεν ανακλάται σε τόσο μεγάλο βαθμό, κάνοντας αυτή τη τεχνολογία πιο κατάλληλη για σάρωση διάφανων επιφανειών σε σύγκριση με τους σαρωτές laser και λευκού φωτός. Επιπρόσθετα, επειδή οι σαρωτές αυτοί συνήθως έχουν λαμπτήρες τεχνολογίας LED, που δεν θερμαίνονται πολύ, κάτι που είναι θετικό για αλληπάλληλες σαρώσεις.(Jeon *et al.*, 2015) Τέλος, σε σύγκριση με τους σαρωτές λευκού φωτός, οι σαρωτές αυτοί μπορούν να πάρουν ακριβές μετρήσεις σε πολύ φωτεινότερους χώρους.

Color	Wavelength (nanometers)
Red Light	~650 nm
Orange Light	~590 nm
Yellow Light	~570 nm
Green Light	~510 nm
Blue Light	~475 nm



Εικόνα 3.2.3: ¹⁴Τα μήκη κύματος των χρωμάτων

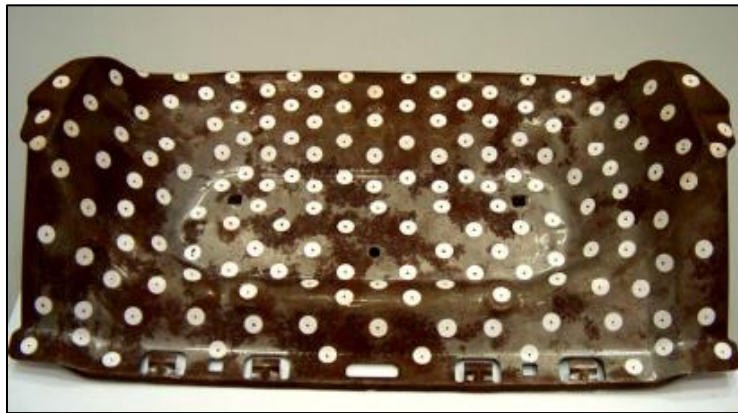
3.3 ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ

Η φωτογραμμετρία, η οποία είναι μια τρίτη μέθοδος σάρωσης, (photogrammetry ή computer vision) είναι μια τεχνική σάρωσης (Kaufman, Rennie and Clement, 2015) τρισδιάστατων δοκιμών με την χρήση μίας ή ενός πλήθους καμερών με την χρήση τουλάχιστον δύο φωτογραφιών. Είναι μια τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για πάνω από εκατό πενήντα χρόνια αλλά με την ανακάλυψη και εξέλιξη των ψηφιακών

¹⁴ Εικόνα από: <https://blog.medit.com/medit/blog/2017/7/28/why-using-blue-light>

καμερών καθώς και την αύξηση της επεξεργαστικής ισχύος των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχει εξελιχθεί στο σημείο που μπορεί να αποτυπωθεί ένα αντικείμενο σε τριακόσιες εξήντα μοίρες. Η χρήση της φωτογραμμετρίας εφαρμόζεται σε πολλούς κλάδους όπως είναι η τοπογραφία και η χωροταξική μελέτη, (Bogdan, Nedelcu and Pădurean, 2019) στον μηχανολογικό τομέα όμως συνήθως χρησιμοποιείται για τον ποιοτικό έλεγχο, για μετρήσεις παραμόρφωσης ή για την γεωμετρική ανασυγκρότηση ενός μελετώμενου αντικειμένου.

Είναι μια τεχνική (Gerbino *et al.*, 2004) που δεν θεωρείται πολύ ακριβή μιας και συνήθως η ακρίβεια είναι μικρότερη του ενός χιλιοστού. Παρόλα αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές όπως την τοποθέτηση ειδικών αυτοκόλλητων πάνω στο αντικείμενο που λειτουργούν ως «οδηγοί» (αυτό γίνεται πολλές φορές και στους σαρωτές) της θέσης του στον χώρο, για την λήψη των σημείων του αντικειμένου με μεγαλύτερη ακρίβεια. Για την λήψη ενός σωστού αποτελέσματος απαιτείται καλή φωτεινότητα στον χώρο και είναι πολύ σημαντικό να έχει γίνει καλή βαθμονόμηση του συστήματος καμερών πριν την εκκίνηση της μελέτης. Η στερεοσκοπική όραση που αναφέρθηκε πιο πάνω είναι μια τεχνική φωτογραμμετρίας με την χρήση δύο καμερών και αποτελεί μία από τις πιο απλές διατάξεις που μπορούν να συναντηθούν.



Εικόνα 3.3.1: ¹⁵Εικόνα μιας θέσης αυτοκινήτου με αυτοκόλλητα οδηγούς για την μελέτη του με την χρήση φωτογραμμετρίας

¹⁵ Εικόνα από: (Gerbino *et al.*, 2004)

3.4 ΣΑΡΩΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Παραπάνω, έγινε αναφορά στα είδη και τις τεχνολογίες σαρωτών που χρησιμοποιούνται για την αντίστροφη μηχανική. Στη συνέχεια θα δοθούν πληροφορίες για τον σαρωτή που χρησιμοποιήθηκε στη πειραματική διαδικασία.

Ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία είναι ο David SLS2, ο οποίος είναι ένας σαρωτής δομημένου λευκού φωτός Γερμανικής κατασκευής απ' την DAVID Vision Systems GmbH, η οποία εξαγοράστηκε απ' την HP το 2016 (Bridget O'Neal, 2016). Ο σαρωτής κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 2014 με κόστος περίπου τα 3.275 δολάρια.

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται το σύστημα σάρωσης είναι (Patel, 2002) ο LED προτζέκτορας (με μέγιστη ανάλυση 1280*800-pixel και ρυθμό ανανέωσης 60 Hz) και η κάμερα μεταβαλλόμενης φωτεινότητας και διαφράγματός (f 16 - 1.4). Αυτά είναι βιδωμένα σε μια βάση που έχει ράγα για αλλαγή θέσης της κάμερας και του σαρωτή. Η βάση είναι κοχλιωμένη σε ένα τρίποδο. Επίσης το σύστημα έχει ένα πάνελ με στόχους για βαθμονόμηση του σαρωτή και της κάμερας, το οποίο στηρίζεται με δύο στηρίγματα των ενενήντα μοιρών. Τέλος υπάρχει ένα USB-stick που περιέχει το «κλειδί» εκκίνησης του προγράμματος σάρωσης της DAVID.

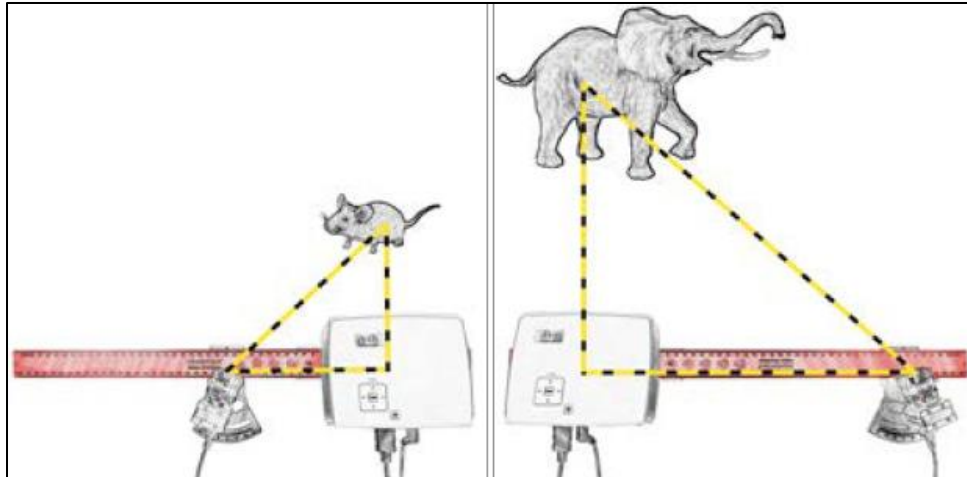
3.5 ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η διαδικασία ρύθμισης του συστήματος που θα ακολουθήθηκε και στην πειραματική διαδικασία.

Ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου που δέχεται σάρωση, τοποθετείτε η κάμερα στην κατάλληλη θέση με βάση το βιβλίο οδηγιών, όπως περιγράφει το παρακάτω διάγραμμα.

Μέγεθος σαρωμένου αντικειμένου	Θέση κάμερας (όπως βλέπουμε από πίσω)
Μέχρι 110mm	Αριστερά του προτζέκτορα
Από 110 μέχρι 350mm	Προαιρετικό, καλύτερα από αριστερά
Από 350mm	Δεξιά του προτζέκτορα

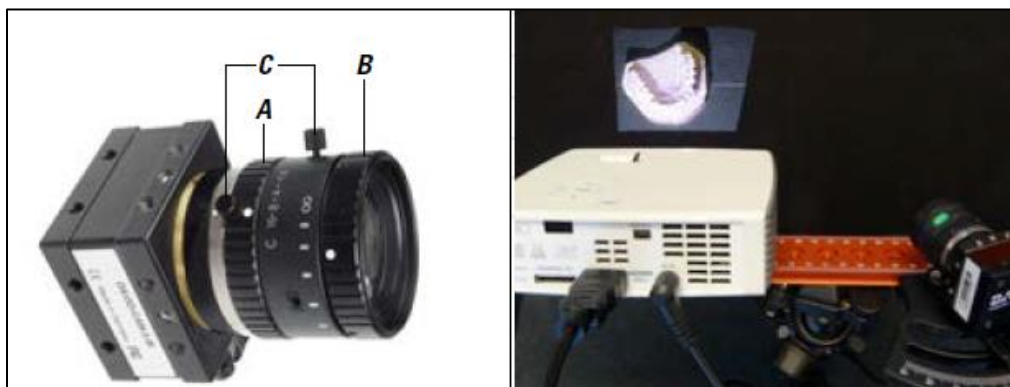
Πίνακας 3.5.1: Θέση τοποθέτησης αντικειμένου ανάλογα με το μέγεθος της κάμερας



Εικόνα 3.5.1: Παράδειγμα θέσης ανάλογα μέγεθος του αντικειμένου

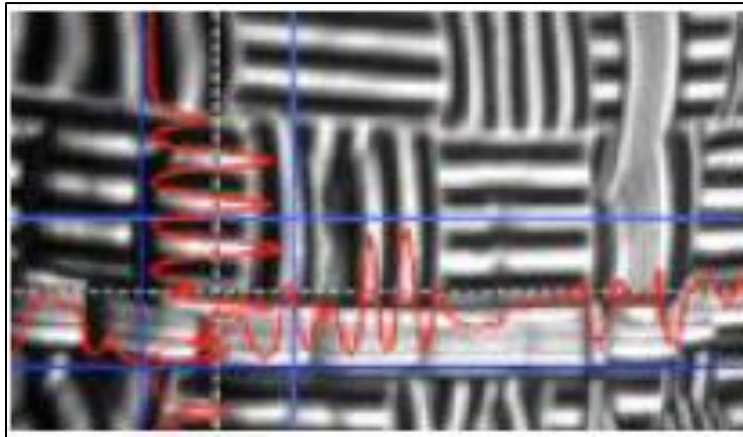
Η κάμερα πρέπει να είναι στραμμένη στην περιοχή σάρωσης υπό περίπου 22° . Για πολύ μεγάλα αντικείμενα ή αντικείμενα με πολύ βαθιές οπές, ίσως χρειαστεί μικρότερη γωνία τοποθέτησης της κάμερας. Γωνίες μικρότερες των 20° έχουν ως αποτέλεσμα μείωση της ποιότητας σάρωσης. Αν η κάμερα τοποθετηθεί σε μεγαλύτερη κλίση απ' τις 30° , μπορεί να αυξηθεί η ποιότητα σάρωσης λίγο, αλλά προτείνεται μόνο για πολύ επίπεδα αντικείμενα. Μεγάλες γωνίες στην κάμερα, είναι μη πρακτικές και μειώνουν το βάθος του μετρούμενου μήκους.

Αφότου συνδεθεί το σύστημα με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και τοποθετηθεί η κάμερα στην κατάλληλη θέση, πρέπει να γίνει η ρύθμιση του προγράμματος για τη βαθμονόμηση του σαρωτή. Όταν τοποθετηθεί το σύστημα στην κατάλληλη θέση ώστε το σαρωμένο αντικείμενο να φωτίζεται καταλλήλως, γίνεται εστίαση του προτζέκτορα. Στη συνέχεια, πρέπει να διορθωθεί η έκθεση (exposure) της κάμερας (συνήθως $1/60s$), αλλιώς η λήψη της κάμερας μπορεί να μην είναι σταθερή (άμα είναι λάθος το exposure φαίνεται λες και η κάμερα τρεμοπαίζει).



Εικόνα 3.5.2: ¹⁶Κάμερα (αριστερά) (Α) διάφραγμα, (Β) εστίαση, (Γ) βίδες στερέωσης, (δεξιά) παράδειγμα διάταξης για σάρωση οδοντοστοιχίας

Η ρύθμιση της φωτεινότητας του σαρωτή στην αρχή πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να είναι μέγιστη. Στο πρόγραμμα υπάρχουν μπλε και κόκκινες βοηθητικές γραμμές. Οι κόκκινες γραμμές πρέπει να είναι ημιτονοειδείς στα σημεία που είναι πάνω στο σαρωμένο αντικείμενο. Στην συνέχεια με την χρήση των βοηθητικών γραμμών ο χρήστης πρέπει να με περιστρέψει το δαχτυλίδι του διαφράγματος ώστε οι κόκκινες γραμμές να είναι κοντά στα όρια των μπλε χωρίς όμως να τα ξεπερνάνε. Αν αυτό δεν είναι δυνατόν με την υπάρχουσα φωτεινότητα, τότε ο χρήστης την μειώνει λίγο από τον σαρωτή. Αυτό γίνεται μέχρι να αποκτηθεί η βέλτιστη ρύθμιση.



Εικόνα 3.5.3: Παράδειγμα ορθής θέσης κόκκινων γραμμών

Τέλος, γίνεται ρύθμιση της κάμερας και του σαρωτή με βάση το πάνελ στο πρόγραμμα του DAVID. Ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου που θα σαρωθεί, επιλέγεται το κατάλληλο μοτίβο στο πάνελ και τοποθετείται στο σημείο που θα βρίσκεται το σαρωμένο αντικείμενο. Πρέπει η εικόνα της κάμερας να δείχνει το προβαλλόμενο μοτίβο όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ευκρίνεια και να φαίνονται τουλάχιστον οι 6 δακτύλιοι του μοτίβου. Στο πρόγραμμα του SLS-2 πρέπει επίσης να εισαχθούν τα στοιχεία του μοτίβου που επιλέχθηκαν. Αν η βαθμονόμηση του προγράμματος έχει γίνει σωστά, τότε στο τέλος το πρόγραμμα παρουσιάζει τις παραμέτρους επιλογής σάρωσης που έχουν επιλεγεί.

¹⁶ Εικόνες 3.4.1-3.4.3 από: SLS-2: Quick Guide

Αν έχουν γίνει όλα τα βήματα σωστά, τότε το σύστημα είναι κατάλληλα ρυθμισμένο και έτοιμο για σάρωση του μελετώμενου αντικειμένου (Προσοχή! Δεν πρέπει να μετακινηθεί το σύστημα σάρωσης μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία αλλιώς οι σαρώσεις θα είναι λανθασμένες, καθιστώντας τες άχρηστες για περαιτέρω ανάλυση).

4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Όπως θα γίνει σαφές και παρακάτω, το αποτέλεσμα της σάρωσης του μελετώμενου αντικειμένου δεν είναι επεξεργάσιμο στην μορφή που βρίσκεται. Για μετατραπεί σε επεξεργάσιμη μορφή από τα CAD (Computer Aided Design) και CAE (Computer Aided Engineering) συστήματα πρέπει να γίνουν κάποιες συγκεκριμένες διεργασίες. Στην συνέχεια θα αναφερθούν περιληπτικά τα CAD προγράμματα, οι κατηγορίες διάκρισης των επιφανειών και οι μορφές αποθήκευσης των αρχείων, ώστε να γίνει σαφές γιατί γίνονται κάποιες επιλογές κατά πειραματική διαδικασία.

4.1 CAD ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

Τα CAD (Computer Aided Design), ή ο σχεδιασμός με τη βοήθεια υπολογιστή, είναι μία κατηγορία προγραμμάτων τα οποία επιτρέπουν τον σχεδιασμό και επεξεργασία ενός μελετώμενου αντικειμένου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι κυριότερες χρήσεις (Association, 2007) των CAD προγραμμάτων είναι, η στερεή μοντελοποίηση (Solid Modeling), η επιφανειακή μοντελοποίηση (Surface Modeling), η συνδεσμολογία (Assembly), ο σχεδιασμός λεπτομερειών (Drafting Detailing) και η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση (Reverse Engineering).

Η στερεή μοντελοποίηση χρησιμοποιείται για την δημιουργία στερεών μοντέλων ενώνοντας και κόβοντας διαφορετικές στερεές γεωμετρίες. Έτσι δημιουργείται ένα εικονικό αντίγραφο του πραγματικού αντικειμένου το οποίο μπορεί να μελετηθεί σαν ένα πραγματικό αντικείμενο. Η στερεή μοντελοποίηση χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, την παραμετρική και την άμεση. Η παραμετρική μοντελοποίηση, είναι ουσιαστικά η δημιουργία του CAD στερεού με την χρήση παραμέτρων όπως είναι οι διαστάσεις. Το θετικό αυτής της κατηγορίας είναι ότι το μοντέλο είναι πλήρως επεξεργάσιμο για οποιοδήποτε σημείο από το ιστορικό δημιουργίας του. Η άμεση μοντελοποίηση επιτρέπει την άμεση διαμόρφωση του μοντέλου αναιρώντας το ή τροποποιώντας το.

Η επιφανειακή μοντελοποίηση, χρησιμοποιείται για την δημιουργία επιφανειών στο επιθυμητό σχήμα με την χρήση εργαλείων όπως του κοψίματος, της ραφής και ένωσης για την δημιουργία του τελικού μοντέλου.

Η συνδεσμολογία, είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ενός πλήθος στερεών ή επιφανειακών μοντέλων σε ένα επίπεδο εργασίας (work plane) για την δημιουργία ενός αντικειμένου αποτελούμενο από αυτά τα μοντέλα.

Ο σχεδιασμός λεπτομερειών, είναι η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την δημιουργία των δυσδιάστατων σχεδίων των μελετώμενων αντικειμένων, συνήθως απευθείας από ένα τρισδιάστατο μοντέλο.

Τα περισσότερα CAD προγράμματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το τελικό πλέγμα των σαρώσεων της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης για την μετατροπή του σε CAD στερεό.

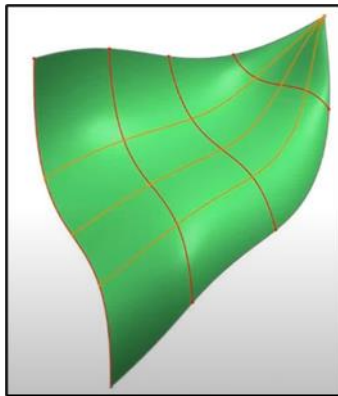
Τα προγράμματα CAD έχουν πολλά θετικά χαρακτηριστικά που τα κάνουν ιδανικά για την μελέτη της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης. Καταρχάς γίνεται εξοικονόμηση του χρόνου μελέτης ενός δοκιμίου που μεταφράζεται στην αύξηση της παραγωγικότητας. Επίσης, αυξάνεται η ακρίβεια και η ποιότητα των αποτελεσμάτων της διαδικασίας. Τέλος, λόγω του γεγονότος ότι η διαδικασία γίνεται ηλεκτρονικά, η μεταφορά των αρχείων είναι άμεση και έτσι τυχόν επικοινωνία μεταξύ των μελών μιας ομάδας μελέτης του αντικειμένου γίνεται πολύ πιο γρήγορα και αποτελεσματικά.

Παρόλα αυτά, τα προγράμματα παρουσιάζουν κάποιες αδυναμίες, που προέρχονται από την φύση του κώδικα και μπορεί να αποτελέσουν πρόβλημα κατά την διάρκεια της μελέτης της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης. Τα σφάλματα που προκύπτουν σε ένα CAD πρόγραμμα χωρίζονται σε δύο τύπους, (Ficco, Mandorli and Otto, 1999) τα γεωμετρικά και τοπολογικά σφάλματα.

