



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτομάτου
Ελέγχου – Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων
& Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού

**Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός και Έλεγχος
προδιαγραφών ακρίβειας εξαρτημάτων με επιφάνειες
ελεύθερης μορφής με τη χρήση του 3D-CAD
λογισμικού CATIA**

Διπλωματική εργασία

Όξινος Χριστόφορος

Επιβλέπων: Χρ. Προβατίδης

ΑΘΗΝΑ 2013

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Χριστόφορου Προβατίδη. Σκοπός της εργασίας αποτελεί η μελέτη και εφαρμογή του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού και ο έλεγχος της ποιότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων με τη χρήση του σχεδιαστικού πακέτου CATIA της Dassault Systemes σε εξαρτήματα με επιφάνειες ελεύθερης μορφής.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Χριστόφορο Προβατίδη αλλά και στον κ. Γιώργο Καϊσαρλή, Διδάκτορα Μηχανολόγο Μηχανικό και στέλεχος του παραπάνω Εργαστηρίου, για την πολύτιμη βοήθεια τους και την αρωγή τους καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της Διπλωματικής μου Εργασίας. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της.

Όξινος Χριστόφορος
Αθήνα, 07 Σεπτέμβριος 2013

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία παρουσιάζει όλα τα εργαλεία και δυνατότητες του σχεδιαστικού πακέτου CATIA ως μια ακόμη εναλλακτική και αξιόπιστη λύση σε προβλήματα αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού. Μέσα από εφαρμογές παρουσιάζονται και χρησιμοποιούνται μια πλειάδα από εντολές ακολουθώντας όλα τα βήματα και στάδια του αντίστροφου σχεδιασμού μέχρι να προκύψει το τελικό τρισδιάστατο αντικείμενο. Επιπλέον, το τελικό ψηφιακό αντικείμενο αναλύεται διεξοδικά και ελέγχεται σε ποιο βαθμό προσεγγίζει το πραγματικό αντικείμενο.

Λέξεις κλειδιά

Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός, CATIA, Computer-Aided Design, Γεωμετρικές και Διαστασιολογικές Ανοχές, Νέφος Σημείων, Πλέγμα, Deviation Analysis

Abstract

This dissertation paper is presenting all the tools and potential of the design package CATIA as an alternative and reliable solution to problems concerning reverse design. Through the application of CATIA a number of instructions that follow all the steps of reverse design are followed until the final 3D object is created. Furthermore, the final digital object is analyzed thoroughly and verifies to what extent it resembles the real object.

Keywords

Reverse Engineering, CATIA, Computer-Aided Design, Geometrical and Dimensional Tolerances, Cloud of Points, Mesh, Deviation Analysis

Πίνακας εύρεσης εικόνων

Εικόνα	Περιγραφή	Σελίδα
Εικόνα 3.1	Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας	15
Εικόνα 3.2	Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας	16
Εικόνα 3.3	Αντικείμενα ελεύθερης μορφής	16
Εικόνα 4.1	Μετάβαση από τη φυσική κατάσταση στη ψηφιακή	19
Εικόνα 4.2	Διάγραμμα ροής ΑΜΣ	22
Εικόνα 5.1	3D Laser Scanner σε διαδικασία σάρωσης	27
Εικόνα 5.2	Optical Scanner σε διαδικασία σάρωσης	27
Εικόνα 5.3	Μορφή ψηφιοποιημένου αρχείου μέσω βιομηχανικής τομογραφίας	28
Εικόνα 5.4	Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων	29
Εικόνα 6.1	Workbench DSE (πραγματικό αντικείμενο – νέφους σημείων – πλέγμα)	31
Εικόνα 6.2	(α) Τυπική μορφή νέφους σημείων (β) Εισαγωγή τριών νεφών σημείων	32
Εικόνα 6.3	Επιλογή και ενεργοποίηση ενός τμήματος του αντικειμένου	32
Εικόνα 6.4	Ευθυγράμμιση δύο νεφών σημείων με τη βοήθεια πυξίδας	33
Εικόνα 6.5	Απεικόνιση νέφους σημείων σε διάφορες τιμές φιλτραρίσματος (α) 14335 σημεία - 100% (β) Homogeneous Radius: 4.78 - 986 σημεία – 6.88% (γ) Homogeneous Radius: 9.56 - 284 σημεία – 1.98%	34
Εικόνα 6.6	(α) Τυπική μορφή πλέγματος (β) Μήκος άκρης τριγώνων με μικρό και μεγάλο neighborhood	35
Εικόνα 6.7	Επιλογή τμήματος για διαγραφή (Rectangular – Polygonal – Spline)	35
Εικόνα 6.8	Τρόποι πρόσθεσης τριγώνων στο πλέγματος	36
Εικόνα 6.9	(α) Τρίγωνα με ασυνεπή προσανατολισμό (β) Εμφάνιση μη πολλαπλών κορυφών (γ) Εμφάνιση τριγώνων με γωνία μικρότερη των (i) 6 μοιρών (ii) 8 μοιρών (δ) Διπλά τρίγωνα πριν και μετά τη διόρθωση	38
Εικόνα 6.10	Εμφάνιση κενών τμημάτων στο πλέγμα και επούλωση τους	39
Εικόνα 6.11	Workbench QSR (Κατασκευή καμπυλών και επιφανειών)	39
Εικόνα 6.12	Segmentation by slope σε μικρή και μεγάλη γωνία	40
Εικόνα 6.13	(α) 3D καμπύλες (β) Καμπύλες στο πλέγμα	41
Εικόνα 6.14	Εμφάνιση δικτύου καμπυλών	41
Εικόνα 6.15	Δημιουργία επιφάνεια μέσω δικτύου καμπυλών	42
Εικόνα 6.16	(α) Ένωση δύο επιφανειών (β) Διαγραφή μέρους επιφάνειας	42
Εικόνα 6.17	Δημιουργία επιφάνειας μέσω εντολής Automatic surfaces	43
Εικόνα 6.18	Εμφάνιση χαρτογράφησης πλέγματος σε (α) μικρή (β) μεσαία και (γ) μεγάλη ακτίνα εισροής (Influent Radius)	43
Εικόνα 6.19	Ανάλυση καμπυλότητας καμπυλών	44
Εικόνα 6.20	Δημιουργία πλαισίων σχολιασμού	44
Εικόνα 6.21	Τυπική εμφάνιση πληροφοριών στοιχείου	45
Εικόνα 6.22	Διάφορες μορφές εμφάνισης εντολής Deviation analysis	46
Εικόνα 6.23	Χειροκίνητος βραχίονας FARO ScanArm Laser Scanner	47
Εικόνα 6.24	Λείζερ κάμερα FARO ScanArm	47
Εικόνα 8.1.1	Workbench DSE	53
Εικόνα 8.1.2	Νέφος σημείων σε εμφάνιση polyline	54