Στα γεωμετρικά σφάλματα ανήκουν οι αυτο-τεμνόμενες επιφάνειες (Self-intersecting surfaces) και καμπύλες (Self-intersecting curves). Αυτές οι επιφάνειες διπλώνουν πάνω στον εαυτό τους, ενώ κανονικά πρέπει να είναι συνεχείς και λείες χωρίς να υπάρχουν αλλαγές κατεύθυνσης. (Ju, 2009) Αντίστοιχα οι αυτό-τεμνόμενες καμπύλες συναντώνται όταν υπάρχει απότομη αλλαγή κατεύθυνσης. Οι ορθές καμπύλες δεν μπορούν να στρίψουν, να αντιστραφούν ή να τέμνονται. Επίσης γεωμετρικό σφάλμα αποτελεί η αβεβαιότητα μοντελοποίησης (Modeling Uncertainty), που συμβαίνει όταν οι επιφάνειες ή σώματα έχουν χαμηλού επιπέδου σφάλματα. Ακόμα σφάλμα αποτελεί η ύπαρξη επικαλυπτόμενων (Overlapping Faces) και διασταυρούμενων προσώπων (Intersecting Faces), που συμβαίνει όταν δύο ή περισσότερα πρόσωπα επικαλύπτονται μεταξύ τους ή αντίστοιχα περνούν το ένα μέσα από το άλλο. Ένα

άλλο σφάλμα που συναντάται είναι η λανθασμένη μετάφραση ενός εισαγόμενου αρχείου, διότι δεν ταιριάζει με τις ανοχές του CAD συστήματος και λέγονται ακανόνιστες επιφάνειες (Irregular Surfaces). Αυτά τα σφάλματα προκύπτουν συνήθως σε γεωμετρίες με απότομες αλλαγές κατεύθυνσης. Ακανόνιστη καμπύλη (Irregular Curve) συναντάται όταν τα μαθηματικά δεδομένα δεν μπορούν να περιγράψουν σωστά μια καμπύλη ή ένα διάνυσμα της είναι μηδέν. Αυτό το σφάλμα συμβαίνει όταν η επιφάνεια προσέγγισης δεν ταιριάζει με την ανοχή του συστήματος της καθοριστικής επιφάνειας στο αρχικό ουδέτερο αρχείο. Γεωμετρικό σφάλμα αποτελεί και η επιφάνεια μοναδικότητας (Singularity surface), που είναι ένα σημείο στο διάνυσμα επιφανείας ορισμένο λάθος, κάνοντας αδύνατο τον προσδιορισμό της κανονικής επιφανείας. Επιπρόσθετα, ο εκφυλισμός των επιφανειών (Degenerate surface) προκύπτει όταν δεν υπάρχουν τέσσερις πλευρές για την σωστή «περιγραφή» ενός πλέγματος, δημιουργώντας στο σημείο την μοναδικότητα, με αποτέλεσμα η γεωμετρία της επιφάνειας να μην μπορεί να δημιουργηθεί από το πρόγραμμα ή να δημιουργείται αλλά το αποτέλεσμα να είναι εσφαλμένο.

Τα τελευταία γεωμετρικά σφάλματα είναι οι ασυνέχεις επιφανειών (Surface discontinuities) και καμπυλών (Curve discontinuities) που προκύπτουν από τη απότομη αλλαγή κατεύθυνσης των γεωμετριών ή ασύνδετη γεωμετρία.



Εικόνα 4.1.1: Παράδειγμα εκφυλισμού επιφάνειας

Στα τοπολογικά σφάλματα ανήκουν ο εσφαλμένος προσανατολισμός βρόχου (Loop orientation error) και προσώπου (Face orientation error), συνδεσιμότητας βρόχου (Loop connectivity error), η ύπαρξη πολλαπλών κορυφών (Duplicate vertices), η απώλεια δεδομένων από μια κακή όψη (Bad face missing data) ή ακμή (Bad edge missing data) (μόνο σε περιβάλλον κατασκευής). Ο εσφαλμένος προσανατολισμός βρόχου συμβαίνει όταν ο εξωτερικός βρόχος έχει λάθος κατεύθυνση σε σύγκριση με την κανονική κατεύθυνση του προσώπου. Κανονικά, ο εξωτερικός βρόχος και η κανονική κατεύθυνση

πρέπει να έχουν την ίδια φορά. Εάν κάποια από τις κατευθύνσεις είναι απέναντι από την άλλη, αυτό αποτελεί σφάλμα.

Η επάνω πλευρά ενός προσώπου ονομάζεται κανονική επιφάνεια. Οι γειτονικές όψεις μέσα σε ένα στερεό πρέπει να έχουν όλες την ίδια κανονική κατεύθυνση. Όταν η κατεύθυνση του βρόχου είναι ασυνεπής με την κανονική κατεύθυνση του προσώπου, τότε υπάρχει εσφαλμένος προσανατολισμός προσώπου. Σφάλμα συνδεσιμότητας βρόχου προκύπτει στο κατασκευαστικό περιβάλλον μόνο και είναι η λανθασμένη αναπαράσταση των βρόχων (βρόχος είναι ένα σύνολο γραμμών, τόξων και spline συνδυασμένων οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως όρια σε επιφάνειες), κάνοντας έτσι λανθασμένη τη γεωμετρία του μελετώμενου αντικειμένου. Ύπαρξη πολλαπλών κορυφών συναντάται συνήθως σε πολυσύνθετα αντικείμενα μετά το πέρας της διαδικασίας μετάφρασης, που γίνεται η προσπάθεια από το πρόγραμμα να συγχωνεύσει τις κορυφές που έχουν τις ίδιες ανοχές. Τέλος, απώλειες δεδομένων από κακές όψεις ή ακμές προκύπτουν όταν τα πρόσωπα δεν έχουν τους κατάλληλους υποκείμενους ορισμούς και είναι ελλιπή. Αυτές οι γεωμετρικές συνήθως είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθούν για μοντελοποίηση.

4.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΔΙΑΚΡΙΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Η πρώτη κατηγορία διάκρισης των επιφανειών είναι τα **σημειακά Σύννεφα (Point Cloud)**. Τα σημειακά σύννεφα είναι ένα σύνολο από σημειακά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν ένα αντικείμενο ή τρισδιάστατο σχήμα. Κάθε ένα από αυτά τα σημεία εμπεριέχει πληροφορίες για την θέση του στο καρτεσιανό σύστημα (x,y,z) και το διάνυσμα του (vector) που δείχνει και τον προσανατολισμό του. Τέλος, αν ο σαρωτής που κάνει τη σάρωση μπορεί να λάβει τα παρακάτω στοιχεία, τότε τα σημεία μπορούν να έχουν και πληροφορίες για το χρώμα της σαρωμένης επιφάνειας (σε μορφή RGB) καθώς και την ένταση της, που ουσιαστικά είναι η φωτεινότητα του σαρωμένου σημείου.

Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή των **πολυγωνικών Πλεγμάτων (Polygon Mesh)**. Τα πολυγωνικά πλέγματα είναι μια διακριτή αναπαράσταση της εξωτερικής επιφάνειας ενός αντικειμένου το οποίο αποτελείται από σημεία, άκρες και όψεις. Αποτελούνται συνήθως από τρίγωνα, τετράγωνα ή άλλου είδους πολύγωνα και ανάλογα το είδος των πολύγωνων, το πλέγμα χρησιμοποιείται για διαφορετικές εφαρμογές και στόχους. Τα πολυγωνικά πλέγματα μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν από σημειακά σύννεφα, κάτι το οποίο γίνεται συνήθως αυτόματα από τα σύγχρονα σχεδιαστικά προγράμματα.

Το **πλέγμα στοιχείων όγκου (Voxel grid)** χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση ενός αντικειμένου και των χώρων που το απαρτίζουν, με απλό τρόπο. Τα voxel (Ashburner and Friston, 2000) δεν έχουν

κωδικοποιημένη μέσα τους την θέση τους στον χώρο. Αντιθέτως, τα (rendering) συστήματα απεικόνισης βρίσκουν την θέση ενός voxel σε σχέση με τα άλλα voxel του αντικειμένου, για την δημιουργία του πλέγματος του αντικειμένου.

Η τέταρτη κατηγορία διάκρισης επιφανειών είναι αυτής της αναπαράστασης ορίων. Οι **αναπαραστάσεις ορίων (Boundary Representation, B-Rep)** χρησιμοποιούνται ευρέως στον βιομηχανικό τομέα για να περιγράψουν στερεά, όπως τα CAD μοντέλα. (Peuzin-Jubert *et al.*, 2021) Μια αναπαράσταση από B-Rep αποτελείται από πολλά στοιχεία που δημιουργούν την επιφάνεια του αντικειμένου συμπεριλαμβανομένων των όψεων, των ακμών, των περικοπών, των βρόχων και των κορυφών. Οι επιφάνειες του μοντέλου μπορούν να αναπαρασταθούν μέσω παραμετρικών επιφανειών και να συνδεθούν μεταξύ τους με «σύρματα» που αποτελούνται από ακμές και κορυφές.

Πριν αναφερθεί η τελευταία κατηγορία πρέπει να γίνει επεξήγηση το τι είναι spline, B-spline και το Bezier.

Spline είναι ουσιαστικά μια καμπύλη που δημιουργείται από μια μαθηματική αναπαράσταση και κάνει εύκολο για τον χρήστη να σχεδιάσει και να ελέγξει το σχήμα πολύπλοκων καμπυλών και επιφανειών. Η καμπύλη καθορίζεται δίνοντας ένα σύνολο συντεταγμένων στο χώρο, που ονομάζονται σημεία ελέγχου και υποδεικνύουν το γενικό σχήμα της. Έχει υψηλό βαθμό ομαλότητας στα σημεία που τα πολυώνυμα κομμάτια της συνδέονται. Η Spline συναντιέται στο CAD περιβάλλον, σε αντικείμενα με σύνθετες καμπύλες όπως είναι το αμάξωμα ενός αυτοκινήτου και το κέλυφος διαστημικών σκαφών.

B-spline είναι μια συνάρτηση βάσης (Signh, 2020) που περιέχει ένα σύνολο σημείων ελέγχου. Οι καμπύλες B-spline καθορίζονται από τη Bernstein συνάρτηση βάσης και έχει περιορισμένη ευελιξία. Αυτές οι καμπύλες είναι το αποτέλεσμα της χρήσης ανοιχτής ομοιόμορφης συνάρτησης (uniform basis function) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή καμπυλών ανάμειξης (blending curves). Η B-spline επιτρέπει τη σειρά της συνάρτησης βάσης και έτσι, ο βαθμός της καμπύλης είναι ανεξάρτητος από το πλήθος των κορυφών. Έχει ελέγχους της καμπύλης επιφανείας τοπικά και το σχήμα της καμπύλης επηρεάζεται από την κάθε κορυφή.

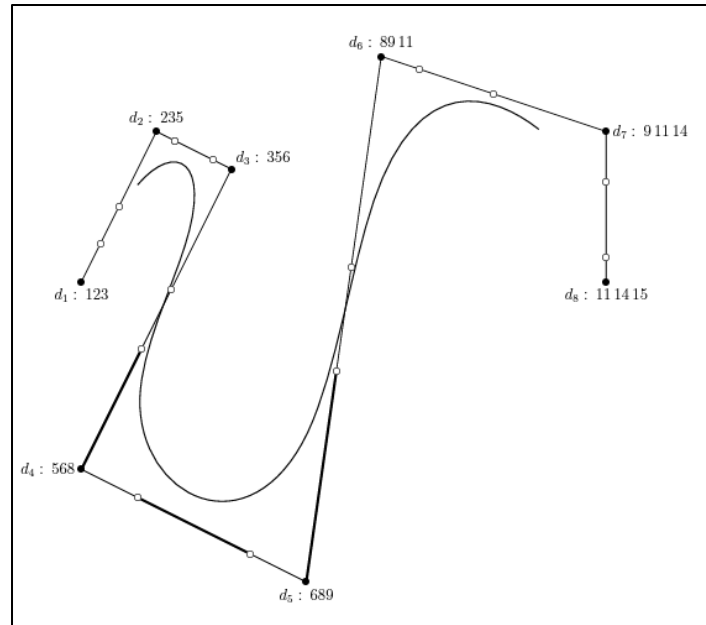
Οι καμπύλες **Bezier** καθορίζονται με οριακές συνθήκες, οι οποίες έχουν χαρακτηριστικό πίνακα ή συνάρτηση ανάμειξης. Ένα μέρος μιας καμπύλης Bezier μπορεί να συμπληρωθεί από απεριόριστο αριθμό σημείων ελέγχου. Ο αριθμός των σημείων ελέγχου προσεγγίζεται και η σχετική τους θέση καθορίζει τον βαθμό του πολυωνύμου Bezier. Γενικά η καμπύλη ακολουθεί το σχήμα ενός πολυγώνου καθορισμού. Οι καμπύλες αυτές εκτός από CAD προγράμματα, βρίσκονται και σε πακέτα σχεδίασης και

ζωγραφικής. Ο βαθμός του πολυωνύμου που ορίζει το τμήμα της καμπύλης είναι πάντα κατά ένα μικρότερος από τον αριθμό σημείων καθορισμού του πολυγώνου.

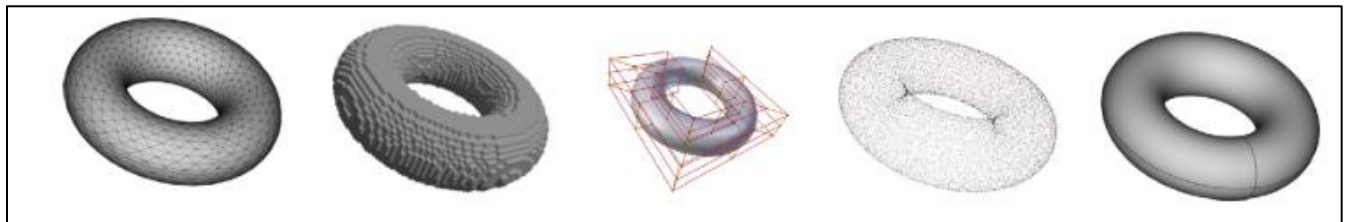
Η τελευταία κατηγορία είναι αυτή των **παραμετρικών επιφανειών (Parametric surfaces, Non Uniform rational basis spline NURBS)**. Οι παραμετρικές επιφάνειες αποτελούνται από ένα μαθηματικό μοντέλο που επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων σχημάτων (Χριστόφορος, 2017), κάτι το οποίο δεν είναι δυνατό να γίνει με ακρίβεια από τους παραπάνω τρόπους διάκρισης των επιφανειών. Μπορούν δηλαδή, να αναπαραστήσουν ένα πολύπλοκο αντικείμενο με απλό τρόπο χρησιμοποιώντας σημεία ελέγχου, ακολουθίες κόμβων και βάρη. Επίσης είναι εύκολα επεξεργάσιμα και απ' τα υπολογιστικά προγράμματα καθώς και απ' τον χρήστη.

Τα NURBS (Hettinga and Kosinka, 2020) μπορούν στην πραγματικότητα να αναπαραστήσουν με απόλυτη ακρίβεια τοπολογικούς δίσκους, κυλίνδρους ή τόρους. Παρόλα αυτά, πιο σύνθετα σχήματα πρέπει να καλυφθούν χρησιμοποιώντας πολλαπλά «μπαλώματα» τα οποία ενώνονται μεταξύ τους και στη συνέχεια «ράβονται» τοπολογικά στο προκύπτον B-rep. Τα «μπαλώματα» αυτά δεν αποτελούν τις περισσότερες φορές NURBS επιφάνειες, κάτι το οποίο κάνει τα συγκεκριμένα μοντέλα μην υδατοστεγή και στην περίπτωση που θέλει ο χρήστης να κάνει προσομοιώσεις προκαλεί μεγάλα προβλήματα.

Τα NURBS είναι ουσιαστικά B-splines, αλλά σε αντίθεση με τις απλές B-splines, τα σημεία (Wikipedia, 2021) ελέγχου έχουν το καθένα όπως προαναφέρθηκε και βάρος. Όταν το βάρος είναι ίσο με 1, ένα NURBS είναι απλώς ένα B-spline και ως εκ τούτου το NURBS γενικεύει τόσο τις καμπύλες B όσο και τις επιφάνειες Bézier, με την κύρια διαφορά να είναι η στάθμιση των σημείων ελέγχου που καθιστά τις καμπύλες NURBS «λογικές».



Εικόνα 4.2.1:¹⁷ Μέρος ενός κυβικού B-spline με ακολουθία κόμβων



Εικόνα 4.2.2:¹⁸ Αναπαράσταση τόρου από αριστερά προς τα δεξιά από: Πολυγωνικό πλέγμα, Πλέγμα στοιχείων όγκου, Παραμετρική επιφάνεια, Σημειακό Σύννεφο, Αναπαράσταση ορίου

4.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ (FORMAT) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ

Τα CAE και CAD προγράμματα έχουν πολλά πρότυπα γεωμετρικής μορφής (format) που μπορούν να διαβάσουν και να επεξεργαστούν. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα πιο βασικά format που συναντώνται σε μια τυπική διαδικασία αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με χρήση σαρωτή.

Το πρώτο format περιγραφής ενός αρχείου, είναι αυτός της **στερεολιθογραφίας (STL, Stereolithography)**. Ο τύπος αρχείου STL υπάρχει από το 1987, αλλά έχει γίνει πολύ δημοφιλής τα τελευταία χρόνια, καθώς οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές χρησιμοποιούν συνήθως αυτόν τον τύπο αρχείων

¹⁷ Εικόνα από: (Vinet and Zhedanov, 2011)

¹⁸ Εικόνα από: (Peuzin-Jubert *et al.*, 2021)

για τις εκτυπώσεις τους. (Jaycon Systems, 2021) Τα αρχεία STL αποθηκεύουν τα αντικείμενα ως ένα σύνολο κορυφών που ενώνονται και σχηματίζουν τριγωνικές όψεις, από όπου προέρχεται και η εσφαλμένη αντίληψη ότι τα αρχικά STL σημαίνουν Standard Triangle Language ή Standard Tessellation Language, ενώ στην πραγματικότητα τα αρχικά βασίζονται στη λέξη Stereolithography. Η μετατροπή των καμπυλών ενός αντικειμένου σε τρίγωνα έχει ως αποτέλεσμα την μη ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας του αντικειμένου. Αυτές οι ανακρίβειες πάνω στο αντικείμενο συνήθως δεν προκαλούν πρόβλημα στην τρισδιάστατη εκτύπωση, αφού ο τρισδιάστατος εκτυπωτής τις περισσότερες φορές έχει μικρότερη μέγιστη ανάλυση εκτύπωσης του αντικειμένου, από την ανάλυση του αρχείου STL.

Το δεύτερο format περιγραφής ενός αρχείου είναι αυτό του αρχείου OBJ. Η **μορφή αρχείου OBJ** αναπτύχθηκε στην αρχή ειδικά για κινούμενα σχέδια από την Wavefront Technologies, αλλά έκτοτε υιοθετήθηκε από την τρισδιάστατη κοινότητα. Ομοίως με τα STL αρχεία, τα OBJ αποθηκεύονται ως μια λίστα κορυφών που ενώνονται με ακμές. Παρόλα αυτά, σε αντίθεση με τα STL αρχεία, τα αρχεία OBJ υποστηρίζουν και πολυγωνικά πρόσωπα. Τα πολύγωνα επιτρέπουν μια πιο ακριβή αναπαράσταση της αρχικής γεωμετρίας από ότι στο STL, αλλά και αυτή η μέθοδος εξακολουθεί να μην απεικονίζει με απόλυτη ακρίβεια την αρχική γεωμετρία. Επιπρόσθετα, αυτά τα αρχεία έχουν την δυνατότητα να αποθηκεύουν το χρώμα του σαρωμένου αντικειμένου. Τέλος, τα αρχεία OBJ επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ χρησιμοποιούν τον ίδιο αριθμό προσώπων με τα STL αρχεία. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιούν αρκετά μεγαλύτερο αποθηκευτικό όγκο από τα STL αρχεία. Στη πειραματική διαδικασία, τα αρχεία που εξάγονται απ' τον σαρωτή λευκού φωτός μας είναι σε μορφή OBJ.

Το τρίτο format περιγραφής είναι της **προδιαγραφής αρχικών γραφικών (IGES, Initial Graphics Exchange Specification)**. Τα πρότυπα για το IGES δημοσιεύθηκαν για πρώτη φορά το 1980 από το Αμερικάνικο (Bhandarkar *et al.*, 2000; Μπιλάλης and Μαραβελάκης, 2014) Εθνικό Γραφείο Τυποποίησης ως NBSIR 80-1978. Το IGES επιτρέπει την κωδικοποίηση καμπυλών και κατά συνέπεια καμπυλωτών επιφανειών αντί να κάνει προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας μικρότερες, επίπεδες επιφάνειες όπως συμβαίνει με τα STL και OBJ αρχεία. Η δυνατότητα κωδικοποίησης καμπύλων επιφανειών επιτρέπει στο IGES να διατηρεί μεγάλη ακρίβεια κατά την εξαγωγή του μοντέλου. Και σε αυτήν την περίπτωση εξαγωγής, το αποτέλεσμα αν και πολύ καλύτερο απ' τις παραπάνω μεθόδους, ούτε σε αυτή είναι τέλειο. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, χαρακτηριστικά όπως τα splines μετατρέπονται σε polylines μειώνοντας έτσι την ακρίβεια τους. Τα αρχεία σε IGES μπορούν επίσης να αποθηκεύσουν μονάδες στην κεφαλίδα του αρχείου. Τέλος, η μορφή IGES δεν αναπτύσσεται πλέον αλλά την χρησιμοποιεί ακόμα ένα μεγάλο μέρος της κοινότητας τρισδιάστατου σχεδιασμού.

Το τελευταίο format περιγραφής ενός αρχείου είναι το **πρότυπο για ανταλλαγή δεδομένων προϊόντος (STEP, SStandard for Exchange of Product Data)**. Το 1994, ο οργανισμός Διεθνών Προτύπων ανέπτυξε τη μορφή αρχείου STEP για να διευκολυνθεί (Sivakumar and Dhanalakshmi, 2013) η μετάβαση σε προσεγγίσεις ενός αντικειμένου με βάση το μοντέλο. Όπως το IGES, έτσι και το STEP επιτρέπει την πιο ακριβή αποθήκευση των μοντέλων κωδικοποιώντας τις καμπύλες επιφάνειες. Ωστόσο, και αυτό εξακολουθεί να έχει μικρές απώλειες κατά την κωδικοποίηση των splines. Σε αντίθεση με τους άλλους τύπους αρχείων, τα αρχεία STEP επιτρέπουν την ενσωμάτωση δεδομένων μηχανικής όπως οι γεωμετρικές διαστάσεις, το υλικό και οι ανοχές του μοντέλου. Τα αρχεία STEP γίνονται όλο και πιο δημοφιλή και τείνουν να αντικαταστήσουν εντελώς το format IGES καθώς αποτελούν ουσιαστικά εξέλιξη του.

Σαν συμπέρασμα, το ποιο format πρέπει να επιλέξει ο χρήστης εξαρτάται από το σκοπό της χρήσης του αντικειμένου και τους περιορισμούς του προγράμματος που χρησιμοποιεί. Στην περίπτωση της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας που χρησιμοποιήθηκε το Geomagic Wrap 2014 και έγινε επεξεργασία του παραγόμενου πλέγματος με το Solidworks Scan to 3D, το αρχείο βρισκόταν στην αρχή σε μορφή OBJ. Μετά το τέλος της επεξεργασίας του σαρωμένου πλέγματος στο Geomagic Wrap 2014, το αρχείο αποθηκεύτηκε πάλι σε μορφή OBJ. Αυτό το έγινε διότι η λειτουργία Scan to 3D για πλέγματα λειτουργεί μόνο με .3ds, .obj, .stl, .wrl, .ply, .ply2 αρχεία και από αυτά, αυτό που ταιριάζει περισσότερο για την επεξεργασία και με την ακρίβεια που χρειάζεται η μελέτη, είναι το .obj.

5 ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθείται για την πειραματική διαδικασία τρισδιάστατης απεικόνισης με χρήση της φωτογραμμετρίας (με την χρήση δυο φωτογραφιών) και της δημιουργίας τρισδιάστατου CAD στερεού ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας τη διαδικασία αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με σαρωτή.

5.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΜΕ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑ

Το πρώτο βήμα είναι πάντα ο καθορισμός των στόχων. Ο βαθμός επίτευξης των στόχων αποτελεί το κριτήριο ώστε ο χρήστης να κρίνει αν η διαδικασία είναι επιτυχημένη. Στην μεθολογία τρισδιάστατης

απεικόνιση με φωτογραμμετρία χρησιμοποιώντας δύο φωτογραφίες, το δεύτερο βήμα που πραγματοποιείται είναι ο έλεγχος των λαμβανόμενων φωτογραφιών. Πρέπει ουσιαστικά, ο χρήστης να ελέγξει αν οι φωτογραφίες που λαμβάνει από το σύστημα φωτομετρίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σωστή απεικόνιση του τρισδιάστατου CAD στερεού. Στην συνέχεια, γίνεται εισαγωγή μιας φωτογραφικής όψης (π.χ. πλάγια αριστερή) της γεωμετρίας του υλικού στο CAD πρόγραμμα και με βάση αυτήν ορίζεται η θέση σχεδιασμού του μοντέλου στο καρτεσιανό σύστημα. Επίσης πρέπει να οριστεί το μέγεθος του αντικειμένου. Αυτό γίνεται μετρώντας μια απλή γεωμετρία του φυσικού αντικειμένου όπως είναι μια ευθεία επιφάνεια και δημιουργώντας την στο CAD πρόγραμμα φέρνοντας στην κατάλληλη κλίμακα την φωτογραφία της φωτομετρίας. Μετά, γίνεται σχεδιασμός των γεωμετρικών στοιχείων του αντικειμένου με βάση αυτή τη φωτογραφία που έχει εισαχθεί στο CAD πρόγραμμα. Αφότου ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, εισάγεται μια άλλη φωτογραφική όψη του αντικειμένου στο ανάλογο επίπεδο που έχει το αντικείμενο μια κοινή επίπεδη επιφάνεια. Με βάση τις δύο φωτογραφίες δημιουργούνται οι γεωμετρίες του αντικειμένου, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα CAD εργαλεία σε τρισδιάστατη μορφή. Όταν τελειώσει αυτή η διαδικασία, τότε δημιουργεί ο χρήστης τις επιφάνειες με βάση τις σχεδιασμένες γεωμετρίες, χρησιμοποιώντας εντολές όπως είναι το loft. Στην συνέχεια, ο χρήστης ενοποιεί τις επιφάνειες μεταξύ τους με την κατάλληλη εντολή. Μετά, μετατρέπεται το αντικείμενο από επιφανείας σε στερεό μοντέλο. Γίνεται μια σύγκριση του τελικού αντικειμένου με τις φωτογραφίες, και αν όλα είναι εντάξει τότε ο χρήστης κάνει ότι αλλαγές είχε βάλει ως στόχο, αν όχι διορθώνει ότι χρειάζεται. Τέλος, κάνει έλεγχο αν επιτευχθήκαν οι στόχοι και έτσι τελειώνει η μεθοδολογία τρισδιάστατης απεικόνισης με φωτογραμμετρία χρησιμοποιώντας δύο φωτογραφίες.

5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΕΡΕΟΥ CAD ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΕ ΣΑΡΩΤΗ

Καταρχάς, καθορίζονται οι στόχοι της δημιουργίας του τρισδιάστατου CAD στερεού ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας τη διαδικασία αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με χρήση σαρωτή. Στην συνέχεια, γίνεται η ρύθμιση του συστήματος σάρωσης. Αφού σαρωθεί το μελετώμενο αντικείμενο, ο χρήστης αρχίζει και επεξεργάζεται τις παραγόμενες σαρώσεις στο κατάλληλο πρόγραμμα. Αφαιρεί τις ακίδες, τα σφάλματα και τον θόρυβο από τις σαρώσεις. Κλείνει επίσης, τις τρύπες όπου χρειάζεται. Με το πέρας των διορθώσεων, γίνεται η ευθυγράμμιση των σαρώσεων μεταξύ τους. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία ευθυγράμμισης, ο χρήστης ενώνει τις σαρώσεις μεταξύ τους και δημιουργεί ένα μοναδικό πλέγμα. Σε αυτό το πλέγμα γίνονται πάλι διορθώσεις όπου χρειάζεται και μετά ορίζονται οι καρτεσιανές

συντεταγμένες. Τελευταίο βήμα πριν αποθηκευτεί το σαρωμένο αντικείμενο για να επεξεργαστεί μετά στο CAD πρόγραμμα, είναι η προαιρετική μείωση των πολυγώνων του πλέγματος.

Στην συνέχεια, μεταφέρει ο χρήστης το πλέγμα στο CAD πρόγραμμα. Εκεί, ο χρήστης έχει δυο επιλογές. Η πρώτη επιλογή είναι να βασιστεί στη σάρωση κάνοντας τομές σε σημεία του πλέγματος και με βάση αυτές να κάνει εξωθήσεις (extrude) ή τις ενώνει μεταξύ τους για να δημιουργήσει το CAD στερεό. Το αρνητικό με αυτή την επιλογή είναι ότι, πρώτον όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω αν το αρχείο δεν υποστηρίζει την ακριβή περιγραφή των καμπυλών τότε αυτές δεν θα είναι ακριβείς και δεύτερον, τυχόν μικρά σφάλματα που δεν έχουν διευθετηθεί θα περαστούν στο στερεό CAD μοντέλο. Αν επιλεγεί, η πρώτη μέθοδος η διαδικασία μετατροπής αυτών των γεωμετριών είναι απλή. Απλά μετατρέπει τις γεωμετρικές που έχει εξάγει από τις τομές σε επιφάνειες και στην συνέχεια τις ενοποιεί. Τέλος μετατρέπει το μοντέλο επιφανείας σε στερεό μοντέλο. Στην δεύτερη περίπτωση, ο χρήστης χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για να περιγράψει το σαρωμένο πλέγμα με απλές γεωμετρικές επιφάνειες και spline. Όταν καταφέρει να έχει τα κατάλληλα σχήματα, τότε αφαιρεί τυχόν γεωμετρικές που περισσεύουν. Στην συνέχεια, όπως και στην πρώτη περίπτωση ενοποιεί τις επιφάνειες με το κατάλληλο εργαλείο, και μετά το μετατρέπει σε CAD στερεό. Μετά, και στις δύο περιπτώσεις γίνεται η σύγκριση του CAD στερεού που δημιουργήθηκε με το αρχικό πλέγμα, χρησιμοποιώντας την ανάλυση απόκλισης. Αν η απόκλιση είναι αποδεκτή τότε συνεχίζει η διαδικασία, αλλιώς πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις. Έπειτα, γίνονται οι αλλαγές στο στερεό για την επίτευξη ενός στόχου αν χρειάζεται. Τέλος, γίνεται ο έλεγχος επίτευξης των στόχων και έτσι τελειώνει η μεθοδολογία δημιουργίας στερεού CAD με χρήση αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με σαρωτή.

6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6.1 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε επιγραμματικά παραπάνω, ένας τρόπος να περαστεί σε CAD/CAE πρόγραμμα ένα αντικείμενο που θέλει ο χρήστης να επεξεργαστεί, είναι με τη χρήση φωτογραμμετρίας.

Η φωτογραμμετρία (Maas and Hampel, 2006) είναι η συμβατική μέθοδος για την αναδόμηση της επιφάνειας με τη χρήση μιας ή περισσότερων καμερών. Για παράδειγμα, η στερεοσκοπική όραση που προαναφέρθηκε είναι μια μορφή φωτογραμμετρίας. Η διαδικασία της φωτογραμμετρίας μπορεί να

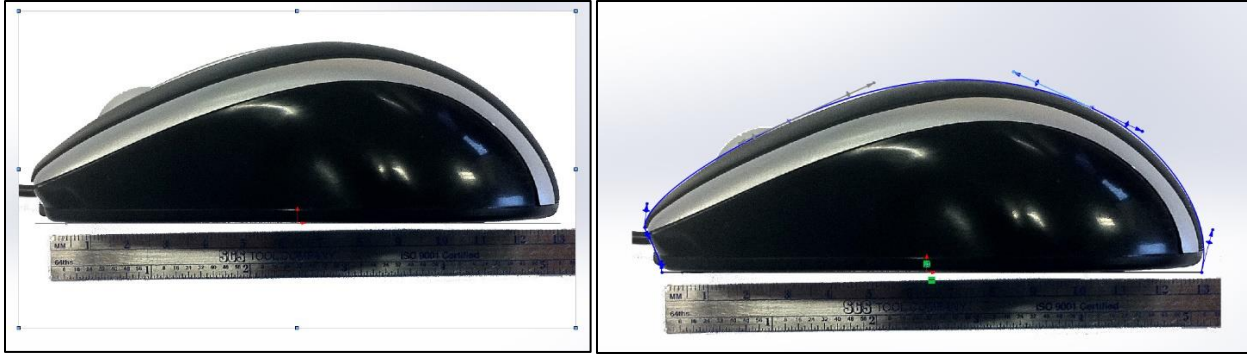
αποτελείται από πολλές φωτογραφίες, αλλά στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε έγινε ένα παράδειγμα της με την σάρωση ενός ποντικιού, με χρήση δύο φωτογραφιών (μία στην πλάγια όψη και μία στην κάτοψη). Ο σκοπός αυτού του παραδείγματος είναι να φανεί πως αξιοποιώντας αυτές τις φωτογραφίες και με χρήση διάφορων εργαλείων του CAD προγράμματος όπως το 3DSketch και των splines μπορεί να δημιουργηθεί το τρισδιάστατο αντικείμενο. Επίσης, η εξοικείωση με τα εργαλεία του CAD προγράμματος μέσω αυτής της διαδικασίας, είναι κάτι που θα βοηθήσει κατά την διάρκεια την επεξεργασία των σαρωμένων αντικειμένων από τον σαρωτή λευκού φωτός.



Εικόνα 6.1.1: Φωτογραφίες του μελετώμενου ποντικιού

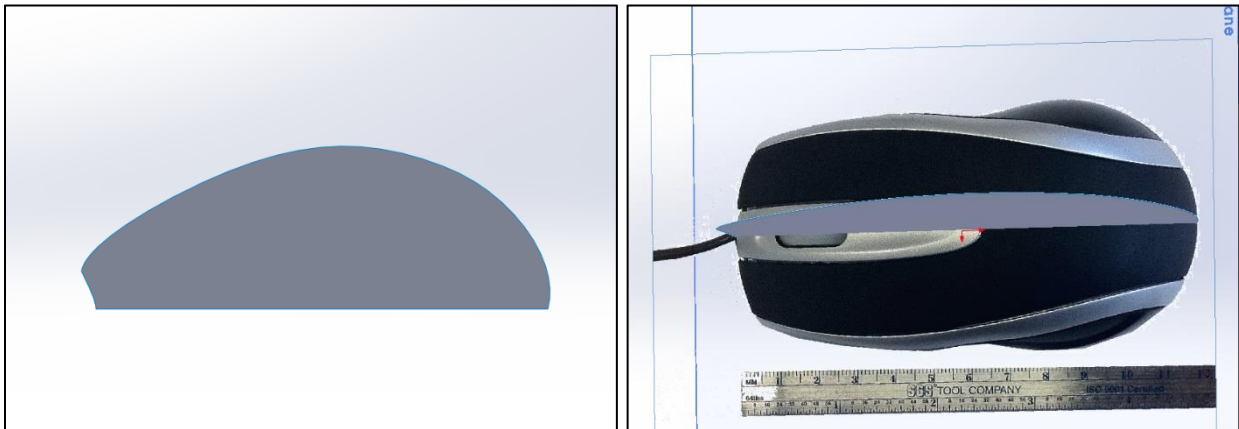
Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως μια γεωμετρία του αντικειμένου πρέπει να έχει μετρηθεί διότι θα χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για την εισαγωγή των φωτογραφιών στο Solidworks στο κατάλληλο μέγεθος. Στην προκειμένη περίπτωση η βάση του ποντικιού είναι 120mm και θα χρησιμοποιηθεί αυτή η πληροφορία για να προσαρμοστούν οι εικόνες στο κατάλληλο μέγεθος μέσα στο πρόγραμμα.

Αφού εισαχθεί η πρώτη εικόνα του ποντικιού στο κατάλληλο μέγεθος με βάση την ευθεία γραμμή μέσα στο sketch που σχεδιάστηκε, τότε με την χρήση των spline, γίνεται σχεδιασμός της οριακής γεωμετρίας του ποντικιού όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 6.1.2: Εισαγωγή και προσαρμογή της εικόνας στην ευθεία που σχεδιάστηκε (αριστερά) και σχεδίαση της γεωμετρίας με χρήση spline

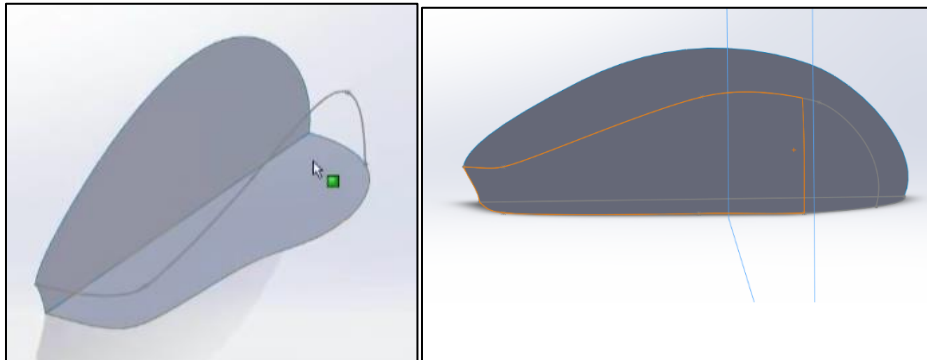
Αφού ολοκληρωθεί αυτό το sketch, χρησιμοποιείται η εντολή planar surface για να δημιουργηθεί μια οριακή επιφάνεια με βάση το παραπάνω σχέδιο. Η ίδια διαδικασία θα γίνει και σε άλλο plane για την άλλη όψη του ποντικιού αφότου το έχει τοποθετήσει στην κατάλληλη θέση.



Εικόνα 6.1.3: Planar surface ποντικιού (αριστερά), τοποθέτηση δεύτερης εικόνας στο άλλο plane (δεξιά)

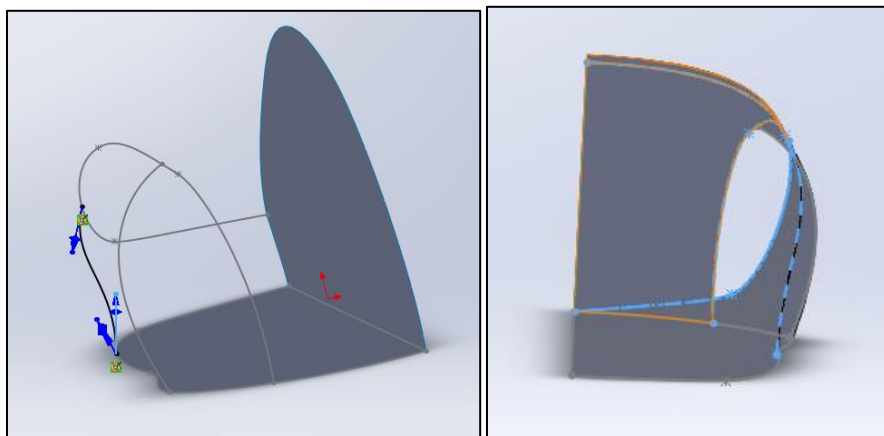
Αφότου δημιουργηθούν τα δύο planar surfaces, με την χρήση του 3D sketch εργαλείου θα σχεδιαστεί με spline, η καμπύλη της ασημένιας γεωμετρίας του ποντικιού. Έπειτα, θα δημιουργηθεί ένα κάθετο plane στην πλάγια όψη του ποντικιού όπου θα σχεδιαστεί με μία νέα spline που ακολουθεί την γεωμετρία του ποντικιού. Αυτή η spline γίνεται για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για το loft της γεωμετρίας του ποντικιού που θα ξεκινάει από την βάση του και θα τελειώνει στο 3D sketch της ασημένιας γεωμετρίας. Επειδή παρατηρείται ότι η γεωμετρία στο μπροστινό σημείο του ποντικιού δεν συμπίπτει

με αυτή της φωτογραφίας πρέπει να πραγματοποιηθεί ένα undercut σε άλλο σημείο του loft ώστε να διορθωθεί.