Εικόνα 8.1.3	Νέφος σημείων σε εμφάνιση σημείων	54
Εικόνα 8.1.4	Φιλτραρισμένο νέφος σημείων	55
Εικόνα 8.1.5	Κατασκευή πλέγματος	55
Εικόνα 8.1.6	Αφαίρεση αχρειαστων τμημάτων πλέγματος	56
Εικόνα 8.1.7	Πρόσθεση τριγώνων με interactive triangle creation	57
Εικόνα 8.1.8	Σημεία σφάλματος πλέγματος	57
Εικόνα 8.1.9	Εφαρμογή εντολής fill edges	58
Εικόνα 8.1.10	Τελική εμφάνιση πλέγματος (πλαστικό πλυντηρίου)	59
Εικόνα 8.1.11	Πληροφορίες για το πλέγμα	59
Εικόνα 8.1.12	Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ νέφους και πλέγματος	60
Εικόνα 8.1.13	Segmentation by slope με κλίση 15 και 60 μοιρών	61
Εικόνα 8.1.14	Βηματική διαδικασία κατασκευής καμπυλών	63
Εικόνα 8.1.15	Εμφάνιση δικτύου καμπυλών	63
Εικόνα 8.1.16	Οι επιφάνειες που δημιουργήθηκαν από το δίκτυο καμπυλών	65
Εικόνα 8.1.17	Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ πλέγματος και επιφανειών	65
Εικόνα 8.1.18	Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ νέφους και επιφανειών	66
Εικόνα 8.2.1	Workbench QSR	66
Εικόνα 8.2.2	Εισαγωγή των δύο νεφών σημείων στο QSR	67
Εικόνα 8.2.3	Συγχώνευση των δύο σε ένα ενιαίο νέφος σημείων	68
Εικόνα 8.2.4	Τελική μορφή νέφους μετά από φιλτράρισμα	68
Εικόνα 8.2.5	Κατασκευή του πλέγματος	69
Εικόνα 8.2.6	Εντοπισμός σφαλμάτων και τελική εμφάνιση πλέγματος	70
Εικόνα 8.2.7	Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ ενιαίου νέφους και πλέγματος	71
Εικόνα 8.2.8	Segmentation by slope με κλίση 30 και 70 μοιρών	72
Εικόνα 8.2.9	Εμφάνιση αποτελεσμάτων από Segmentation by curvature	73
Εικόνα 8.2.10	Προσθήκη εξωτερικών σημείων στο πλέγμα	74
Εικόνα 8.2.11	Κατασκευή καμπυλών στο πλέγμα	75
Εικόνα 8.2.12	Τελικό δίκτυο καμπυλών	75
Εικόνα 8.2.13	Οι επιφάνειες που δημιουργήθηκαν από το δίκτυο καμπυλών	76
Εικόνα 8.2.14	Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ επιφανειών και πλέγματος	77
Εικόνα 8.2.15	Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ νέφους και επιφανειών	77

Πίνακας εύρεσης πινάκων

Πίνακας	Περιγραφή	Σελίδα
Πίνακας 5.1	Πεδία ανοχών κατά ISO-286	24
Πίνακας 5.2	Χαρακτηριστικά σύμβολα ανοχών	25
Πίνακας 8.1	Deviation analysis νέφος σημείων – πλέγμα	60
Πίνακας 8.2	Deviation analysis επιφάνειες - πλέγμα	65
Πίνακας 8.3	Deviation analysis επιφάνειες – νέφος σημείων	66
Πίνακας 8.4	Deviation analysis πλέγμα – νέφος σημείων (εφαρμογή 2)	71
Πίνακας 8.5	Deviation analysis επιφάνειες - πλέγμα	76
Πίνακας 8.6	Deviation analysis νέφος σημείων - επιφάνειες	77

Πίνακας εύρεσης διαγραμμάτων

Διάγραμμα	Περιγραφή	Σελίδα
Διάγραμμα 7.1	Τυπική Βηματική Διαδικασία DSE	50
Διάγραμμα 7.2	Τυπική Βηματική Διαδικασία QSR	51

Συμβολισμοί – Συντομογραφίες

Ελληνική Ορολογία	Ακρώνυμο	Αγγλική Ορολογία
Διπλωματική Εργασία	ΔΕ	
Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός	ΑΜΣ - RE	Reverse Engineering
Γεωμετρικές & Διαστασιολογικές Ανοχές	Γ&ΔΑ - G&DT	Geometrical & Dimensional Tolerances
Αρχή Ελαχίστου Υλικού	ΑΕΥ	Least Material Condition
Αρχή Περιβάλλουσας Επιφάνειας	ΑΠΕ	Envelope Principle
Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Αντίστροφου Σχεδιασμού	ΕΤΚΠ&ΑΣ	
Αρχή του Πλήρους Υλικού	ΑΠΥ - MMC	Maximum Material Condition
	CAD	Computer-Aided Design
	CAE	Computer-Aided Engineering
	CAM	Computer-Aided Manufacturing
	CFD	Computation Fluid Dynamics
	CNC	Computer Numerical Control
Μηχανή Μέτρησης Συντεταγμένων	CMM	Coordinate – Measuring Machine
	DSE	Digitized Shape Editor
	EP	Envelope Principle
Υβριδικός Σχεδιασμός	HM	Hybrid Modeling
Διαχείριση κύκλου ζωής προϊόντος	PLM	Product Lifecycle Management
Βιομηχανικός Τομογράφος	ICT	Industrial Computed Tomography
	QSR	Quick Surface Reconstruction
	RP	Rapid Prototyping
	RT	Rapid Tooling