Εικόνα 6.1.4: Spline καμπύλης ασημένιας γεωμετρίας (αριστερά), Spline και loft ποντικίου (δεξιά)

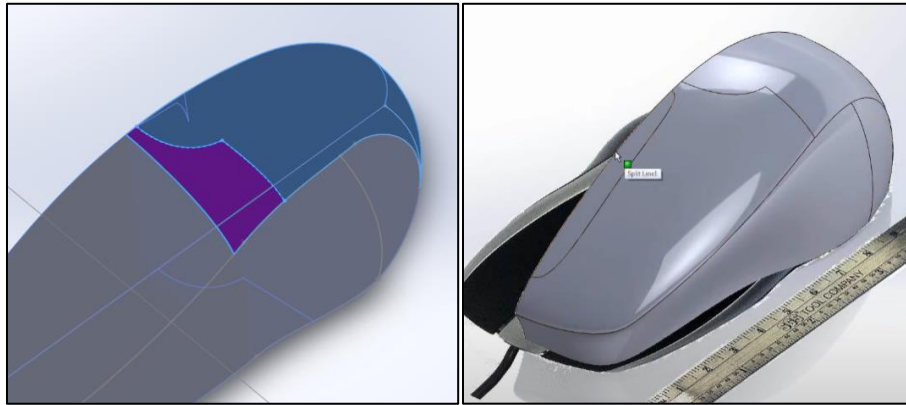
Με τον ίδιο τρόπο, γίνεται spline που ενώνει το πάνω μέρος του ποντικίου και με βάση αυτή δημιουργείται το boundary surface για να δημιουργηθεί η επάνω επιφάνεια.



Εικόνα 6.1.5: Εισαγωγή spline με την οποία έγινε το undercut του loft (αριστερά), δημιουργία spline στο πάνω μέρος του ποντικίου (δεξιά)

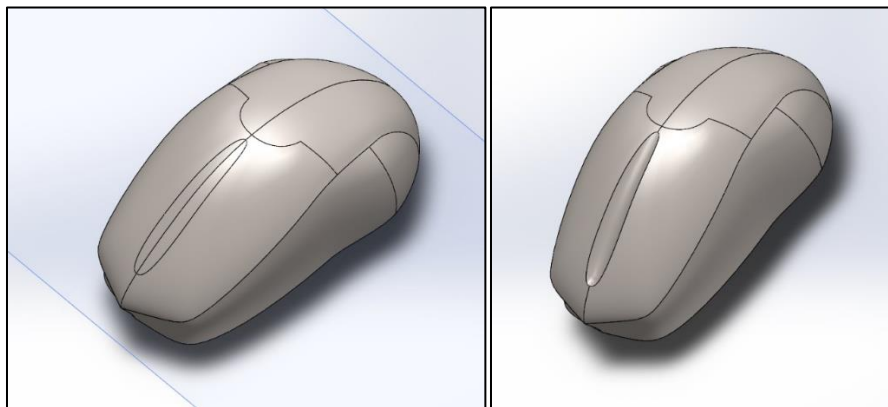
Για την αποφυγή του εκφυλισμού της επιφάνειας, δημιουργήθηκε ένα τρισδιάστατο sketch ώστε να σχεδιαστούν τμήματα με τέσσερις πλευρές στην πάνω επιφάνεια του ποντικίου. Μετά, έγινε αφαίρεση των περισσευόντων γεωμετριών για να δημιουργηθεί το πλέγμα σωστά. Με την ίδια διαδικασία δημιουργήθηκαν και οι υπόλοιπες επιφάνειες του ποντικίου. Έπειτα, έγινε συγκόλληση (knit) όλων των επιφανειών μεταξύ τους, για να δημιουργηθεί στην συνέχεια ένα CAD στερεό. Στην συνέχεια, εισήχθη η

καμπύλη της ροδέλας του ποντικιού κάνοντας project το δισδιάστατο σχέδιο που σχεδιάσαμε με βάση την κάτοψη της εικόνας του στο τρισδιάστατο ποντίκι.



Εικόνα 6.1.6: Δημιουργία τέταρτης πλευράς για την αποφυγή του εκφυλισμού (αριστερά), δημιουργία καμπύλης για την ροδέλα (δεξιά)

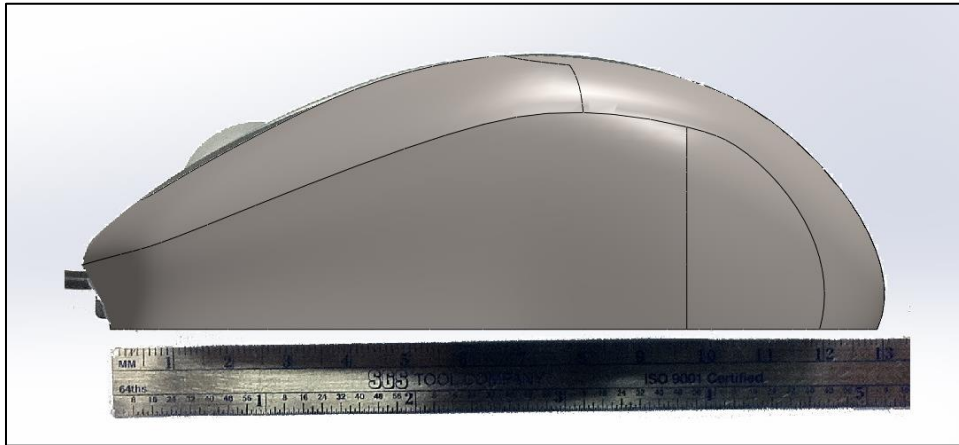
Τέλος, έγινε mirror το σώμα του ποντικιού και δημιουργήθηκε η καμπύλη της ροδέλας με τη χρήση του filled surface.



Εικόνα 6.1.7: Mirror ποντικιού (αριστερά), Surface fill της ροδέλας (δεξιά)

Τέλος, γίνεται σύγκριση του τρισδιάστατου CAD μοντέλου με τις αρχικές φωτογραφίες. Συγκρίνοντας τα, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η διαδικασία είναι επιτυχημένη μιας και το αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό. Δημιουργήθηκε λοιπόν ένα στερεό μοντέλο που μπορεί ο χρήστης να επεξεργαστεί περαιτέρω μέσω του CAD προγράμματος, επιτυγχάνοντας έτσι τον στόχο που είχε τεθεί στην αρχή της διαδικασίας. Έτσι

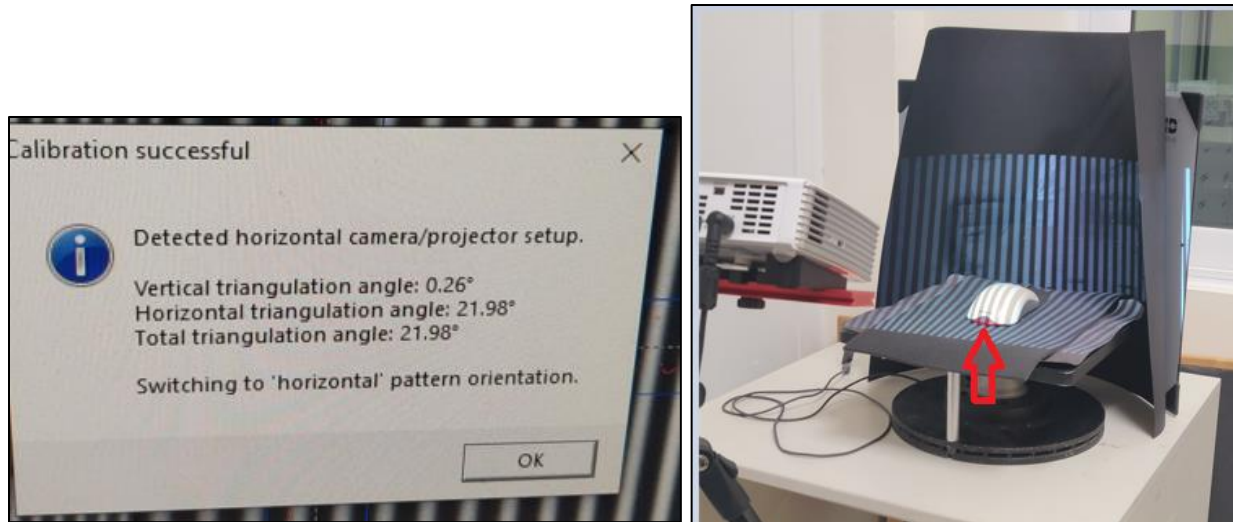
ολοκληρώνεται η διαδικασία τρισδιάστατης απεικόνισης φωτογραφιών με την χρήση της φωτογραμμετρίας.



Εικόνα 6.1.8: Πλάγια όψη σε σύγκριση με την φωτογραφία του ποντικιού

6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΑΡΩΜΕΝΟΥ ΠΟΝΤΙΚΙΟΥ

Το πρώτο σαρωμένο αντικείμενο που μελετήθηκε ήταν το ποντίκι. Η διαδικασία της σάρωσης έγινε τρεις φορές μέχρι να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα. Αυτό διότι, δεν επετεύχθη στις πρώτες σαρώσεις να αναγνωρίσει ο σαρωτής την πλαϊνή επιφάνεια του ποντικιού η οποία είναι από άλλο είδος πλαστικού και είναι σημαντικό για την σωστή ανάλυση του αντικειμένου. Αλλάζοντας τις ρυθμίσεις της κάμερας, του προτζέκτορα καθώς και μειώνοντας την φωτεινότητα του περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας ένα μαύρο χαρτόνι πίσω από το ποντίκι, τελικά σαρώθηκαν και οι πλαϊνές επιφάνειες σωστά. Παρόλα αυτά, δεν έγινε δυνατό να σαρωθεί η διάφανη επιφάνεια που βρίσκεται στο πίσω μέρος του ποντικιού σε καμία σάρωση.



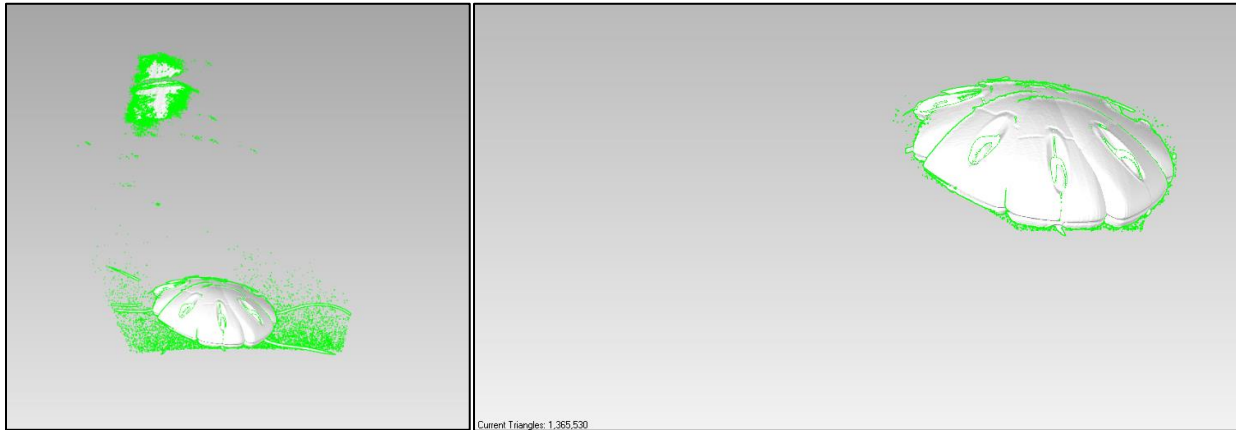
Εικόνα 6.2.1: Αποτέλεσμα βαθμονόμησης κάμερας/πρωτζέκτορα για το ποντίκι (αριστερά), διάταξη σάρωσης και με κόκκινο βέλος το σημείο που ήταν αδύνατο να σαρωθεί (δεξιά)

Κανονικά, με την χρήση του DAVID SLS2 προγράμματος μπορεί ο χρήστης να ενώσει κατευθείαν το σύνολο των σαρώσεων και να δημιουργήσει το πλέγμα που μετά θα επεξεργαστεί στο Solidworks 2020. Παρόλα αυτά, το πρόγραμμα αυτό δεν έχει την δυνατότητα να γίνουν όλες οι αλλαγές που χρειάζονται για την ακριβέστερη δημιουργία του πλέγματος. Για παράδειγμα, δεν μπορεί να προσαρμοστεί ο βαθμός αφαίρεσης των ακίδων (spike) που υπάρχουν στις σαρώσεις. Για το λόγο αυτό, οι σαρώσεις του DAVID SLS2 που βρίσκονται σε μορφή .obj περάστηκαν στο Geomagic Wrap 2014 που έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και ελευθερία από το DAVID.

Το Geomagic Wrap 2014 είναι μηχανολογικό πρόγραμμα σχεδιασμένο με σκοπό την επεξεργασία των σαρώσεων για την δημιουργία πλέγματος ή ακόμα και επιφάνειας ενός αντικειμένου. Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε αυτό το πρόγραμμα για την διόρθωση του πλέγματος αλλά δεν δημιουργήθηκε στερεή επιφάνεια (με την χρήση του exact surfacing) και αυτό διότι το Solidworks δεν μπορεί να δεχθεί στερεά με περισσότερα από 20.000 πολύγωνα. Αν χρησιμοποιείτο αυτό το εργαλείο και βασιζόταν η διαδικασία σε ένα μοντέλο με μόνο 20.000 πολύγωνα, θα είχε ως αποτέλεσμα να χανόταν η ακρίβεια της σάρωσης του αντικειμένου, ειδικά σε γεωμετρικά σχήματα που περιέχουν καμπύλες κάτι που δεν είναι αποδεκτό.

Το πρώτο βήμα στο Geomagic Wrap αφότου εισαχθούν όλες τις σαρώσεις (εννιά στο σύνολο για το ποντίκι) του αντικειμένου, είναι να αφαιρεθεί ο «θόρυβος», δηλαδή το πλήθος των στοιχείων των σαρώσεων που δεν αποτελούν μέρος του αντικειμένου που μελετάμε. Τέτοια στοιχεία μπορεί να είναι για παράδειγμα επιφάνειες που αποτελούν το φόντο των σαρώσεων. Ο συνολικός αριθμός των τριγώνων

μετά την αφαίρεση του «θορύβου» είναι 1.365.530. Στο τέλος της διαδικασίας ο αριθμός αυτός θα μειωθεί κατά πολύ, χωρίς όμως να μειωθεί η ακρίβεια της σάρωσης.



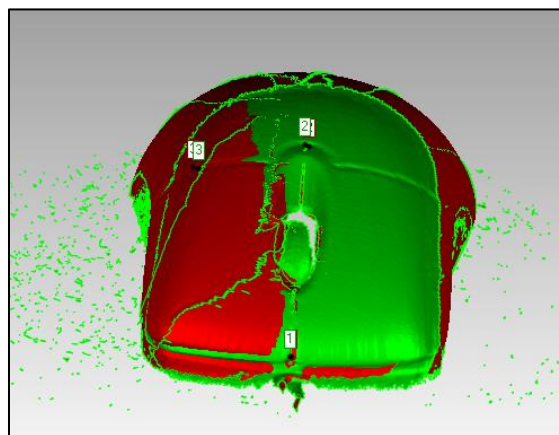
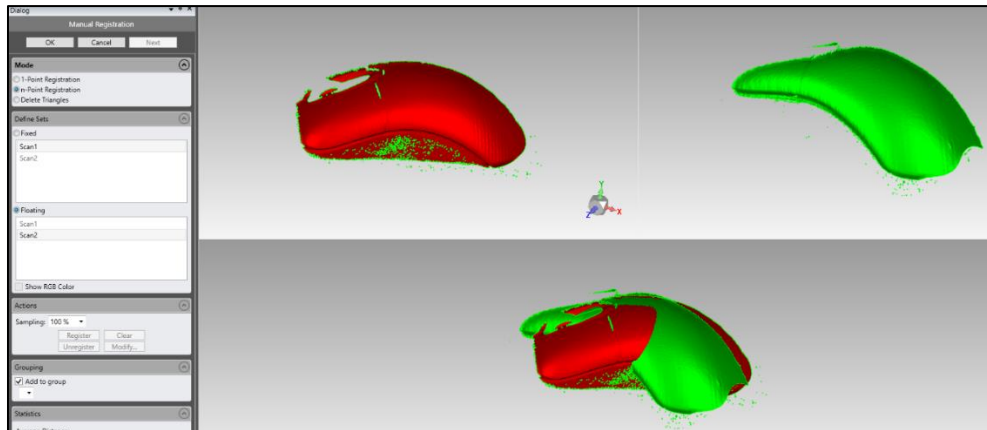
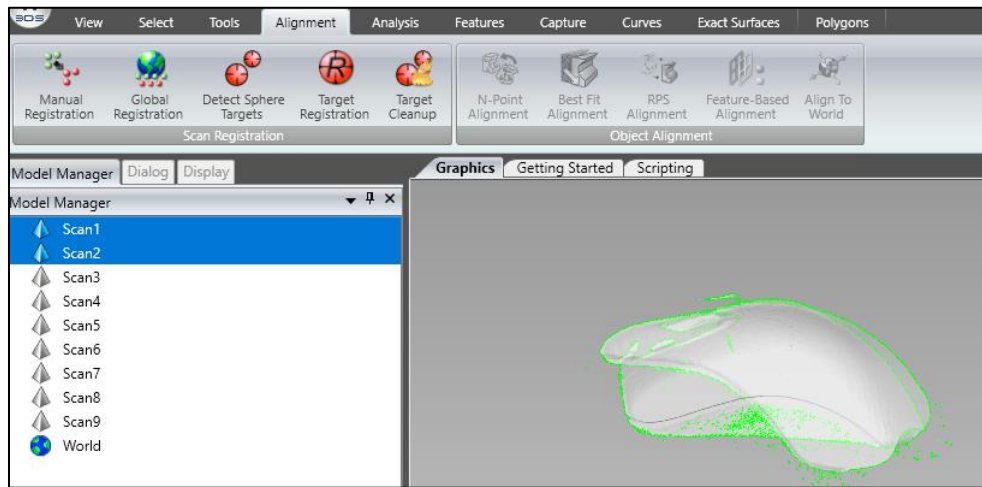
Εικόνα 6.2.2: Η αρχική κατάσταση των σαρώσεων (αριστερά), οι σαρώσεις μετά την αφαίρεση του «θορύβου» (δεξιά)

Στην συνέχεια έγιναν όλες οι σαρώσεις εκτός από τις πρώτες δύο μη ορατές. Αφού αφαιρέθηκαν τα υπολειπόμενα λάθη που μπορεί να υπήρχαν στις σαρώσεις, έγινε ευθυγράμμιση της δεύτερης σάρωσης ως προς την πρώτη. Αυτό έγινε με την χρήση του Alignment → Manual Registration → n-Point Registration. Εκεί, επιλέχθηκε η πρώτη σάρωση ως σταθερή και η δεύτερη ως η κινητή σάρωση «κούμπωσε» πάνω στην πρώτη. Αυτό έγινε με την επιλογή τουλάχιστον τριών κοινών σημείων (τρία είναι ο ελάχιστος αριθμός που χρειάζεται το πρόγραμμα για κάνει την ευθυγράμμιση) μεταξύ των σαρώσεων που λειτούργησαν ως οδηγός ευθυγράμμισης του προγράμματος.