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	8
1.1 Γενικά.....	8
1.2 Αντικείμενο και Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας.....	9
1.3 Δομή και οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας.....	10
Κεφάλαιο 2 - Επισκόπηση Έρευνας & Τεχνολογικής Εξέλιξης.....	11
2.1 Σχετικές Διπλωματικές Εργασίες στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ	11
2.2 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες	14
Κεφάλαιο 3 - Κατηγοριοποίηση εξαρτημάτων σύμφωνα με τη γεωμετρική τους διαμόρφωση	15
3.1 Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας.....	15
3.2 Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας	15
3.3 Αντικείμενα ελεύθερης μορφής	16
3.4 Υβριδικός Σχεδιασμός - Hybrid modeling.....	16
Κεφάλαιο 4 - Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός εξαρτημάτων με επιφάνειες ελεύθερης μορφής.....	18
4.1 Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός	18
4.2 Στάδια Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού.....	20
4.3 Διάγραμμα Ροής Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού.....	21
4.4 Κυριότερες Δυσκολίες στη Διεξαγωγή του ΑΜΣ	22
Κεφάλαιο 5 - Έλεγχος προδιαγραφών ακρίβειας εξαρτημάτων με επιφάνειες ελεύθερης μορφής.....	23
5.1 Γεωμετρικές και Διαστασιολογικές Προδιαγραφές Ακρίβειας στις Μηχανολογικές Κατασκευές	23
5.1.1 Διαστασιολογικές Ανοχές – Το Σύστημα Ανοχών–Συναρμογών	23
5.1.2 Γεωμετρικές Ανοχές – Τύποι	24
5.1.3 Βασικές Αρχές Γεωμετρικών και Διαστασιολογικών Ανοχών	26
5.2 Σύγχρονες τεχνολογίες και μέσα ποιοτικού ελέγχου.....	26
Κεφάλαιο 6 - Παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού	30
6.1 Γενική παρουσίαση του περιβάλλοντος CATIA PLM	30
6.2 Παρουσίαση workbench που χρησιμοποιήθηκαν στη ΔΕ.....	30
6.2.1 Digitized Shape Editor (DSE)	31
6.2.2 Quick Surface Reconstruction (QSR)	39
6.2.3 Επιπλέον χρήσιμες εντολές	45
6.3 Παρουσίαση του Hardware που χρησιμοποιήθηκε για το laser scanning	46
Κεφάλαιο 7 - Παρουσίαση της Μεθοδολογίας	48
Κεφάλαιο 8 - Εφαρμογές	53

8.1	Πλαστικό πλυντηρίου	53
8.2	Μαρμάρινη Φιάλη.....	66
Κεφάλαιο 9 - Συμπεράσματα & Προοπτικές Διπλωματικής Εργασίας		78
9.1	Συμπεράσματα Δ.Ε.	78
9.2	Κατευθύνσεις/ Προτάσεις για την συνέχεια της Δ.Ε.....	79

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα εξαρτήματα/προϊόντα/μηχανολογικές κατασκευές στη συνήθη βιομηχανική παραγωγή περιγράφονται κατά κανόνα από απλές γεωμετρικές μορφές οι οποίες προκύπτουν από τη σύνθεση βασικών στερεών, όπως ο κύλινδρος, η σφαίρα και το παραλληλεπίπεδο. Παλαιότερες μελέτες, αναφέρουν ότι το 80-85% των μηχανολογικών εξαρτημάτων περιγράφονται επαρκώς με τη συνδυαστική χρήση επιπέδων και κυλίνδρων, ενώ το ποσοστό αυτό φτάνει στο 90-95% εάν συμπεριληφθούν και άλλα βασικά στερεά (π.χ. κώνος, σφαίρα). Η διαπίστωση αυτή συνδέεται άμεσα με τις γεωμετρικές μορφές που αποδίδονται ευκολότερα από τα συνηθέστερα μέσα και μεθόδους παραγωγής στα οποία βασίζεται παραδοσιακά η κατασκευαστική δραστηριότητα (π.χ. τόννευση, φρεζάρισμα, διάτρηση). Ωστόσο, στη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή εμφανίζεται ολοένα και περισσότερο η ανάγκη κατασκευής αντικειμένων που οι επιφάνειές τους δεν περιορίζονται από τη σύνθεση βασικών γεωμετρικών στερεών και χαρακτηρίζονται από ελεύθερες μορφές π.χ. εργαλεία παραγωγής (εργαλεία διαμόρφωσης, χύτευσης) για την κατασκευή ελασματοουργικών εξαρτημάτων στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Αποτελεί γεγονός ότι η πρόσφατη εξέλιξη των βιομηχανικών κατασκευών σε συνδυασμό με την πρόοδο των μέσων παραγωγής και των συστημάτων μηχανολογικού σχεδιασμού με χρήση Η/Υ (Computer Aided Design – CAD), έχει προοδευτικά οδηγήσει στη χρήση σύνθετων γεωμετρικών μορφών οι οποίες χαρακτηρίζονται ως επιφάνειες ελεύθερης μορφής (free – form surfaces). Οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν έντονη γεωμετρική πολυπλοκότητα και προσεγγίζονται με πολωνυμικές συναρτήσεις υψηλού βαθμού και αντίστοιχες παραμετρικές καμπύλες τύπου Bézier, B-splines και NURBS. Σε σημαντικό αριθμό σύγχρονων τεχνολογικών εφαρμογών (αεροδιαστημική, αυτοκινητοβιομηχανία, κατασκευή οπτικών συστημάτων, βιοϊατρικών εμφυτευμάτων κ.α.) η επιτυχής απόδοση της γεωμετρίας με τη χρήση επιφανειών ελεύθερης μορφής αποτελεί προϋπόθεση για την εξασφάλιση των κρίσιμων λειτουργικών χαρακτηριστικών και των υψηλών επιδόσεων των προϊόντων και των κατασκευών.

Η μοντελοποίηση σε περιβάλλον 3-D CAD ενός εξαρτήματος/προϊόντος/κατασκευής αποτελεί στο σύγχρονο κατασκευαστικό περιβάλλον απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάπτυξη κρίσιμων εφαρμογών σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του. Έτσι, η φάση σχεδιασμού (εργαλεία ανάλυσης Computer Aided Engineering - CAE, όπως η ανάλυση FEM

- Finite Elements Method), η φάση κατασκευής πρωτοτύπων με μεθόδους Rapid Prototyping, η φάση προγραμματισμού παραγωγής και κατασκευής με σύγχρονα μέσα ελεγχόμενα από H/Y (Computer Aided Process Planning – CAPP και Computer Aided Manufacturing – CAM), η φάση ποιοτικού ελέγχου (Computer Aided Inspection Planning – CAIP) και τέλος η φάση συναρμολόγησης, βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ύπαρξη του τρισδιάστατου μοντέλου CAD. Ειδικότερα για τα εξαρτήματα/προϊόντα με ελεύθερες επιφάνειες, η αναγκαιότητα της τρισδιάστατης μοντελοποίησης σε περιβάλλον CAD είναι ακόμα μεγαλύτερη. Αυτό αποδίδεται στο ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, το τρισδιάστατο CAD μοντέλο αποτελεί τη βάση για αξιόπιστο και παραγωγικό ποιοτικό έλεγχο και τη συνακόλουθη εξασφάλιση της εναλλαξιμότητας των αντικειμένων. Σε αντίθεση με τα εξαρτήματα συμβατικής γεωμετρίας όπου ο ποιοτικός έλεγχος ενδεχομένως να περιορίζεται σε μετρήσεις αποστάσεων ή διαμέτρων, στα εξαρτήματα με ελεύθερες επιφάνειες ο ποιοτικός έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την υπολογιστική αντιπαραβολή των γεωμετρικών αποκλίσεων του κατασκευασμένου εξαρτήματος με την ονομαστική μορφή, αποκλειστικά σε περιβάλλον 3D CAD.