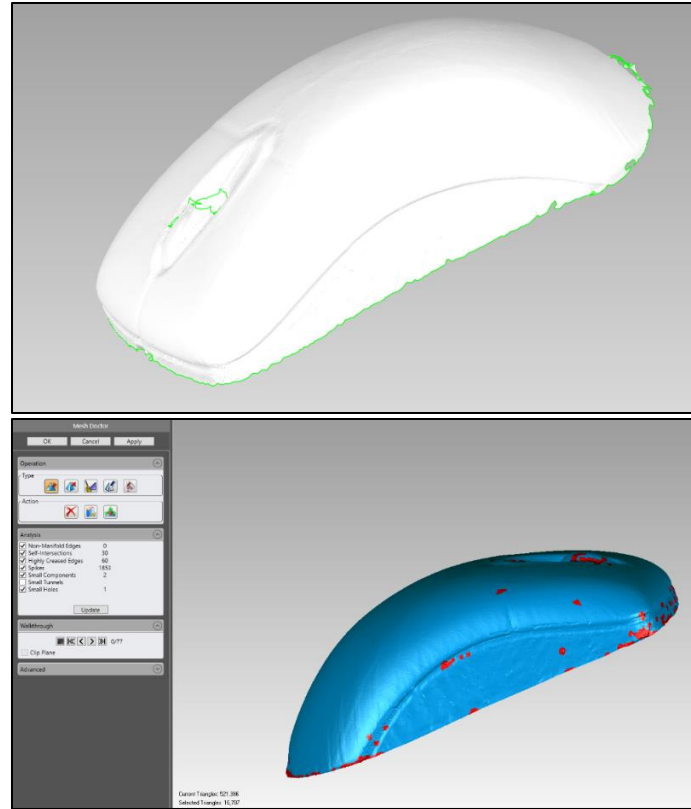
Μετά από κάθε ευθυγράμμιση μεταξύ των σαρώσεων, τοποθετήθηκαν στην ίδια ομάδα που δημιουργήθηκε και έγινε η ίδια διαδικασία μεταξύ της ομάδας και της επόμενης σάρωσης. Αυτή η διαδικασία έγινε μέχρι να ευθυγραμμιστούν όλες οι σαρώσεις μεταξύ τους. Στο τέλος, αφαιρέθηκαν οι σαρώσεις από την ομάδα και έγινε Global Registration το οποίο κάνει αυτόματα ακόμα πιο ακριβή την συνοχή των σαρώσεων. Το Global registration έγινε στο τέλος, διότι αν οι σαρώσεις δεν είναι κοντά στην σωστή θέση που πρέπει να βρίσκονται, το πρόγραμμα πολλές φορές δεν καταφέρνει να τις συνδέσει σωστά.

Με το πέρας της ευθυγράμμισης, γίνεται συγχώνευση (merge) των σαρώσεων για να δημιουργηθεί ένα μοναδικό πλέγμα. Το πλέγμα αυτό χρειάζεται επεξεργασία. Ένα καλό βήμα για την αφαίρεση των σφαλμάτων όπως την μείωση των πολλαπλών άκρων, εσφαλμένων διασταυρώσεων, αιχμών (spike) και ασυνέχειών του πλέγματος είναι με την χρήση του Mesh Doctor το οποίο είναι αυτοματοποιημένο

σύστημα του Geomagis και λύνει ένα μεγάλο μέρος των προβλημάτων. Όσα δεν καταφέρει να διορθώσει αυτό το σύστημα πρέπει να γίνουν χειροκίνητα από τον χρήστη.

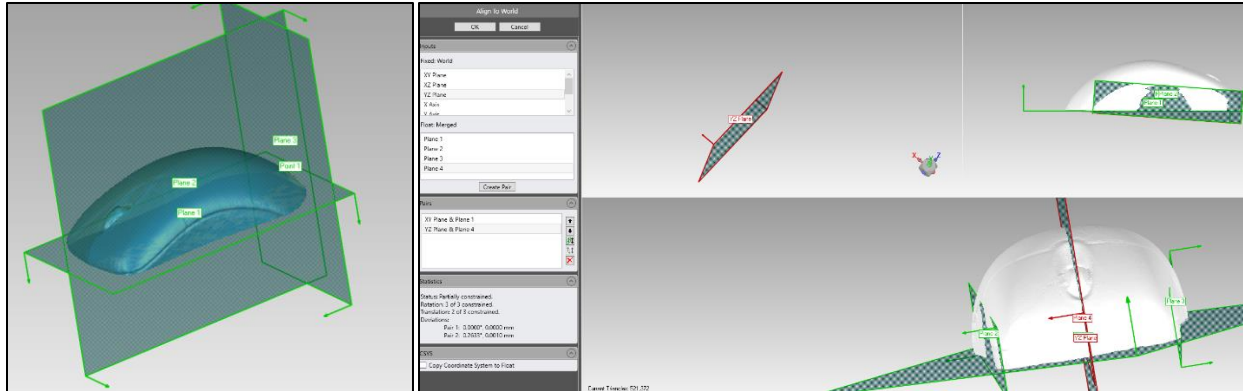


Εικόνες 6.2.3-6.2.5: Παράδειγμα διαδικασίας ευθυγράμμισης



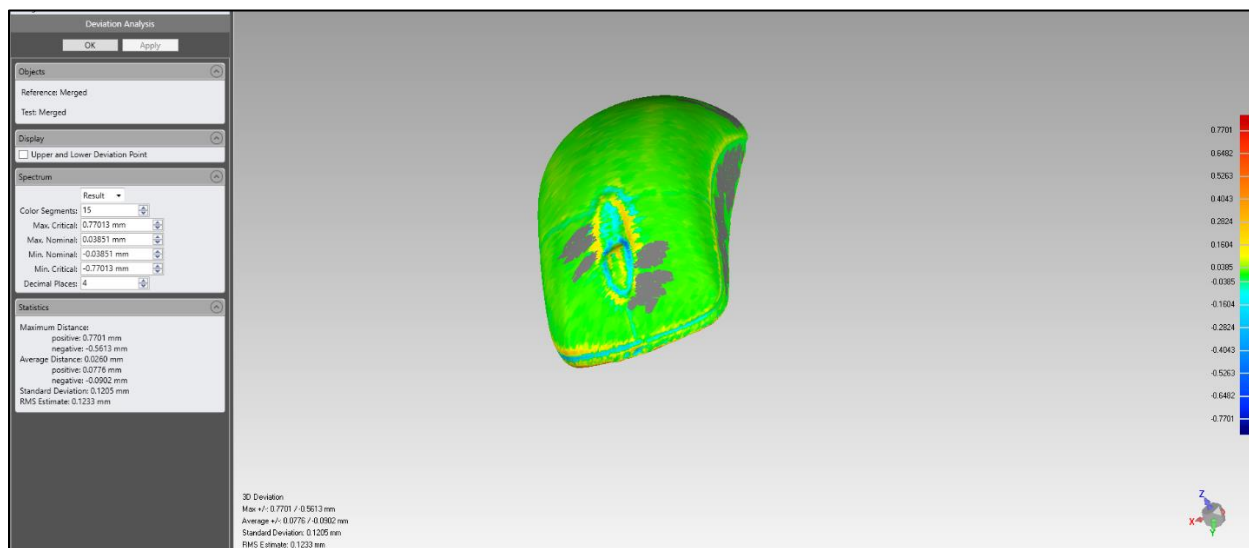
Εικόνα 6.2.6-6.2.7: Αποτέλεσμα merge (πάνω), Παράδειγμα χρήσης του Mesh Doctor (κάτω)

Αφού γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις χρησιμοποιώντας εργαλεία όπως αυτό του γεμίσματος οπών (fill hole) και αφαίρεσης χαρακτηριστικών (defeature), στη συνέχεια προσδιορίστηκε η αρχή των καρτεσιανών συντεταγμένων που θα βοηθήσει κατά την διάρκεια της επεξεργασίας στο Solidworks μιας και αυτό το στοιχείο μένει σαν πληροφορία όταν εισαχθεί το πλέγμα στο CAD πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε. Αφού δημιουργήθηκαν τα planes που θα χρειάζονται για τον προσδιορισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων, χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Align to World από το Alignment→Align To World. Από εκεί με βάση τα planes που δημιουργήθηκαν, καθορίστηκαν οι καρτεσιανές συντεταγμένες με τον κατάλληλο τρόπο.



Εικόνα 6.2.8: Τα planes που χρησιμοποιήσαμε (αριστερά), διαδικασία Align to World (δεξιά)

Τέλος, μειώθηκε ο συνολικός αριθμός των τριγώνων χωρίς όμως να υπάρχει απώλεια από τις λεπτομέρειες του ποντικιού, με αφαίρεση από σημεία που δεν χρειάζονται μεγάλο αριθμό τριγώνων όπως είναι οι ευθείες επιφάνειες. Αυτό έγινε με την εντολή αποδεκατισμού (Decimate). Στην προκειμένη περίπτωση, μειώθηκε ο αριθμός των τριγώνων από τα αρχικά 1.365.530 στα 450.000 τρίγωνα. Ένας τρόπος για να κριθεί αν η τελική γεωμετρία είναι ικανοποιητική, είναι με την χρήση της ανάλυσης απόκλισης (deviation analysis). Συγκρίνοντας το αρχικό συγχωνευμένο αντικείμενο με το τελικό, παρατηρήθηκε ότι οι διαφορές (μέγιστη απόκλιση 0.7701mm και μέση απόκλιση 0.0776mm) είναι πολύ μικρές και άρα θα συνεχιστεί η διαδικασία της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης κανονικά.



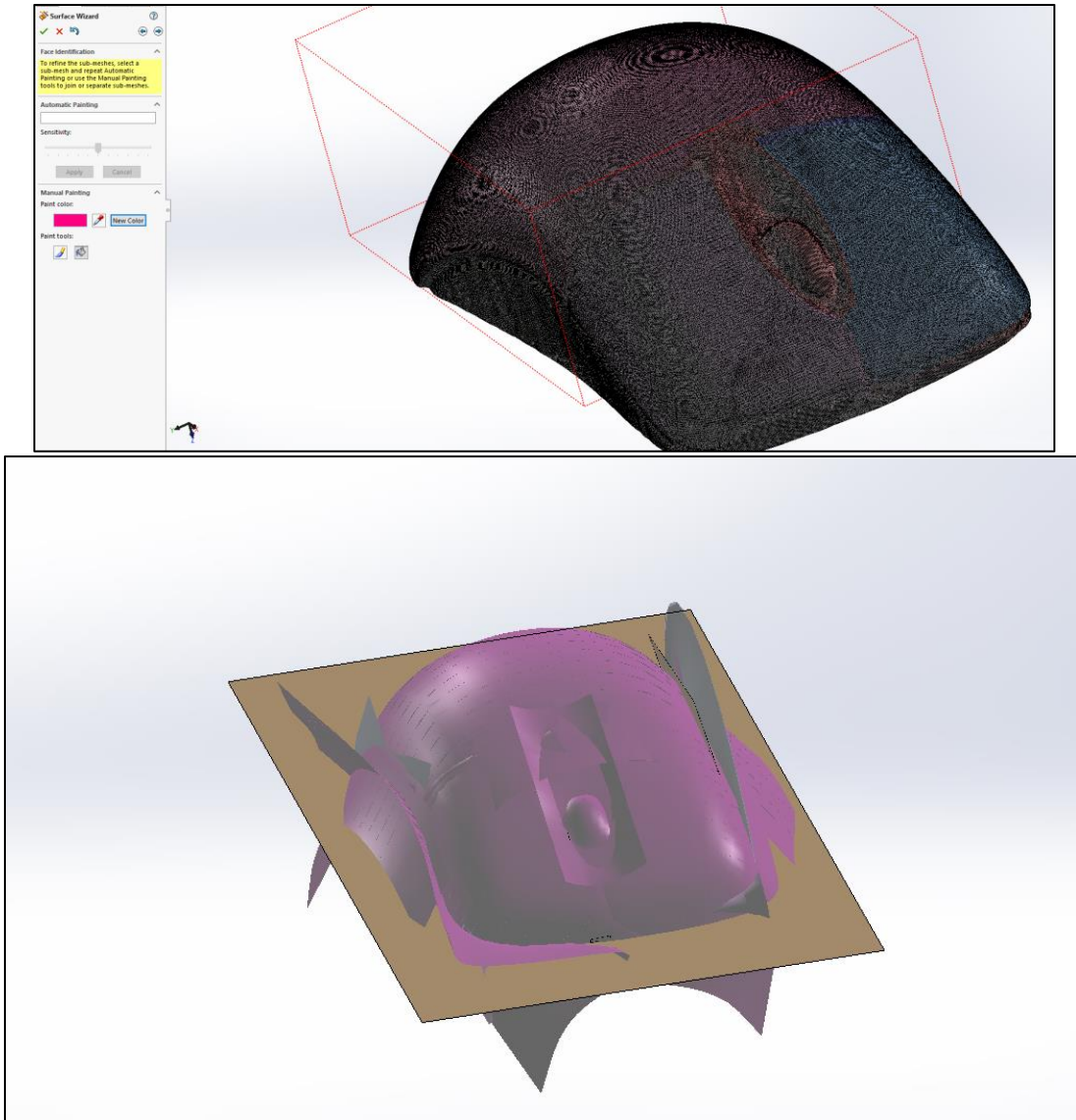
Εικόνα 6.2.9: Αποτέλεσμα ανάλυσης απόκλισης ποντικιού

Στην συνέχεια, αποθηκεύτηκε το αρχείο σε μορφή .obj για να χρησιμοποιηθεί το Mesh to 3D του Solidworks. Με το άνοιγμα του πλέγματος στο Solidworks μπορούν να γίνουν διάφορες

παραμετροποιήσεις στο αντικείμενο, όπως να καθοριστούν συντεταγμένες στο καρτεσιανό σύστημα και να μειωθεί ο συνολικός αριθμός των τριγώνων. Παρόλα αυτά, αυτήν η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί στο προηγούμενο πρόγραμμα, άρα δεν αλλάχθηκαν καθόλου αυτές οι ρυθμίσεις.

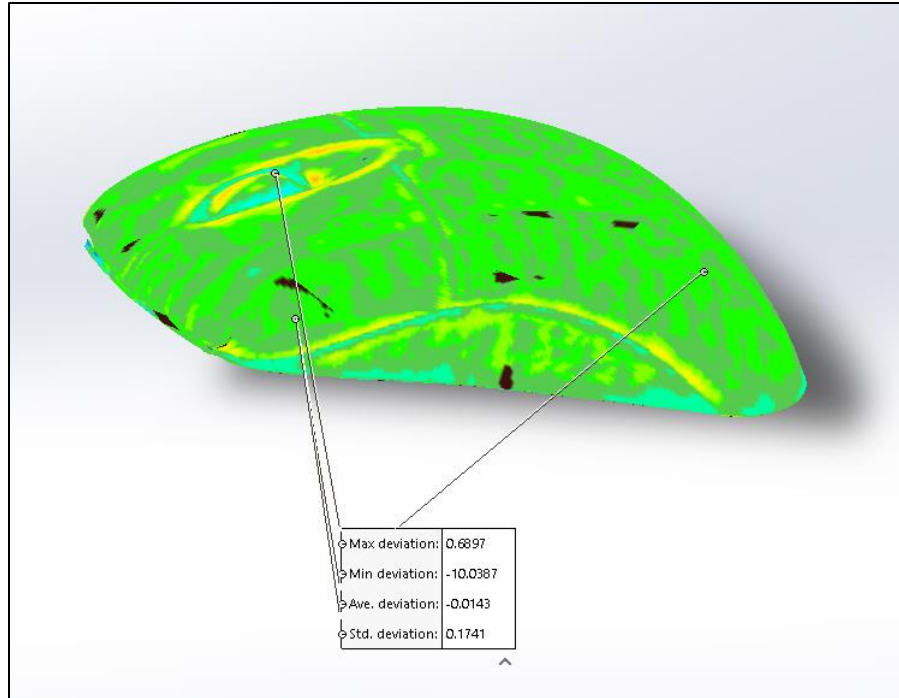
Μετά από αυτό το σημείο, μπορεί να προχωρήσει η διαδικασία στην δημιουργία του στερεού CAD μοντέλου με **δύο βασικούς τρόπους**.

Ο πρώτος τρόπος είναι με την χρήση του Surface Wizard, ενός εργαλείου του Solidworks ειδικού για την μετατροπή σαρωμένων πλεγμάτων σε στερεά CAD μοντέλα. Με την χρήση του εργαλείου δίνονται δύο επιλογές για την δημιουργία της γεωμετρίας του αντικειμένου. Η αυτόματη μέθοδος (automatic creation) και η οδηγούμενη μέθοδος (guided creation). Στην αυτόματη μέθοδο το πρόγραμμα μπαλώνει το αντικείμενο όσο καλύτερα μπορεί για να δημιουργήσει μια μονοκόμματη επιφάνεια του αντικειμένου. Αντιθέτως, στην οδηγούμενη μέθοδο όλη αυτή η διαδικασία γίνεται από τον χρήστη. Ειδικά για πολύπλοκα αντικείμενα, προτείνεται η χρήση της οδηγούμενης δημιουργίας μιας και η αυτόματη μέθοδος πολλές φορές αποτυγχάνει να δημιουργήσει τα στερεά σύνθετων πλεγμάτων σωστά. Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε η οδηγούμενη μέθοδος διότι έχει πιο ακριβή και σωστά αποτελέσματα. Στην οδηγούμενη μέθοδο ο χρήστης έχει την επιλογή της χρήσης της αυτόματης και χειροποίητης ζωγραφικής. Η ζωγραφική είναι ουσιαστικά ένα εργαλείο με το οποίο το πρόγραμμα ή ο χρήστης χρωματίζει τις επιφάνειες του μελετώμενου πλέγματος με διαφορετικό χρώμα. Τα σημεία που χρωματίζονται πρέπει να χωρίζουν το αντικείμενο σε απλές γεωμετρίες, διότι στην συνέχεια το πρόγραμμα μετατρέπει το κάθε κομμάτι που έχει διαφορετικό χρώμα σε μία επιφάνεια η οποία έχει δημιουργηθεί με βάση απλές γεωμετρίες. Η αυτόματη ζωγραφική συνήθως δεν έχει τα βέλτιστα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η χειροποίητη ζωγραφική (manual painting). Για παράδειγμα, το κάτω μέρος του ποντικιού θα το βάψουμε με ένα χρώμα, την πλαϊνή γεωμετρία με άλλο χρώμα και ούτω καθεξής. Με αυτά τα χρώματα, το πρόγραμμα προσαρμόζει γεωμετρίες που ταιριάζουν περισσότερο με την κάθε βαμμένη επιφάνεια. Έτσι, μετατρέπει ένα αντικείμενο σε ένα σύνολο απλούστερων γεωμετριών όπως spline, κωνικές, σφαιρικές, επίπεδες κλπ. Αν για κάποιο λόγο μια γεωμετρία που έχει προσαρμόσει το πρόγραμμα αυτόματα δεν ταιριάζει μπορούμε να την αλλάξουμε εμείς χειροκίνητα.