Από όσα ήδη αναφέρθηκαν πιο πάνω γίνεται σαφές ότι ο σχεδιασμός, η παραγωγή, ο ποιοτικός έλεγχος αλλά και ο Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός (ΑΜΣ) εξαρτημάτων με ελεύθερες επιφάνειες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση και αποτελούν νέα, σημαντικά και δυναμικά εξελισσόμενα πεδία επαγγελματικής και επιστημονικής δραστηριότητας του Μηχανολόγου Μηχανικού. Στο πλαίσιο αυτό περιλαμβάνεται η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας καθώς και η εξέλιξη των σχετικών μεθόδων, μέσων και τεχνολογικών εργαλείων που μπορούν να εξασφαλίσουν την επιτυχή παραγωγή τέτοιου είδους εξαρτημάτων.

1.2 Αντικείμενο και Στόχοι Διπλωματικής Εργασίας

Με βάση το παραπάνω πλαίσιο, η ΔΕ επιδιώκει μέσα από επιλεγμένες εφαρμογές σε αντικείμενα με επιφάνειες ελεύθερης μορφής να διερευνήσει πειραματικά το κατά πόσο είναι δυνατή και σε ποιο βαθμό, η 3D-CAD μοντελοποίηση ενός πραγματικού αντικειμένου με βάση τις αρχές του ΑΜΣ και με την αποκλειστική χρήση του λογισμικού πακέτου CATIA της Dassault Systemes. Σημειώνεται εδώ ότι το εν λόγω λογισμικό, το οποίο διαθέτει το Εργαστήριο Ταχείας Κατασκευής Πρωτοτύπων & Εργαλείων – Αντίστροφου Σχεδιασμού της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτελεί κατά γενική ομολογία το υψηλότερου τεχνολογικού επιπέδου υπολογιστικό εργαλείο με διεθνώς αναγνωρισμένο κύρος, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε βιομηχανικό περιβάλλον. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το CATIA αποτελεί παγκόσμια και κατ' αποκλειστικότητα το περιβάλλον 3D-CAD στο οποίο σχεδιάζονται και αναπτύσσονται εφαρμογές /κατασκευές και προϊόντα για την αεροδιαστημική και την αυτοκινητοβιομηχανία.

Βασικός στόχος της ΔΕ είναι να παρουσιάσει με συστηματικό τρόπο όλα τα απαραίτητα workbench και τις σχετικές εντολές του CATIA για εφαρμογές ΑΜΣ (Reverse Engineering - RE) και μέσα από την επεξεργασία και ανάλυση των τελικών ψηφιοποιημένων αντικειμένων να εξαχθούν συμπεράσματα για τις δυνατότητες του CATIA στην επίλυση προβλημάτων αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού. Παράλληλα η ΔΕ στοχεύει στην απόκτηση τεχνογνωσίας (know-how) σχετικής με τη χρήση του εν λόγω λογισμικού στο ΕΜΠ καθώς και στην καταρχήν συγκρότηση μεθοδολογίας διαχείρισης εφαρμογών ΑΜΣ σε αντικείμενα/ κατασκευές με επιφάνειες ελεύθερης μορφής μέσω των εργαλείων του CATIA.

1.3 Δομή και Οργάνωση της Διπλωματικής Εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μια σύντομη περιγραφή του προβλήματος που πραγματεύεται η ΔΕ, οριοθετείται το αντικείμενο και καθορίζονται οι στόχοι της.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται σύντομη επισκόπηση παλαιότερων ΔΕ που εκπονήθηκαν στο ΕΜΠ και είχαν συναφές αντικείμενο με την παρούσα ΔΕ, με έμφαση στην παρουσίαση της διαφοροποίησής της σε σχέση με τις εργασίες αυτές.

Στο **Κεφάλαιο 3** ορίζονται οι κατηγορίες εξαρτημάτων σύμφωνα με την γεωμετρική τους μορφή και παρουσιάζονται συνοπτικά τα στάδια και πλεονεκτήματα του υβριδικού σχεδιασμού.

Στο **Κεφάλαιο 4** οριοθετείται ο ΑΜΣ, αναφέρονται τα πεδία εφαρμογής του και επεξηγούνται τα στάδια και βήματα που απαιτούνται κατά την εφαρμογή του καθώς επίσης και οι βασικές δυσκολίες που παρουσιάζει.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται αναφορά σε θέματα γεωμετρικών και διαστασιολογικών ανοχών και ορίζονται βασικές αρχές τους όπως οι ΑΠΥ, ΑΕΥ, ΑΠΕ. Ακολουθώς, παρουσιάζονται τα κυριότερα σύγχρονα μέσα ποιοτικού ελέγχου και αναφέρονται ο τρόπος λειτουργίας, οι δυνατότητες, και τα πεδία εφαρμογής τους.

Στο **Κεφάλαιο 6** αφού πρώτα παρουσιαστεί το CATIA PLM αναλύονται διεξοδικά τα δύο βασικά workbench του CATIA για εφαρμογές ΑΜΣ τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην ΔΕ. Μέσα από εικονογραφημένο κείμενο παρουσιάζονται δεκάδες εντολών αναδεικνύοντας τις δυνατότητες του λογισμικού. Επίσης γίνεται αναφορά στον τρισδιάστατο σαρωτή που χρησιμοποιήθηκε κατά το laser scanning παρουσιάζοντας της βασικές λειτουργίες και χαρακτηριστικά του.

Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται βηματική ανάλυση της διαδικασίας ψηφιοποίησης ενός πραγματικού αντικειμένου σε εφαρμογές ΑΜΣ με την χρήση του CATIA. Επιχειρείται η όλη βηματική ανάλυση να αποδοθεί σε μορφή roadmap ούτως ώστε να αξιοποιείται σε όλες τις εφαρμογές ανεξάρτητα με τις απαιτήσεις τις εκάστοτε εφαρμογής.

Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζονται αναλυτικά οι εφαρμογές της ΔΕ με άμεση αναφορά στα βήματα και στάδια της διαδικασίας. Επεξηγούνται όλες οι εντολές που εκτελέστηκαν στο CATIA και με την βοήθεια εικόνων παρουσιάζεται και οπτικά η βηματική μετατροπή του πραγματικού αντικειμένου σε τρισδιάστατο ψηφιακό αντικείμενο.

Στο **Κεφάλαιο 9** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της ΔΕ και προτείνονται ιδέες και κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο πεδίο του ΑΜΣ με την χρήση CATIA.

Η ΔΕ ολοκληρώνεται με τις βιβλιογραφικές αναφορές.

Κεφάλαιο 2

Επισκόπηση Έρευνας & Τεχνολογικής Εξέλιξης

2.1 Σχετικές ΔΕ στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Στο πλαίσιο των εκπαιδευτικών και ερευνητικών δραστηριοτήτων της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ έχουν εκπονηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων πέντε διπλωματικές εργασίες με αντικείμενο που είναι σχετικό με αυτό της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

**«Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός με Χρήση του
Μετρητικού Συστήματος FARO»**

**Γεώργιος Ε. Τσίγκας, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ,
Αθήνα, Φεβρουάριος 1998**

Η εργασία επιχειρεί μια πρώτη προσέγγιση στην εφαρμογή τεχνικών ΑΜΣ με τη χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ) τύπου Αρθρωτού Βραχίονα με αισθητήρα επαφής. Η εργασία εστιάζεται σε συμβατικά μηχανολογικά εξαρτήματα που περιγράφονται με Μορφολογικά Στοιχεία Σχεδιασμού (Form Features). Παρουσιάζονται τέσσερις εφαρμογές τέτοιων αντικειμένων και γίνεται χρήση του τότε διαθέσιμου σχετικού εξοπλισμού του Εργαστηρίου (βραχίονας FARO – IND01, μετρητικό λογισμικό CALIPER-3D, λογισμικό CAD Mechanical Desktop). Η αξιολόγηση των εφαρμογών είναι θετική με βάση τον χρόνο και την ευκολία μοντελοποίησης σε περιβάλλον CAD μηχανολογικών αντικειμένων που περιγράφονται από απλά form features κατά τον ΑΜΣ.

**«Αντίστροφος Σχεδιασμός Αντικειμένων Πολύπλοκης Γεωμετρίας
σε περιβάλλον CMM – CAD»**

**Θ. Βασιλόπουλος, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ,
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2003**

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται οι ευρύτερα διαδεδομένες τεχνολογίες και διατάξεις για τη μέτρηση και αποτύπωση μηχανολογικών αντικειμένων πολύπλοκης

γεωμετρίας με τη χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων (ΜΜΣ). Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της αναπαράστασης γεωμετρικών αντικειμένων σε Η/Υ και της λειτουργίας λογισμικών μηχανολογικής σχεδίασης και γεωμετρικής μοντελοποίησης σε Η/Υ (CAD). Γίνεται χρήση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου για την αποτύπωση μηχανολογικών αντικειμένων (περωτή και διαχύτης βαθμίδας υποβρύχιας αντλίας) και τον ανασχεδιασμό γεωμετρικών μοντέλων τους σε περιβάλλον 3D-CAD. Αποτυπώνεται η χρηστικότητα των παραπάνω μέσων, εντοπίζονται και αντιμετωπίζονται τυχόν δυσχέρειες στη συνεργασία και διασύνδεσή τους. Τέλος εκτιμάται η δυνατότητα επέκτασης της ακολουθούμενης μεθοδολογίας σε αξιοποιήσιμα αποτελέσματα σε επίπεδο παραγωγικής διαδικασίας. Σημειώνεται ότι στην εν λόγω ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τα λογισμικά I-DEAS, SolidWorks και Geomagic Studio.

**«Εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων σε μηχανή»
Μ. Κάνιας Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
Αθήνα, Σεπτέμβριος 2005**

Παρουσιάζεται η σειρά των προτύπων ISO-GPS 15530, Geometrical Product Specification, Techniques for determining the uncertainty of measurement, η οποία εστιάζει στην εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις με χρήση ΜΜΣ. Ειδικότερη μνεία και αναλυτική παρουσίαση γίνεται στο πρότυπο ISO 15530-3 στο οποίο περιγράφεται μια εναλλακτική διαδικασία που είναι σύμφωνη με το GUM και χρησιμοποιεί απλά εργαλεία για την εκτίμηση της αβεβαιότητας. Παράλληλα, εντοπίζονται οι πηγές που συμβάλουν στην αβεβαιότητα μέτρησης με χρήση ΜΜΣ, και υποδεικνύονται οι υπάρχουσες μέθοδοι συνυπολογισμού τους στην εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας. Αυτό γίνεται ώστε να καθοριστεί η σχέση αιτίας μεταξύ των συστατικών της αβεβαιότητας και των σφαλμάτων με τα οποία συνδέονται, καθώς και για να καταδειχθεί η βαρύτητα των σημαντικότερων απ' αυτά. Ακολουθεί η πειραματική εφαρμογή του παραπάνω προτύπου στον συναφή εξοπλισμό του ΕΤΚΠ&ΑΣ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την εκτίμηση της αβεβαιότητας, σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια υπολογιστικού εργαλείου το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής και έχει ως σκοπό την επεξεργασία των μετρήσεων. Τέλος, μετά από τη συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων εξάγονται ειδικότερα συμπεράσματα που αφορούν στο μετρητικό περιβάλλον και τον σχετικό εξοπλισμό του Εργαστηρίου ΤΚΠ&Ε του Ε.Μ.Π. αλλά και γενικότερα συμπεράσματα που αφορούν στην εφαρμογή της όλης διαδικασίας.

**«Συμβολή στη χρήση τεχνολογιών για την τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση
αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς»
Ε. Φωτόπουλος, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ
Αθήνα, Ιούλιος 2008**

Κύριο αντικείμενο της ΔΕ είναι η συστηματική καταγραφή και τεκμηρίωση η οποία αφορά στα απαραίτητα στάδια και στα επιμέρους βήματα της διαδικασίας ψηφιακής αποτύπωσης και της δημιουργίας ηλεκτρονικού μοντέλου σε περιβάλλον 3D CAD αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με σκοπό τη δημιουργία ενός αντίστοιχου διαγράμματος ροής (workflow) των σχετικών εργασιών. Για τις πιλοτικές εφαρμογές του διαγράμματος ροής χρησιμοποιήθηκε ο υφιστάμενος εξοπλισμός (μέσα ψηφιακής αποτύπωσης, σαρωτές laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM, λογισμικό επεξεργασίας, μηχανές ταχείας πρωτοτυποποίησης κ.α.) του ΕΤΚΠ&ΑΣ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Παρουσιάζονται αναλυτικά τρεις χαρακτηριστικές

μελέτες περιπτώσεις - εφαρμογές ψηφιακής αποτύπωσης (Κυκλαδικό Ειδώλιο, Κεφαλή Ηρακλή, Πολίτικη λύρα) για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν μουσειακά αντίγραφα και αυθεντικά αντικείμενα. Τα αποτελέσματα των τριών εφαρμογών σχολιάζονται και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενο της ΔΕ. Σημειώνεται ότι στην εν λόγω ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τα λογισμικά Geomagis Studio και PC-DMIS.