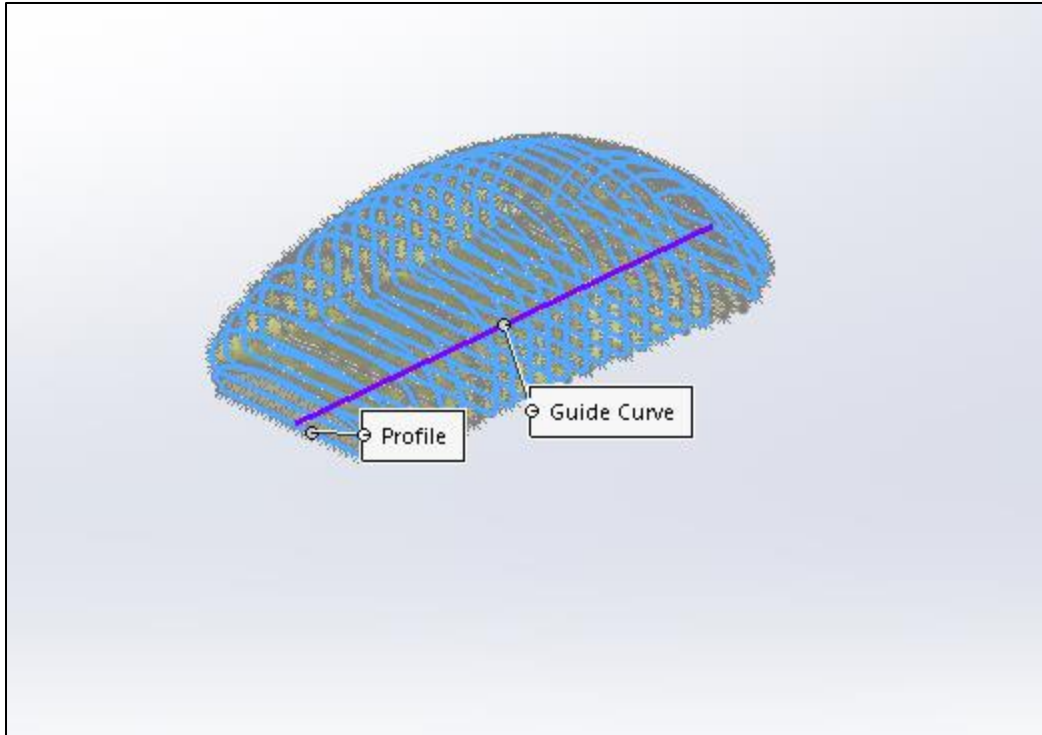
Εικόνες 6.2.10-6.2.11: Παράδειγμα χρωματισμού (πάνω), αποτέλεσμα Surface Wizard πριν την επεξεργασία των επιφανειών (κάτω)

Στην συνέχεια, με την χρήση των λειτουργιών trim και knit μετατράπηκε το σύνολο των επιφανειών που παράχθηκαν από το εργαλείο ζωγραφικής σε αντιπροσωπευτικές επιφάνειές του μελετώμενου αντικειμένου και ενώθηκαν αυτές οι επιφάνειες μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι τη μορφή του σαρωμένου αντικειμένου. Μετά από αυτό το σημείο μετατράπηκε η επιφάνεια σε στερεό CAD μοντέλο. Στο τέλος της διαδικασίας έγινε ανάλυση απόκλισης για να δούμε τον βαθμό διαφοράς του τελικού αντικείμενου από το πλέγμα που εισήχθη στο Solidworks. Από την εικόνα παρακάτω φαίνεται ότι η μέγιστη απόκλιση είναι 0.6897mm και η μέση απόκλιση είναι 0.0143mm που είναι ικανοποιητικά μικρή κάτι που μας δείχνει ότι η διαδικασία ήταν επιτυχής.



Εικόνα 6.2.12: Ανάλυση απόκλισης (Deviation Analysis)

Ένας δεύτερος τρόπος να αποκτηθεί η γεωμετρία του μελετώμενου αντικειμένου είναι με την χρήση του εργαλείου **Curve Wizard**. Από αυτό το εργαλείο, γίνεται η επιλογή της εντολής τομών (section). Με την χρήση του, ουσιαστικά ο χρήστης κάνει ένα πλήθος τομών από spline στο μελετώμενο πλέγμα κατά μήκος του αντικειμένου. Αυτές τις τομές μετά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να ενωθούν μεταξύ τους, δημιουργώντας έτσι την επιφάνεια του ποντικιού. Όσες περισσότερες τομές γίνουν, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια θα έχει το αντικείμενο μας με βάση τη γεωμετρία του πλέγματος. Επίσης, για την ομαλή δημιουργία της γεωμετρίας πρέπει να τοποθετηθεί κάθετα μια γραμμή που θα λειτουργήσει ως οδηγός.



Εικόνα 6.2.13: Δημιουργία αντικειμένου με χρήση τομών

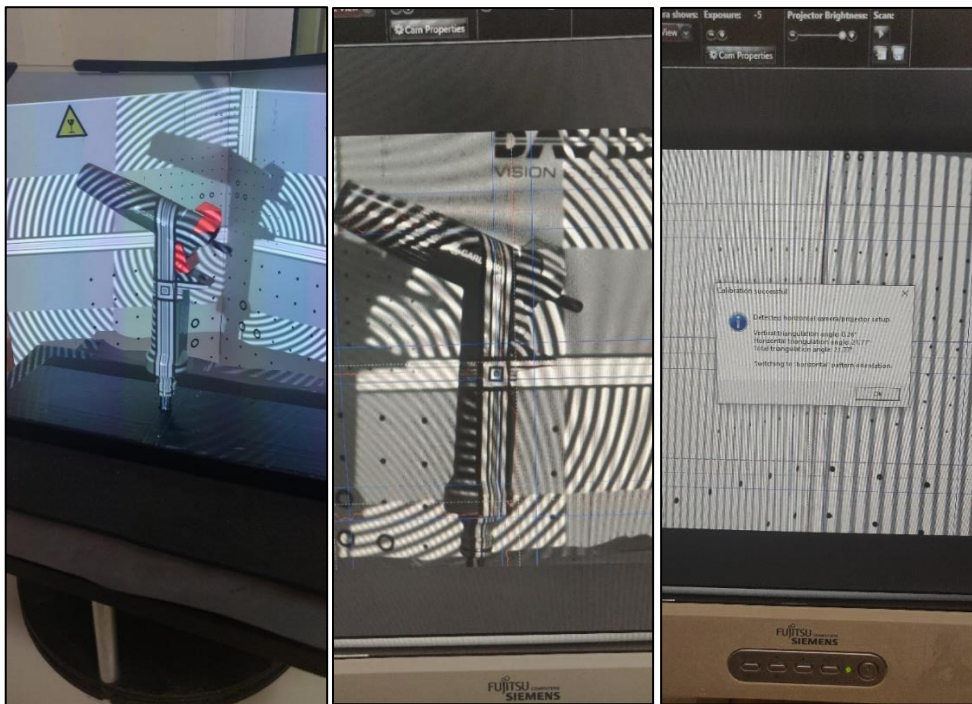
Ο δεύτερος τρόπος δεν προτείνεται γενικά, διότι οι spline που δημιουργούνται με βάση τις τομές πάνω στο πλέγμα έχουν και τα τυχόν σφάλματα της γεωμετρίας κατά την σάρωση, όπως είναι μικρές καμπυλότητες και ακίδες που δεν έχουν διορθωθεί καθιστώντας το αποτέλεσμα ανακριβές. Κάνοντας τον έλεγχο ανάλυσης απόκλισης, η μέγιστη απόκλιση είναι 0.7673mm και η μέση απόκλιση 0.0133mm. Σε σύγκριση με την πρώτη μέθοδο έχει λοιπόν η δεύτερη μέθοδο μεγαλύτερη μέγιστη απόκλιση αλλά μικρότερη μέση απόκλιση. Αυτό συμβαίνει, διότι η πρώτη τομή που έγινε στο μπροστινό μέρος του πλέγματος δεν έπιασε την γεωμετρία από την αρχή της και έτσι δεν είχε το κατάλληλο σχήμα στο πρώτο σημείο με αποτέλεσμα να έχει μεγαλύτερη μέγιστη απόκλιση, ενώ λόγω ότι ακολουθούν τα spline την γεωμετρία της αρχικής σάρωσης η μέση απόκλιση είναι μικρότερη από τον πρώτο τρόπο.

6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΑΡΩΜΕΝΟΥ ΕΚΤΩΞΕΥΤΗΡΑ ΝΕΡΟΥ

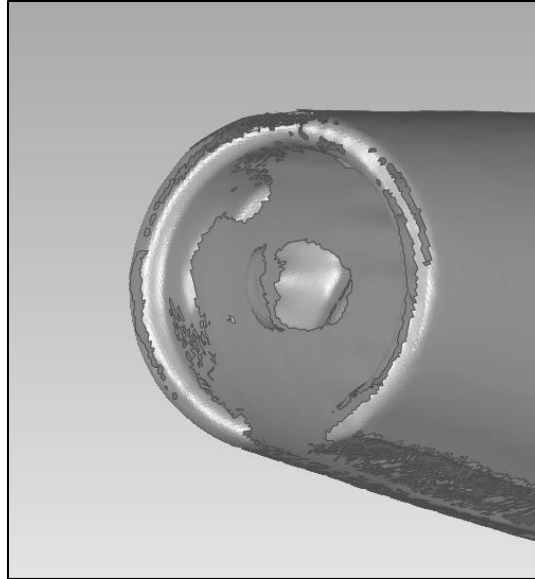
Παρατηρώντας τις σαρώσεις, είναι προφανές ότι αρκετές γεωμετρίες του πλέγματος του αντικειμένου δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Πιο αναλυτικά στο στόμιο του εκτοξευτήρα καθώς και στο κάτω μέρος από το οποίο εισέρχεται το νερό, ο σαρωτής δεν έχει σαρώσει σωστά την κοιλότητα. Η αδυναμία αποτύπωσης οπών και κοιλοτήτων είναι ένα πρόβλημα που συναντάμε συχνά στους σαρωτές λευκού

φωτός, ειδικά αν αυτές είναι στενές και έχουν μεγάλο μήκος. Ένα άλλο μέρος, που παρά το πλήθος των σαρώσεων δεν επιτεύχθηκε να αποτυπωθεί σωστά είναι το πίσω μέρος του ποτιστικού με το σπείρωμα και το σημείο που αποτελείται από διαφορετικό είδος πλαστικού. Όπως και πριν, ένας λόγος της αδυναμίας αποτύπωσης είναι ότι βρίσκεται σε σκοτεινή επιφάνεια (λόγω της γωνίας πρόπτωσης του φωτισμού του προτζέκτορα). Επίσης, το σπείρωμα είναι πολύ μικρό για να σαρωθεί με αποτέλεσμα να μην αποτυπώνεται σωστά η επιφάνεια της γεωμετρίας του. Επιπρόσθετα, ο σαρωτής δεν μπορεί να αναγνωρίσει ότι το πλαστικό που βρίσκεται στο πίσω μέρος του εκτοξευτήρα νερού είναι διαφορετικό, έχοντας ως αποτέλεσμα να ενώνει τις γεωμετρίες στο πλέγμα μεταξύ τους. Άμα το πρόβλημα ήταν της συγκεκριμένης σάρωσης, τότε θα γινόταν η διαδικασία ξανά. Παρόλα αυτά, η διαδικασία έχει γίνει πέντε φορές αλλάζοντας παραμέτρους στην βαθμονόμηση του προτζέκτορα και της κάμερας και το αποτέλεσμα είναι το ίδιο ή χειρότερο. Για το λόγο αυτό, συνεχίστηκε η διαδικασία κανονικά, απλά για αυτές τις γεωμετρίες χρειάστηκε να μετρηθούν οι διαστάσεις από το φυσικό αντικείμενο και να σχεδιαστούν με βάση αυτό.

Για την διαδικασία των σαρώσεων φτιάχτηκε μια ξύλινη βάση όπου χρησιμοποιήθηκε για να κρατηθεί ο εκτοξευτήρας νερού σταθερός σε όλες τις σαρώσεις, με σκοπό να είναι πιο εύκολη η διαδικασία της ευθυγράμμισης των σαρώσεων μεταξύ τους καθώς και ο καθορισμός της αρχής συντεταγμένων.

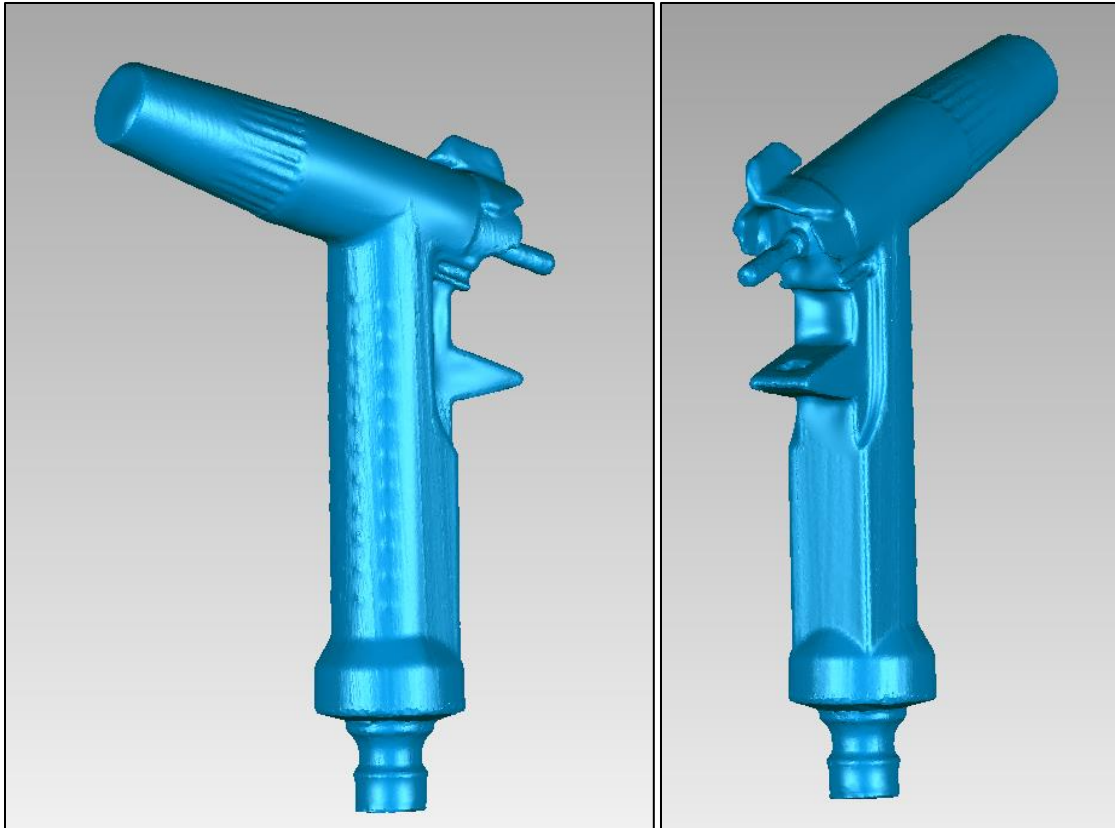


Εικόνες 6.3.1-6.3.3: Παράδειγμα πειραματικής διαδικασίας και αποτέλεσμα βαθμονόμησης προτζέκτορα/κάμερας



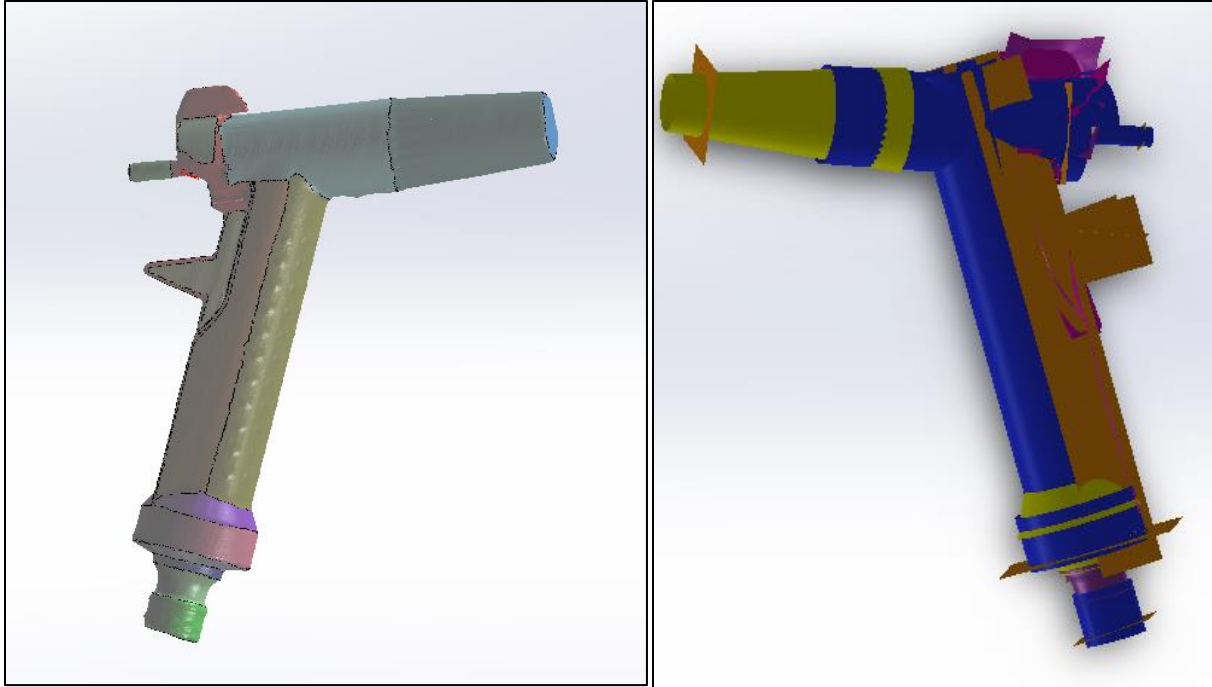
Εικόνα 6.3.4: Σημείο αδυναμίας δημιουργίας πλέγματος από τον σαρωτή

Αφότου ολοκληρώθηκαν οι σαρώσεις, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως και με το ποντίκι στο Geomagic Wrap για να διορθωθούν τα σφάλματα στα πλέγματα, να ευθυγραμμιστούν οι σαρώσεις και να οριστεί η αρχή των αξόνων. Στη συνέχεια, ενώθηκαν οι σαρώσεις και δημιουργήθηκε το μοναδικό πλέγμα από την ένωση των σαρώσεων. Έπειτα μειώθηκε ο συνολικός αριθμός των τριγώνων από τα 2.153.252 στα 400.000 τρίγωνα και έγινε ανάλυση απόκλισης (deviation analysis). Από την ανάλυση απόκλισης βρέθηκε μέγιστη απόκλιση 0.689mm και μέση απόκλιση 0.0632mm μεταξύ του αρχικού συγχωνευμένου αντικειμένου και του τελικού. Τέλος, μπαλώθηκαν οι οπές που υπήρχαν στο κάτω μέρος του εκτοξευτήρα και στο μπροστινό του μέρος, που οι σαρώσεις δεν ήταν αποτυπωμένες σωστά όπως προαναφέρθηκε. Οι γεωμετρικές αυτές δεν ήταν αντιπροσωπευτικές του αντικειμένου και περισσότερο θα δυσκόλευαν στην συνέχεια της διαδικασίας δημιουργίας του τελικού CAD στερεού παρά θα βοηθούσαν. Αυτά τα χαρακτηριστικά συμπληρώθηκαν στο τέλος, με βάση τις μετρήσεις που λήφθηκαν από το αντικείμενο.

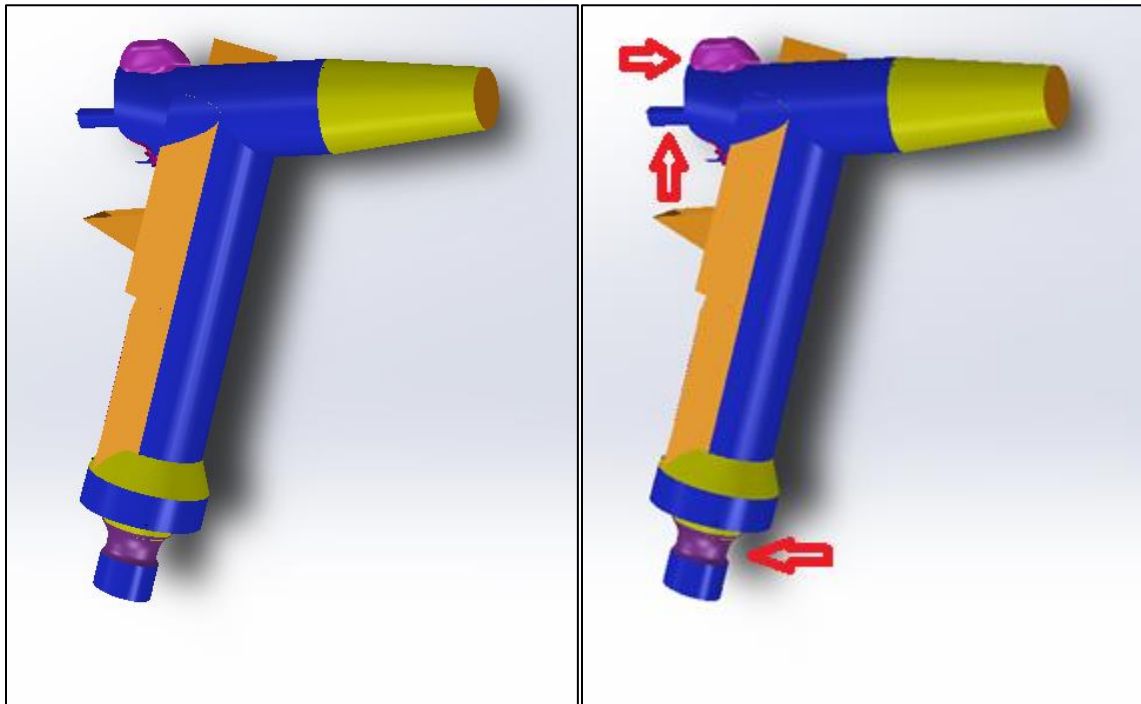


Εικόνα 6.3.5: Τελικό πλέγμα μετά από επεξεργασία

Αφού τελείωσε η διαδικασία ανάλυσης του πλέγματος, αποθηκεύτηκε το αρχείο σε μορφή .obj και συνεχίστηκε η διαδικασία αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης στο Solidworks. Εκεί, με την χρήση της οδηγούμενης μεθόδου (guided creation) μέσω του Surface Wizard, ζωγραφίστηκε το πλέγμα διαχωρίζοντας το σε ένα σύνολο από απλούστερες γεωμετρίες. Μετά τον χρωματισμό, διορθώθηκαν τα είδη των σχημάτων των γεωμετριών που «πρότεινε» το πρόγραμμα σε πιο ταιριαστά, με βάση την γεωμετρία του αντικειμένου. Όπως παρατηρήθηκε και νωρίτερα κάποιες γεωμετρίες στο πίσω του εκτοξευτήρα νερού δεν ήταν αντιπροσωπευτικές της πραγματικής γεωμετρίας. Αυτές λοιπόν δεν τις απορρίφθηκαν και απλά με την χρήση του πλέγματος ως οδηγό καθώς και των μετρήσεων που πάρθηκαν από το φυσικό αντικείμενο, δημιουργήθηκαν plane στα κατάλληλα σημεία και σχεδιάστηκαν οι γεωμετρίες που υπολείπονταν με βάση αυτά τα στοιχεία.



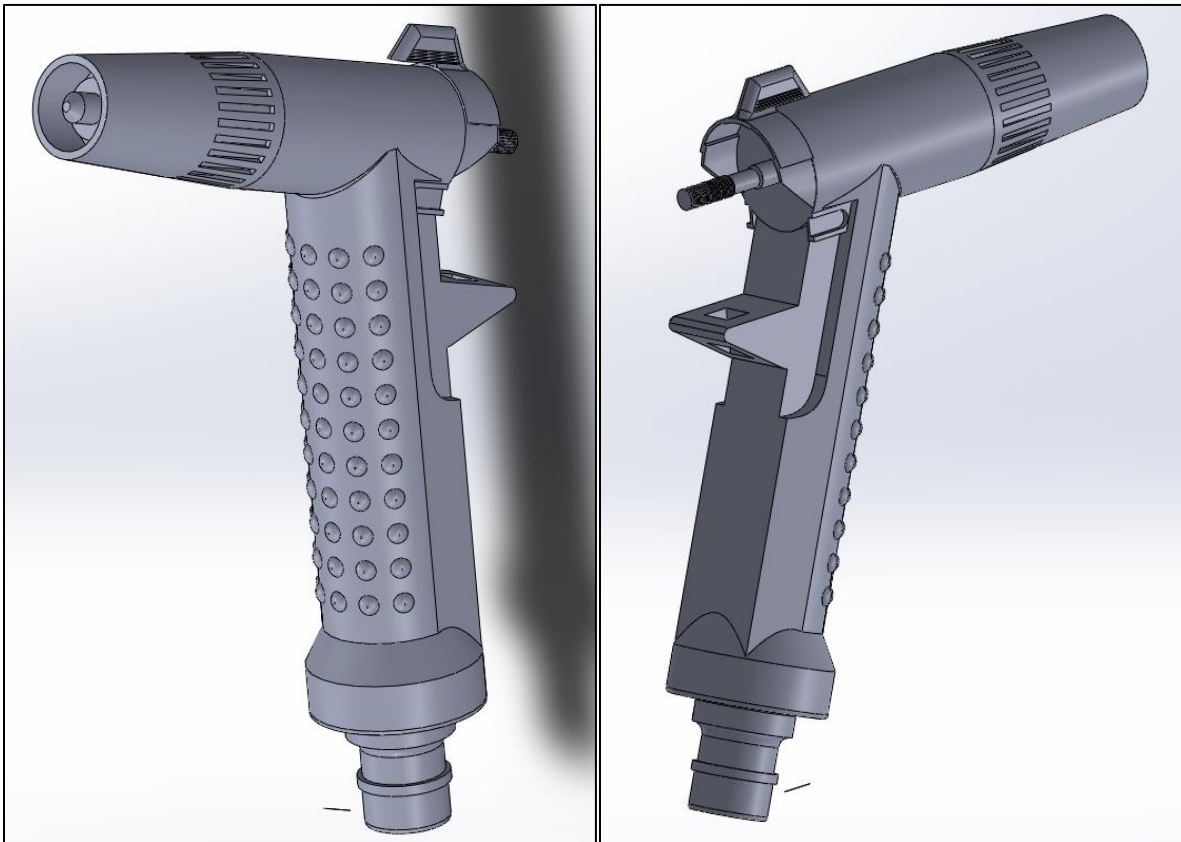
Εικόνες 6.3.6-6.3.7: Ο τελικός χρωματισμός των γεωμετριών που χρησιμοποιήθηκε (αριστερά), οι γεωμετρίες που μας επέστρεψε το πρόγραμμα (δεξιά)



Εικόνες 6.3.8-6.3.9: Αποτέλεσμα από trim των γεωμετριών (αριστερά), τα σημεία που επανασχεδιάσαμε (δεξιά)

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα οι γεωμετρίες που δεν χρησιμοποιήθηκαν από το surface wizard ήταν, το πάνω μέρος του πλαστικού ελέγχου παροχής νερού που βρίσκεται στο πίσω μέρος του αντικειμένου, η επιφάνεια με το σπείρωμα στο πίσω μέρος του εκτοξευτήρα νερού και το κάτω μέρος του εκτοξευτήρα που δεν αποτυπώθηκαν όλες οι γεωμετρίες.

Αφότου έγιναν οι διορθώσεις στις επιφάνειες όπου χρειαζόταν, έγινε knit και extrude όλων των γεωμετριών για την δημιουργία του CAD στερεού. Στη συνέχεια, η διαδικασία πραγματοποιήθηκε σαν μια τυπική τρισδιάστατη σχεδίαση. Δηλαδή δημιουργήθηκαν οι σπές στα σημεία που χρειαζόταν, φτιάχτηκε η γεωμετρία στο κάτω μέρος του εκτοξευτήρα, διορθώθηκε το πάνω μέρος του πλαστικού παροχής και δημιουργήθηκαν τα τρία μοτίβα που στο surface wizard δεν ήταν δυνατόν να απομονωθούν γιατί ήταν πολύ μικρά. Επίσης, φτιάχτηκε το σπείρωμα στο πίσω μέρος του εκτοξευτήρα.



Εικόνες 6.3.10-6.3.11: Το τελικό μοντέλο του εκτοξευτήρα νερού

Το τελικό αποτέλεσμα συγκρίνοντας το με το μελετώμενο αντικείμενο, παρατηρήθηκε ότι είναι πολύ καλό. Παρόλα αυτά, η ανάλυση απόκλισης σε αυτήν την περίπτωση δεν θα είχε θετικό αποτέλεσμα αφού

οι αρχικές σαρώσεις του εκτοξευτήρα νερού δεν είναι ακριβείς και έχουν πραγματοποιηθεί πολλές αλλαγές πάνω σε αυτές. Αν δινόταν βάση στην ανάλυση απόκλισης θα είχε ως αποτέλεσμα να φαίνεται ότι το τελικό αντικείμενο έχει πολλά σφάλματα, κάτι το οποίο δεν είναι αληθές. Έτσι, με την επιτυχή ανάλυση του εκτοξευτήρα νερού ολοκληρώνεται η πειραματική διαδικασία της παραγωγής στερεού CAD μοντέλου με χρήση τεχνολογιών αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης.

7 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ-ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

7.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Κάνοντας μια ανασκόπηση της πειραματικής διαδικασίας, έγινε μια μελέτη τριών αντικειμένων χρησιμοποιώντας την αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση για την δημιουργία των CAD μοντέλων τους. Τα αντικείμενα αυτά ήταν δύο ποντίκια υπολογιστή και ένας εκτοξευτήρας νερού, τα οποία ήταν κατασκευασμένα από πλαστικά υλικά.

Το πρώτο ποντίκι αναλύθηκε με την χρήση δύο φωτογραφιών, μιας με την κάτοψη του και μίας με την πλάγια όψη του, μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης με την φωτογραμμετρία. Με την αξιοποίηση των εργαλείων του τρισδιάστατου CAD προγράμματος δημιουργήθηκε, με χρήση ως οδηγό τις φωτογραφίες, το στερεό μοντέλο του μελετώμενου ποντικιού. Στη συνέχεια, έγινε σύγκριση του τρισδιάστατου στερεού με αυτές για τον καθορισμό της επίτευξης των στόχων.

Το δεύτερο ποντίκι αναλύθηκε με τον σαρωτή λευκού φωτός της DAVID, τον SLS 2. Έγινε η ρύθμιση του συστήματος σάρωσης στις κατάλληλες παραμέτρους και στην συνέχεια σαρώθηκε το ποντίκι περιμετρικά. Οι σαρώσεις αυτές αναλύθηκαν, έγιναν οι κατάλληλες διορθώσεις και στην συνέχεια ευθυγραμμίστηκαν μεταξύ τους μέσω του προγράμματος Geomagic Wrap 2014. Μετά την ευθυγράμμιση, οι σαρώσεις συγχωνεύτηκαν δημιουργώντας ένα μοναδικό πλέγμα. Διορθώθηκαν τυχόν σφάλματα που είχαν οι σαρώσεις και προσδιορίστηκαν οι καρτεσιανές συντεταγμένες. Στην συνέχεια, έγινε μια ανάλυση απόκλισης μεταξύ του τελικού πλέγματος και του αρχικού. Εξήχθη το τελικό πλέγμα του ποντικιού από το πρόγραμμα επεξεργασίας του σε μορφή .obj και ανοίχτηκε από το CAD πρόγραμμα Solidworks 2020. Στο CAD πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκαν δύο τρόποι επεξεργασίας του πλέγματος. Ο πρώτος τρόπος ήταν με την χρήση του Surface Wizard. Με το Surface Wizard, χρησιμοποιώντας την χειροκίνητη μέθοδο, διαιρέθηκαν τα μέρη του ποντικιού σε απλούστερες γεωμετρίες και

δημιουργήθηκαν με βάση αυτές επιφάνειες που εφάρμοζαν πάνω σε αυτές τις γεωμετρίες. Με την χρήση των κατάλληλων εργαλείων, οι επιφάνειες αυτές διορθώθηκαν και στην συνέχεια ενώθηκαν μεταξύ τους δημιουργώντας την τελική επιφάνεια του ποντικιού. Ο δεύτερος τρόπος ήταν με την χρήση ήταν με την χρήση του Curve Wizard, όπου με χρήση του εργαλείου section έγιναν πολλές παράλληλες τομές κατά μήκος του ποντικιού. Σχεδιάστηκε μετά μια γραμμή, η οποία λειτούργησε ως οδηγός για την δημιουργία του loft που ξεκινούσε από την αρχή του ποντικιού ως το τέλος του με βάση τις τομές που έγιναν πιο πριν. Στην συνέχεια, μετατράπηκαν και στις δύο περιπτώσεις οι επιφάνειες αυτές σε CAD στερεά. Τα στερεά αυτά συγκρίθηκαν με το αρχικό πλέγμα του ποντικιού μέσω της ανάλυσης απόκλισης και βγήκαν τα ανάλογα συμπεράσματα, καθορίζοντας τον βαθμό επίτευξης των στόχων.

Ο εκτοξευτήρας νερού αναλύθηκε με τον ίδιο τρόπο όπως το δεύτερο ποντίκι, αφού σαρώθηκε και αυτός με τον σαρωτή λευκού φωτός. Δηλαδή, έγινε και για αυτόν η ρύθμιση του συστήματος σάρωσης στις κατάλληλες παραμέτρους και στην συνέχεια σαρώθηκε περιμετρικά. Παρόλα αυτά, χρειάστηκε να γίνουν κάποιες αλλαγές λόγω της χαμηλής ποιότητας σάρωσης σε κάποια σημεία του αντικειμένου που είχαν αναφερθεί παραπάνω. Στην συνέχεια, οι σαρώσεις αυτές αναλύθηκαν, έγιναν οι κατάλληλες διορθώσεις όπου ήταν δυνατόν και στην συνέχεια ευθυγραμμίστηκαν μεταξύ τους μέσω του προγράμματος Geomagic Wrap 2014, όπως έγινε και με το ποντίκι. Μετά την ευθυγράμμιση, οι σαρώσεις συγχωνεύτηκαν δημιουργώντας ένα μοναδικό πλέγμα. Διορθώθηκαν τα περισσότερα σφάλματα που είχαν παραμείνει και προσδιορίστηκαν οι καρτεσιανές συντεταγμένες. Μετέπειτα, έγινε μια ανάλυση απόκλισης μεταξύ του τελικού πλέγματος και του αρχικού που δόθηκε κατευθείαν από τον σαρωτή. Εξήχθη και εδώ το τελικό πλέγμα του εκτοξευτήρα από το πρόγραμμα επεξεργασίας του σε μορφή .obj και ανοίχτηκε από το CAD πρόγραμμα Solidworks 2020. Στο CAD πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας τρόπος επεξεργασίας του πλέγματος λόγω του προβλήματος των σαρώσεων που προαναφέρθηκε. Ο τρόπος που δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί λόγω της κακής ποιότητας σάρωσης του πλέγματος ήταν του Curve Wizard μιας και βασίζεται στην καλή ποιότητα της σάρωσης για την επίτευξη ενός σωστού αποτελέσματος. Αντιθέτως, εφαρμόστηκε η μέθοδος που χρησιμοποιεί το Surface Wizard. Με το Surface Wizard, χρησιμοποιώντας την χειροκίνητη μέθοδο, διαιρέθηκαν τα μέρη του ποντικιού σε απλούστερες γεωμετρίες και δημιουργήθηκαν με βάση αυτές, οι κατάλληλες επιφάνειες που εφάρμοζαν πάνω σε αυτές τις γεωμετρίες. Από αυτή την διαδικασία εξαιρέθηκαν οι επιφάνειες που ήταν λανθασμένες και σε αυτές, για τον σχεδιασμό τους, έγιναν μετρήσεις των γεωμετριών του φυσικού αντικειμένου. Αυτές οι επιφάνειες στην συνέχεια, σχεδιάστηκαν στα κατάλληλα σημεία και εισήχθησαν οι πραγματικές διαστάσεις με βάση αυτές τις μετρήσεις. Μετά, με την χρήση των κατάλληλων εργαλείων, οι επιφάνειες αυτές ενώθηκαν μεταξύ τους, δημιουργώντας την ολοκληρωμένη επιφάνεια του εκτοξευτήρα νερού.

Στην συνέχεια αυτό το «κέλυφος» μετατράπηκε σε CAD στερεό. Δεν έγινε ανάλυση απόκλισης, αφού η σάρωση του εκτοξευτήρα ήταν λανθασμένη αλλά έγινε σύγκριση του τελικού, με το αρχικό αντικείμενο μετρώντας τις γεωμετρίες του. Τέλος, καθορίστηκε ο βαθμός επίτευξης των στόχων της πειραματικής διαδικασίας.

7.2 ΔΥΣΚΟΛΙΕΣ ΠΟΥ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΤΗΚΑΝ

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούν περιληπτικά οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά την σάρωση και ανάλυση των μελετώμενων αντικειμένων.

Κατά την διάρκεια των σαρώσεων, συναντήθηκαν αρκετές δυσκολίες. Καταρχάς, η μεγαλύτερη δυσκολία που συναντήθηκε ήταν ο έντονος φωτισμός που επικρατούσε στο δωμάτιο, λόγω της ύπαρξης ενός φεγγίτη στο δωμάτιο της πειραματικής διαδικασίας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, οι σαρώσεις να έχουν μειωμένη ακρίβεια διότι οι αντανακλάσεις των ακτινών του ηλίου δημιουργούσαν θόρυβο και ανακρίβειες στο αποτέλεσμα των σαρώσεων. Για να καταπολεμηθεί αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε ένα μαύρο χαρτόνι που τοποθετήθηκε γύρω από το σημείο σάρωσης, μειώνοντας έτσι την φωτεινότητα του περιβάλλοντος σημαντικά. Μπορεί έτσι να μην καταφέραμε να εκμηδενίσουμε αυτές τις ακτίνες, αλλά μειωθήκανε σε σημαντικό βαθμό. Παρόλα αυτά αν υπήρχε ένας τρόπος να καλύπτεται ο φεγγίτης που βρίσκεται στο δωμάτιο της πειραματικής διάταξης, τότε σίγουρα τα αποτελέσματα των σαρώσεων θα ήταν πολύ καλύτερα. Ένα άλλο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε κατά την διάρκεια των σαρώσεων, ήταν τα συχνά κρσαρίσματα καθώς και η μειωμένη ταχύτητα σαρώσεων του προγράμματος της DAVID. Αυτό συνέβαινε διότι ο υπολογιστής που είχαμε για τις σαρώσεις του εργαστηρίου είχε τα ελάχιστα κριτήρια για την λειτουργία του προγράμματος. Είχε δηλαδή πολύ λίγη μνήμη τυχαίας προσπέλασης (RAM), αργό επεξεργαστή (CPU) και το λογισμικό των Windows που το πρόγραμμα προτείνει της DAVID να είναι σε 64-bit για την ομαλή λειτουργία του, ήταν σε 32-bit. Έτσι η διαδικασία των σαρώσεων έγινε και πιο αργή αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις αποτύγχανε με αποτέλεσμα να πρέπει να επανεκκινηθεί το πρόγραμμα. Αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να διορθωθεί μόνο με την αναβάθμιση του συστήματος ηλεκτρονικού υπολογιστή και την αντικατάσταση της RAM και CPU. Τέλος, ο παράγοντας που δυσκόλεψε περισσότερο κατά την διαδικασία των σαρώσεων και βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην μεγάλη φωτεινότητα του χώρου της πειραματικής διαδικασίας, ήταν η αδυναμία αποτύπωσης ή λανθασμένη σάρωση κάποιων επιφανειών. Τις επιφάνειες αυτές που δεν κατάφερε ο σαρωτής να περιγράψει σωστά

που έχουν προαναφέρει και πιο πάνω, είναι οι εξής: η διάφανη επιφάνεια του ποντικιού, τα σημεία οπών, λεπτομέρειες όπως τα σπειρώματα, η αδυναμία διαχωρισμού των διαφορετικών ειδών υλικού και γενικά η μειωμένη ακρίβεια των σαρώσεων του εκτοξευτήρα νερού που λόγω της γυαλιστερής μεμβράνης που έχει σε όλη την επιφάνεια του (πιθανόν για την προστασία του πλαστικού από τον πολυμερισμό). Ένας τρόπος για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της γυαλιστερής επιφάνειας του εκτοξευτήρα θα ήταν να περαστεί με ένα στρώμα ματ σπρέι, το οποίο τελικά δεν έγινε μιας και με το μεγάλο πλήθος των σαρώσεων που λήφθηκαν, επιτεύχθηκε η απομόνωση των περισσότερων σφάλματων που προέρχονταν από αυτό τον λόγο.