«Τρισδιάστατη CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς με χρήση Μηχανών Μέτρησης Συντεταγμένων τύπου Αρθρωτού Βραχίονα»

Π. Τσίγκου, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Κύριο αντικείμενο της ΔΕ είναι η διερεύνηση του επιπέδου πιστότητας που μπορεί να επιτευχθεί κατά την ψηφιακή αποτύπωση και την 3D-CAD μοντελοποίηση αντικειμένων πολιτιστικού ενδιαφέροντος, με τη χρήση λείζερ κάμερας προσαρτημένης σε μηχανή μέτρησης συντεταγμένων τύπου αρθρωτού βραχίονα. Ειδικότερα, διερευνάται πειραματικά η επίδραση τόσο του υλικού όσο και συγκεκριμένων παραμέτρων του λογισμικού στην πιστότητα-αβεβαιότητα του παραγόμενου CAD μοντέλου. Επίσης, εξετάζονται οι δυνατότητες ψηφιακής αποκατάστασης και ανασύνθεσης αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς από τα επιμέρους διατιθέμενα μέλη τους με τη χρήση εργαλείων 3D-CAD. Η πειραματική διερεύνηση πραγματοποιήθηκε μέσα από τρεις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιήθηκε ο σχετικός εξοπλισμός (σαρωτής laser, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων, το λογισμικό επεξεργασίας νέφους σημείων GEOMAGIC STUDIO, μετρητικό λογισμικό) του ΕΤΚΠ&ΑΣ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Στην πρώτη εφαρμογή παρουσιάζεται η μοντελοποίηση πρότυπης σφαίρας, στη δεύτερη η ψηφιακή αποτύπωση μουσειακού αντιγράφου κυκλαδικού ειδωλίου, ενώ η τρίτη αναφέρεται στην προσπάθεια ψηφιακής αποκατάστασης θραυσμένου κεραμικού κυαθίου. Για τις δύο πρώτες εφαρμογές, τα αποτελέσματα της 3D-CAD μοντελοποίησης ελέγχονται ως προς την διαστασιολογική και γεωμετρική πιστότητα τους αντίστοιχα με τη χρήση υψηλής ακρίβειας μηχανής μέτρησης συντεταγμένων τύπου γέφυρας με αισθητήρα επαφής. Τα συνολικά αποτελέσματα των τριών εφαρμογών σχολιάζονται και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της ΔΕ.

Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι το βασικότερο χαρακτηριστικό της παρούσας ΔΕ, το οποίο ασφαλώς την διαφοροποιεί από παλαιότερες συναφείς ΔΕ, είναι η αποκλειστική χρήση των εργαλείων του λογισμικού CATIA της Dassault Systemes σε εφαρμογές αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού. Όπως προαναφέρθηκε, το CATIA αποτελεί ίσως το εγκυρότερο μηχανολογικό 3D-CAD/PLM πακέτο της διεθνούς αγοράς τα τελευταία 25 χρόνια παρέχοντας στους χρήστες του ευρύτατη γκάμα δυνατοτήτων, μεταξύ των οποίων και ο ΑΜΣ, με υψηλής ποιότητας αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό η ΔΕ εστιάζεται στη χρήση του CATIA επιχειρώντας να διερευνήσει πειραματικά τόσο την ευχέρεια χρήσης όσο τελικά και την αξιοπιστία του εν λόγω εργαλείου ακόμη και σε προβλήματα ΑΜΣ, όπου ανταγωνίζεται άλλα υπολογιστικά/σχεδιαστικά πακέτα που ειδικεύονται αποκλειστικά και μόνο σε προβλήματα τέτοιας φύσεως. Σημειώνεται επίσης ότι η παρούσα ΔΕ αποτελεί την πρώτη τέτοιου είδους εργασία στη Σχολή Μηχανολόγων του ΕΜΠ με τη χρήση των συγκεκριμένων εργαλείων του εν λόγω λογισμικού.

2.2 Σχετικές Ερευνητικές Εργασίες

«Μορφοποίηση Πιστών Αντιγράφων Αρχαίων Αντικειμένων Με Εφαρμογή Μεθόδων Αντίστροφης Μηχανολογίας και Ταχείας Προτυποποίησης»

**Ε. Βαρύτης, Διδακτορική Διατριβή, Εργαστήριο Εργαλειομηχανών και Διαμορφωτικής Μηχανολογίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ
Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2009**

Η διδακτορική αυτή διατριβή εξετάζει τον συνδυασμό μεθόδων ΑΜΣ και ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων και την συναφή εφαρμογή τους σε αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος. Ειδικότερα σε ότι αφορά στην μοντελοποίηση CAD αντικειμένων τέτοιου είδους, εστιάζεται στα εξής δύο προβλήματα: (α) της αυτόματης συνένωσης δύο ή περισσότερων νεφών σημείων και (β) της απόκτησης και βελτίωσης της ηλεκτρονικής αναπαράστασης της γεωμετρίας αντικειμένων από ένα πολύ μικρό πλήθος σημείων. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών αναπτύσσονται κι εφαρμόζονται νέοι υβριδικοί αλγόριθμοι που συνδυάζουν κατά περίπτωση δύο ή τρεις μεθοδολογίες (γενετικοί, quasi Newton αλγόριθμοι κ.α.).