Κατά την διαδικασία της ανάλυσης των σαρώσεων και της δημιουργίας του τρισδιάστατου στερεού, δεν αντιμετωπίστηκαν πολλά προβλήματα εκτός από αυτά που προήλθαν λόγω της αδυναμίας αποτύπωσης των επιφανειών από τον σαρωτή λευκού φωτός, στα οποία χρειάστηκαν να παρθούν μετρήσεις από το φυσικό αντικείμενο (εκτοξευτήρα νερού), ώστε να σχεδιαστούν οι σωστές γεωμετρίες των επιφανειών αυτών. Επίσης, λόγω αυτής της αδυναμίας αποτύπωσης των γεωμετριών, απορρίφθηκε η χρήση των τομών του Curve Wizard στην ανάλυση του εκτοξευτήρα νερού. Κατά την διάρκεια της ανάλυσης των σαρώσεων, έγινε προσπάθεια διόρθωσης των γεωμετριών πριν τελικά απορριφθούν. Εκεί διαπιστώθηκε η αδυναμία του Geomagic Wrap να δημιουργήσει καμπύλες επιφάνειες σε συσχέτιση με τις τριγύρω γεωμετρίες κατά την χρήση της εντολής Close Hole. Αυτό πιθανόν συμβαίνει, διότι το πρόγραμμα στην εντολή αυτή χρησιμοποιεί ως αναφορά τις οριακές γεωμετρίες γύρω από το σημείο που υπάρχει η επεξεργαζόμενη τρύπα. Ακόμα, κατά την διάρκεια επεξεργασίας του πλέγματος στο CAD πρόγραμμα κατά την χρήση του Surface Wizard, οι γεωμετρίες που δημιουργούσε το πρόγραμμα από τις χρωματισμένες επιφάνειες, τις περισσότερες φορές δεν ήταν στην βέλτιστη συνθήκη και έπρεπε να αλλαχθούν χειροκίνητα μία-μία κάνοντας την πειραματική διαδικασία πιο χρονοβόρα. Η τελευταία δυσκολία που συναντήθηκε στην πειραματική διαδικασία ήταν κατά την διάρκεια της δημιουργίας των επιφανειών με την μέθοδο τρισδιάστατης απεικόνισης με χρήση δύο φωτογραφιών που κάποιες γεωμετρίες έπρεπε να επανασχεδιαστούν για την αποφυγή του εκφυλισμού των επιφανειών. Αυτό το πρόβλημα βέβαια υπάρχει στα περισσότερα σύγχρονα CAD προγράμματα και δεν υπάρχει άλλος τρόπος αποφυγής του προβλήματος αυτού.

Αυτές ήταν όλες οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

7.3 ΣΧΟΛΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Καταρχάς, γίνεται ξεκάθαρο ότι η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση είναι μία διαδικασία που αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλούς λόγους από έναν μηχανολόγο μηχανικό. Η σωστή διαδικασία αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου, του κόστους καθώς και την αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων μελέτης ενός αντικειμένου/δοκιμίου σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους. Αυτό γίνεται σαφές και από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

Συγκεκριμένα, η διαδικασία τρισδιάστατης απεικόνισης ενός ηλεκτρονικού ποντικιού με δύο φωτογραφίες έγινε με μία μέθοδο. Βλέποντας το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου, παρατηρείται ότι ενώ αυτή η διαδικασία είναι σχετικά απλή και πολύ γρήγορη στην εκτέλεση της, τα αποτελέσματα που δίνει δεν είναι τόσο ακριβή ώστε ο μελετητής να μπορεί να τα χρησιμοποιήσει για την ρεαλιστική μελέτη ενός αντικειμένου. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτήν την μέθοδο φωτογραμμετρίας, ο χρήστης βασίζεται στην πείρα του και στην όραση του για την δημιουργία των γεωμετριών του αντικειμένου και όχι σε κάτι απτό, το οποίο δεν είναι επιστημονικά αποδεκτό. Παρόλα αυτά το θετικό αυτής της μεθόδου είναι το έως μηδενικό κόστος της πειραματικής διάταξης μιας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι και η κάμερα ενός κινητού για την λήψη των φωτογραφιών που χρειάζονται για την πειραματική διαδικασία. Συμπερασματικά, η αντίστροφη μηχανολογική σχεδίαση με χρήση φωτογραφιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσεγγιστική μελέτη ενός αντικειμένου και όχι την ακριβή ανάλυση του.

Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με σαρωτή λευκού φωτός σε ένα άλλο ποντίκι ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η διαδικασία έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος ήταν με την χρήση του Surface Wizard για την δημιουργία της επιφάνειας του ποντικιού. Ο δεύτερος τρόπος ήταν με την χρήση του Curve Wizard. Στον πρώτο τρόπο, τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας ήταν πολύ ικανοποιητικά, όπως προέκυψε και από την ανάλυση απόκλισης (deviation analysis) που έγινε στο τέλος. Ο λόγος που το αποτέλεσμα ήταν τόσο καλό είναι διότι οι σαρώσεις που πάρθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία (εκτός από την διάφανη επιφάνεια που ήταν αδύνατον να σαρωθεί από την πειραματική διάταξη) ήταν πολύ ακριβείς. Επίσης το Surface Wizard, όπως γίνεται προφανές από την ανάλυση απόκλισης, έχει πολύ μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα του, αν οι σαρώσεις του μελετώμενου αντικειμένου είναι πολύ καλές. Δημιουργήθηκε λοιπόν, μέσα από την επεξεργασία των γεωμετριών που δόθηκαν από την χρήση του Surface Wizard, μια πολύ πιστή στο αρχικό αντικείμενο γεωμετρία, δείχνοντας ότι, αν η πειραματική διαδικασία πραγματοποιηθεί σωστά, τα

αποτελέσματα μπορεί να είναι πολύ ικανοποιητικά. Τα αποτελέσματα της δεύτερης μεθόδου ανάλυσης των σαρώσεων ήταν και αυτά πολύ καλά, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι το πλέγμα που μεταφέρθηκε στο CAD πρόγραμμα ήταν πολύ λεπτομερές και είχε πολύ μικρή απόκλιση από την πραγματική γεωμετρία του φυσικού αντικείμενου. Παρόλα αυτά, στην μία άκρη από τα σημεία που έγιναν οι τομές πάνω στο πλέγμα, η γεωμετρία του ποντικίου δεν ήταν σωστή στην αρχή. Αυτό συνέβη, διότι με αυτήν την τεχνική και λόγω του γεγονότος ότι η γεωμετρία είναι σύνθετη, το πρόγραμμα δεν ξέρει πώς να κλείσει την γεωμετρία στα άκρα που οι τομές δεν δίνουν επαρκής πληροφορίες για το εργαλείο loft, αναγκάζοντας έτσι το πρόγραμμα να την κάνει τυχαία. Αυτό πάντως διορθώθηκε, χρησιμοποιώντας μια κάθετη στις υπόλοιπες τομή στο σχήμα που λειτουργεί ως οδηγός για τη δημιουργία του loft.

Τέλος, όπως και το ποντίκι, έτσι και η σάρωση του εκτοξευτήρα νερού έγινε με την χρήση της διάταξης του σαρωτή λευκού φωτός. Από την αρχή της διαδικασίας έγινε σαφές, ότι εξαιτίας των προβληματικών σαρώσεων θα αντιμετωπιζόντουσαν δυσκολίες στην συνέχεια του πειράματος. Καταρχάς, απορρίφθηκε η χρήση της μεθόδου που χρησιμοποιεί τομές στο σαρωμένο πλέγμα (Curve Wizard). Αυτό έγινε διότι, λόγω των προβλημάτων κάποιων σαρωμένων επιφανειών, η δημιουργία των επιφανειών με την χρήση των τομών μπορεί να ήταν συνεπή με το αποτέλεσμα της σάρωσης που εισήχθη στο CAD πρόγραμμα, αλλά είχαν μεγάλη διαφορά από την πραγματική γεωμετρία του μελετώμενου αντικείμενου, κάτι το οποίο είναι ανεπίτρεπτο για την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Με τον δεύτερο τρόπο, δηλαδή με την χρήση του Surface Wizard, έγιναν κάποιες παραδοχές για να συνεχιστεί η διαδικασία. Πρώτα απ' όλα, οι γεωμετρικές που ήταν εσφαλμένες μετρήθηκαν από το πραγματικό αντικείμενο και σχεδιάστηκαν μετά την χρήση του Surface Wizard, σύμφωνα με τις παραπάνω μετρήσεις. Επίσης, δεν έγινε ανάλυση απόκλισης αφού όπως έγινε και παραπάνω σαφές, πολλές γεωμετρικές της σάρωσης δεν ήταν σωστές με αποτέλεσμα αν θα γινόταν η σύγκριση μεταξύ του στερεού CAD μοντέλου και του σαρωμένου πλέγματος μέσω της ανάλυσης απόκλισης, οι διαφορές σε κάποια σημεία του αντικείμενου θα ήταν πολύ μεγάλες, δίνοντας την αίσθηση ότι το τελικό CAD μοντέλο είναι λάθος κάτι το οποίο δεν ισχύει. Συμπερασματικά με την χρήση της δεύτερης μεθόδου το τελικό αποτέλεσμα ήταν πολύ καλό, συγκρίνοντας το με το αρχικό αντικείμενο. Παρόλα αυτά, κανονικά για να θεωρηθεί μια μελέτη αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με χρήση σαρωτή πλήρως επιτυχημένη, δεν θα έπρεπε με το πέρας των σαρώσεων ο χειριστής να αναγκαστεί να μετρήσει κάποιες γεωμετρικές του μελετώμενου αντικείμενου επειδή κάποια σημεία της σάρωσης είναι εσφαλμένα. Το γεγονός, ότι έγινε αυτό δεν σημαίνει ότι η διαδικασία ήταν ανεπιτυχής, απλά ότι δεν ήταν η βέλτιστη, παρά το καλό τελικό αποτέλεσμα.

Συγκρίνοντας τις μεθοδολογίες μελέτης, γίνεται σαφές ότι η μεθοδολογία που πέτυχε τους στόχους που είχαν τεθεί και είχε γενικά το καλύτερο αποτέλεσμα, ήταν η μέθοδος της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με χρήση σαρωτή λευκού φωτός αξιοποιώντας το εργαλείο Surface Wizard. Αυτό διότι οι γεωμετρίες που δημιουργήθηκαν στο ποντίκι και στον εκτοξευτήρα νερού (από αυτές που δεν απορρίφθηκαν), είχαν πολύ μικρή απόκλιση από τις πραγματικές. Παρόλα αυτά, όπως φάνηκε και από την ανάλυση του εκτοξευτήρα νερού είναι πολύ σημαντικό οι σαρώσεις να είναι όσο γίνεται πιο ακριβείς, διότι το πρόγραμμα για την δημιουργία αυτών των επιφανειών βασίζεται στο πλέγμα που έχει δημιουργηθεί από την επεξεργασία των σαρώσεων για να έχει σωστό αποτέλεσμα. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιεί το Curve Wizard για την δημιουργία του CAD στερεού ενός αντικειμένου από την γεωμετρία του πλέγματος είναι πολύ εύκολη και γρήγορη. Όμως, δεν προτείνεται σε περιπτώσεις που η ποιότητα της σάρωσης είναι κακή ή αμφίβολη. Τέλος, η μέθοδος χρήσης δύο φωτογραφιών για την δημιουργία του CAD στερεού ενός αντικειμένου, όπως προαναφέρθηκε προτείνεται μόνο σε περιπτώσεις περιγραφής ενός αντικειμένου και όχι για την ακριβή μελέτη του.

7.4 ΤΡΟΠΟΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ

Με το πέρας της παρούσας εργασίας, δίνονται κάποιες δυνατότητες για περαιτέρω επεξεργασίας της. Οι δυνατότητες αυτές αναφέρονται τόσο σε πρακτικό όσο και σε θεωρητικό επίπεδο.

Όσον αφορά το πρακτικό επίπεδο, έχει γίνει η διαδικασία της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης με την χρήση της φωτογραμμετρίας χρησιμοποιώντας δύο φωτογραφίες και με τον σαρωτή λευκού φωτός. Μπορεί να γίνει μία ανάπτυξη ενός αντικειμένου και με άλλες διατάξεις αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης όπου θα συγκριθούν μεταξύ τους ή με τις προηγούμενες διατάξεις και να βγουν τα ανάλογα συμπεράσματα. Μια δεύτερη σκέψη για εξέλιξη της συγκεκριμένης μελέτης είναι να γίνει η διαδικασία και με άλλα επεξεργασίας πλέγματος και CAD προγράμματα, με σκοπό την ανάδειξη των δυνατοτήτων και αδυναμιών του καθενός από αυτά. Επίσης, μπορεί να γίνει η διαδικασία με άλλες μεθόδους που δεν έχουν αναφερθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Σε θεωρητικό επίπεδο, μια σκέψη είναι να αναλυθεί η τεχνολογία πίσω από τα προγράμματα επεξεργασίας του πλέγματος και δημιουργίας του CAD στερεού. Μπορεί να γίνει μια ανάλυση της εξέλιξης της αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης σαν διαδικασία στο βάθος χρόνων και τα θετικά αποτελέσματα από αυτήν τη εξέλιξη.

Τέλος, μπορεί η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία να αποτελέσει τη βάση για μια οικονομοτεχνική μελέτη, με σκοπό την εξακρίβωση του χρόνου και του κόστους που χρειάζεται για την ολοκλήρωση μιας μελέτης αντίστροφης μηχανολογικής σχεδίασης ενός δοκιμίου, τόσο σε ελεγχόμενο επίπεδο όσο και σε μια γραμμή παραγωγής.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Anwer, N. and Mathieu, L. (2016) 'From reverse engineering to shape engineering in mechanical design', *CIRP Annals*. CIRP, 65(1), p. 166. doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.052.

Ashburner, J. and Friston, K. J. (2000) 'Voxel-based morphometry - The methods', *NeuroImage*, 11(6 I), pp. 805–821. doi: 10.1006/nimg.2000.0582.

Association, T. D. and T. (2007) 'Main Applications of Computer Aided Design (CAD)'.

Bhandarkar, M. P. *et al.* (2000) 'Migrating from IGES to STEP: One to one translation of IGES drawing to STEP drafting data', *Computers in Industry*, 41(3), pp. 261–277. doi: 10.1016/S0166-3615(99)00052-4.

Boehler, W. *et al.* (2002) 'The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording', *Cipa2001*, (1), pp. 430–436.

Bogdan, S. L., Nedelcu, D. and Pădurean, I. (2019) 'The Reverse Engineering technique performed on a Francis Runner Geometry through Photogrammetry', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 477(1). doi: 10.1088/1757-899X/477/1/012021.

Borangiu, T. and Dumitrache, A. (2010) 'Robot Arms with 3D Vision Capabilities', *Advances in Robot Manipulators*. InTech. doi: 10.5772/9668.

Bridget O'Neal (2016) 'HP Acquires David Vision Systems GmbH & David 3D Solutions, Strengthening Immersive Sprout 3D Ecosystem', *3Dprint.com*. Available at: <https://3dprint.com/141050/hp-acquires-david-vision-systems/>.

Capture 3D (2020) *White Light vs Blue Light Scanning*. Available at: <https://www.capture3d.com/knowledge-center/blog/white-light-vs-blue-light-scanning> (Accessed: 16 December 2020).

Chien, C. H. *et al.* (2018) 'Comparison of optical and tactile Coordinate Measuring Machines in a production environment', *NDT 2014 - 53rd Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing*, 43(418), pp. 131–139.

CREAFORM (2014) 'Reverse Engineering of Physical Objects – Teaching Manual', (March), pp. 1–60.

Curless, B. and Levoy, M. (1996) 'Volumetric method for building complex models from range images', *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, pp. 303–312.

Ficco, M. M., Mandorli, F. and Otto, H. E. (1999) 'Error classification and recovery within CAD model reconstruction', *Proceedings of the Symposium on Solid Modeling and Applications*, (May), pp. 316–317. doi: 10.1145/304012.304056.

Gerbino, S. *et al.* (2004) 'Cheap photogrammetry versus expensive reverse engineering techniques in 3D model acquisition and shape reconstruction', *International design conference - design 2004*, p. 6. Available at:

<https://www.designsociety.org/publication/19831/CHEAP+PHOTOGRAMMETRY+VERSUS+EXPENSIVE+REVERSE+ENGINEERING+TECHNIQUES+IN+3D+MODEL+ACQUISITION+AND+SHAPE+RECONSTRUCTION>.

Herráez, J. *et al.* (2016) '3D modeling by means of videogrammetry and laser scanners for reverse engineering', *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 87, pp. 216–227. doi: 10.1016/j.measurement.2016.03.005.

Hettinga, G. J. and Kosinka, J. (2020) 'Conversion of B-rep CAD models into globally G1 triangular splines', *Computer Aided Geometric Design*, 77. doi: 10.1016/j.cagd.2020.101832.

Jeon, J. H. *et al.* (2015) 'Three-dimensional evaluation of the repeatability of scanned conventional impressions of prepared teeth generated with white- and blue-light scanners', *Journal of Prosthetic Dentistry*, 114(4), pp. 549–553. doi: 10.1016/j.prosdent.2015.04.019.

Ju, T. (2009) 'Fixing geometric errors on polygonal models: A survey', *Journal of Computer Science and Technology*, 24(1), pp. 19–29. doi: 10.1007/s11390-009-9206-7.

Kaufman, J., Rennie, A. E. W. and Clement, M. (2015) 'Single camera photogrammetry for reverse engineering and fabrication of ancient and modern artifacts', *Procedia CIRP*. Elsevier B.V., 36, pp. 223–229. doi: 10.1016/j.procir.2015.01.073.

Lanman, D. and Taubin, G. (2009) 'Build your own 3D scanner: 3D photography for beginners', in *ACM SIGGRAPH 2009 Courses, SIGGRAPH '09*. doi: 10.1145/1667239.1667247.

Lichti, D. D. and Harvey, B. . (2002) 'the Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements', *Geospatial Theory, Processing and Applications*, (2001).

Maas, H. G. and Hampel, U. (2006) 'Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring', *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 72(1), pp. 39–45. doi: 10.14358/PERS.72.1.39.

Maldonado, M. M. (2015) 'Qualitative Case Study on F-35 Fighter Production Delays Affecting National Security Guidance', *Walden Dissertations and Doctoral Studies*. Available at: <https://ezp.waldenulibrary.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir00976a&AN=wldu.dissertations.1588&site=eds-live&scope=site%0Ahttps://scholarworks.waldenu.edu/dissertations/589>.

Melexis (2020) 'Time-of-flight basics', pp. 1–15.

Patel, U. (2002) *SLS 2: Quick Guide, Current Biology*. 56070 Koblenz, Germany: DAVID Vision Systems.

Peuzin-Jubert, M. *et al.* (2021) 'Survey on the View Planning Problem for Reverse Engineering and Automated Control Applications ☆', *Computer-Aided Design*, 141, p. 103094. doi: 10.1016/j.cad.2021.103094.

Plaue, M. (2009) 'Theoretical and experimental error analysis of continuous-wave time-of-flight range cameras', *Optical Engineering*, 48(1), p. 013602. doi: 10.1117/1.3070634.

Raja, Vinesh, Fernandes, K. J. (2008) *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. Springer.

Raja, V. and Fernandes, K. J. (2008) *Reverse Engineering*. Springer.

Schnabel, R., Wahl, R. and Klein, R. (2007) 'Efficient RANSAC for point-cloud shape detection', *Computer Graphics Forum*. Blackwell Publishing Ltd, 26(2), pp. 214–226. doi: 10.1111/J.1467-8659.2007.01016.X.

Sivakumar, S. and Dhanalakshmi, V. (2013) 'An approach towards the integration of CAD/CAM/CAI through STEP file using feature extraction for cylindrical parts', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(6), pp. 561–570. doi: 10.1080/0951192X.2012.749527.

Strobl, K. H. *et al.* (2009) 'The self-referenced DLR 3D-modeler', *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, (December), pp. 21–28. doi: 10.1109/IROS.2009.5354708.

Tóth, T. and Živčák, J. (2014) 'A comparison of the outputs of 3D scanners', *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 69, pp. 393–401. doi: 10.1016/j.proeng.2014.03.004.

Várady, T., Martin, R. R. and Cox, J. (1997) 'Reverse engineering of geometric models - An introduction', *CAD Computer Aided Design*. Elsevier Ltd, 29(4), pp. 255–268. doi: 10.1016/s0010-4485(96)00054-1.

Vinet, L. and Zhedanov, A. (2011) 'Curves and surface in Geometric Modelling', *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8), pp. 1689–1699.

Wang, W. (2010) *REVERSE ENGINEERING: Technology of Reinvention*. 1st edn. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300: CRC Press.

Μπιλάλης, Ν. and Μαραβελάκης, Ε. (2014) *Συστήματα CAD/CAM & Τρισδιάστατη Μοντελοποίηση*. 2nd edn. Εκδόσεις Κριτική.