Κατά την εκπόνηση της ΔΕ πραγματοποιήθηκε μικρής έκτασης βιβλιογραφική αναζήτηση στα πεδία που εντάσσονται στο αντικείμενό της, από την οποία διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μεγάλο πλήθος σχετικών ερευνητικών εργασιών και δημοσιεύσεων. Συμπερασματικά, αναφέρεται ότι η μεθοδολογική προσέγγιση ΑΜΣ στις σχετικές δημοσιεύσεις εντοπίζεται κατά κύριο λόγο στη μοντελοποίηση σε περιβάλλον CAD και εστιάζεται σε δύο περιοχές έρευνας: (α) την ψηφιακή αποτύπωση επιφανειών, (β) τη διαχείριση και μαθηματική επεξεργασία νέφους σημείων που προκύπτουν, με στόχο την προσαρμογή τους σε μαθηματικές επιφάνειες. Στη δημοσιευμένη τεχνική βιβλιογραφία αναπτύσσονται αλγόριθμοι για την αυτοματοποιημένη διαλογή, αναγνώριση των ορίων και οργάνωση του νέφους σημείων σε παράλληλα επίπεδα ή σε περιοχές με καθορισμένα χαρακτηριστικά (π.χ. μεταβολής της κλίσης ή συγκεκριμένης μορφής). Επίσης, αλγόριθμοι για την αραίωση του νέφους σημείων, αποφυγή αλληλοεπικάλυψης, αναγνώριση επαναλαμβανόμενων σημείων, απόρριψη σημείων που βρίσκονται σε μεταξύ τους απόστασή μικρότερη από ορισμένο αριθμητικό όριο, καθώς και επαναληπτικοί αλγόριθμοι για την βελτιστοποίηση της προσαρμογής επιφανειών τύπου NURBS που προσεγγίζονται με πολυωνυμικές συναρτήσεις και αντίστοιχες παραμετρικές επιφάνειες, Βασικός ερευνητικός στόχος των σχετικών εργασιών είναι η βελτιστοποίηση του απαιτούμενου αριθμού επαναλήψεων, που μεταφράζεται άμεσα σε υπολογιστικό χρόνο, σε σχέση με την επιτυγχάνομενη ακρίβεια προσαρμογής. Καθώς η παρούσα ΔΕ εστιάζεται στην πειραματική διερεύνηση και χρήση του λογισμικού CATIA η αναλυτική περαιτέρω αναφορά στα παραπάνω ξεφεύγει από τους στόχους και τον σκοπό της.

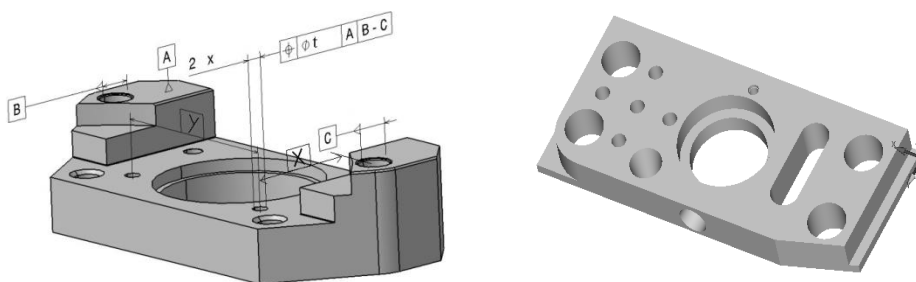
Κεφάλαιο 3

Κατηγοριοποίηση εξαρτημάτων σύμφωνα με τη γεωμετρική τους διαμόρφωση

Τα εξαρτήματα, αντικείμενα και κατασκευές μπορούν να διαχωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες με κριτήριο τη γεωμετρική τους μορφή, τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και τα μηχανολογικά τους χαρακτηριστικά:

3.1 Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας

Ως Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας ορίζονται αυτά που η μορφή τους καθορίζεται από συνδυασμό βασικών γεωμετρικών στοιχείων τα οποία περιγράφονται από απλές μαθηματικές εξισώσεις (γραμμή, κύκλος, επίπεδο, κύβος, κύλινδρος, σφαίρα, κώνος) και για τα οποία οι διαστάσεις, οι θέσεις, ο προσανατολισμός και γενικότερα οι σχέσεις τους στο χώρο καθορίζονται από σύνθετες γεωμετρικές συνθήκες και από απαιτήσεις υψηλής ακριβείας.

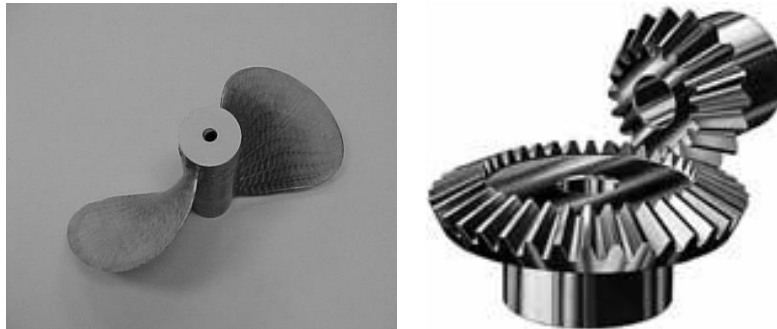


Εικόνα 3.1: Αντικείμενα συμβατικής γεωμετρίας

3.2 Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας

Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας είναι αυτά που η μορφή τους καθορίζεται επακριβώς με τη χρήση σύνθετων μαθηματικών σχέσεων και χρησιμοποιούνται για τον γεωμετρικό καθορισμό αντικειμένων, τυποποιημένων και μη, που είναι ευρύτατα

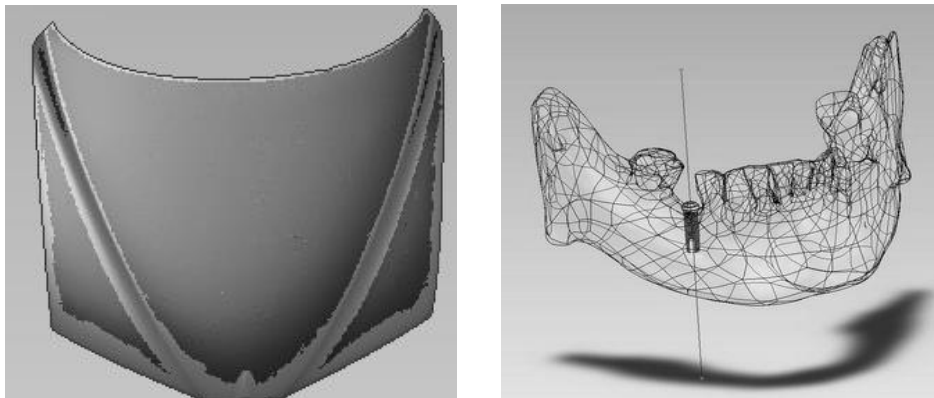
διαδεδομένα στις μηχανολογικές κατασκευές. Για παράδειγμα, η μορφή της εξειλιγμένης η οποία δίνει το προφίλ μιας παρειάς οδόντος σε έναν οδοντωτό τροχό ή η μορφή ενός πτερυγίου έλικας.



Εικόνα 3.2 Αντικείμενα περίπλοκης γεωμετρίας

3.3 Αντικείμενα ελεύθερης μορφής

Τα αντικείμενα που η επιφάνειες τους χαρακτηρίζονται από ελεύθερες μορφές γνωστές ως «γλυπτές» (sculptured) επιφάνειες. Οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν υψηλή γεωμετρική πολυπλοκότητα και προσεγγίζονται με πολυωνυμικές συναρτήσεις υψηλού βαθμού (καμπύλες NURBS, Bézier κ.λ.π.) και αντίστοιχες παραμετρικές επιφάνειες. Στο σχήμα δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιου είδους αντικειμένων που περιλαμβάνουν τόσο τεχνολογικές (εξάρτημα από διαμόρφωση ελάσματος) όσο και φυσικές επιφάνειες ελεύθερης μορφής (τμήμα της κάτω γνάθου ασθενούς).



Εικόνα 3.3: Αντικείμενα ελεύθερης μορφής

3.4 Υβριδικός Σχεδιασμός - Hybrid modeling

Ο διαχωρισμός των αντικειμένων στις τρεις παραπάνω βασικές κατηγορίες δεν αποκλείει βεβαίως τη συνύπαρξη στο ίδιο αντικείμενο στοιχείων ή τμημάτων του που ανήκουν το κάθε ένα σε ξεχωριστές κατηγορίες συνθέτοντας τελικά ένα αντικείμενο που εν μέρει ανήκει και στις τρεις κατηγορίες. Τέτοια αντικείμενα αποτελούν και την πλειοψηφία των μηχανολογικών και φυσικών αντικειμένων.

Η αδυναμία ανάπτυξης και βελτίωσης του αντίστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού μέσω των CAD αρχείων της προηγούμενης δεκαετίας ήταν η αφορμή για την εμφάνιση του

Hybrid Modeling (HD). Παρόλο που τα CAD μοντέλα καθορίζονταν από μία σειρά 2D και 3D αρχείων, δίνοντας στους σχεδιαστές ευελιξία κατά τον σχεδιασμό αλλά και τη δυνατότητα να πειραματιστούν με την μορφή του εικονικού αντικειμένου, σε περιπτώσεις σχεδίασης περίπλοκων αντικειμένων ο χρόνος σχεδίασης αυξανόταν δραματικά ενώ παράλληλα η ακρίβεια μειωνόταν, μετατρέποντας την διαδικασία σε αναποτελεσματική και ορισμένες φορές αδύνατη.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας έρχεται να δώσει λύσεις σε πολύπλοκες εφαρμογές ανάστροφου σχεδιασμού. Οι γεωμετρικές παράμετροι των αντικειμένων καθορίζονται πλήρως κατά την σάρωση τους από 3D σαρωτές και η χρήση τρισδιάστατων σχεδιαστικών λογισμικών πακέτων διευκολύνει τους σχεδιαστές στην κατασκευή επιφανειών έστω και αν το αντικείμενο έχει περίπλοκη μορφή.

Τυπικά Στάδια Hybrid Modeling:

- Σάρωση
- Επισκευή πλέγματος
- Δημιουργία καμπυλών και σημείων αναφοράς
- Δημιουργία επιφανειών
- Ένωση και κοπή επιφανειών
- Ανάλυση τελικού αποτελέσματος

Πλεονεκτήματα Hybrid modeling:

- Δημιουργία 3D-CAD μοντέλων και σχεδίων σε συντομότερο χρόνο. Σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνικές CAD, η υβριδική προσέγγιση μοντελοποίησης μπορεί να μειώσει σημαντικά την ποσότητα του χρόνου που απαιτείται για να αναπαραχθεί ψηφιακά ένα αντικείμενο. Ενδεικτικά, σε ορισμένες περιπτώσεις, η υβριδική προσέγγιση μοντελοποίησης μπορεί να ολοκληρωθεί μέσα σε λίγες ώρες.
- Οι γεωμετρικές παράμετροι υπολογίζονται από νέφη σημείων τα οποία περιέχουν εκατομμύρια σημεία δειγματοληψίας.
- Λαμβάνονται υπόψη όλες οι φυσικές και σχεδιαστικές παραμέτροι του προς σχεδιασμό αντικειμένου.
- Υψηλή ακρίβεια στην ανάλυση τελικών αποτελεσμάτων.

Η δυναμική που έχει επιφέρει ο υβριδικός σχεδιασμός στο τομέα του ΑΜΣ αποδεικνύεται από το γεγονός ότι μετά την εμφάνιση του, έχουν γίνει ραγδαίες αλλαγές στον τομέα και δεν υπήρξε κανένα πισωγύρισμα στις παλαιότερες τεχνικές παρόλο που η θεωρία και ο τρόπος σκέψης παραμένουν κοινά.

Κεφάλαιο 4

Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός εξαρτημάτων με επιφάνειες ελεύθερης μορφής

4.1 Αντίστροφος Μηχανολογικός Σχεδιασμός

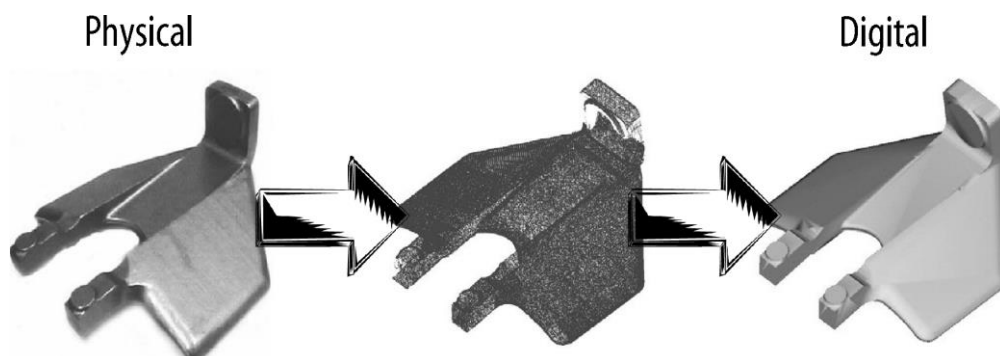
Ως Αντίστροφο Μηχανολογικό Σχεδιασμό (ΑΜΣ) ορίζουμε τη διαδικασία αναπαραγωγής ενός αντικειμένου λειτουργικά και διαστασιολογικά, με την εξέταση και ανάλυση υπάρχοντων εξαρτημάτων η οποία έχει στόχο την ανάπτυξη των τεχνικών δεδομένων που αφορούν στο σύνολο των φυσικών και υλικών του χαρακτηριστικών. Ο ΑΜΣ αποτελεί συνεπώς το κύριο τεχνολογικό εργαλείο για την αποτύπωση και τη ψηφιακή τρισδιάστατη αναπαράσταση φυσικών μορφών μαζί με το σύνολο των δεδομένων που θα επιτρέψουν την αναπαραγωγή, έλεγχο και ανασχεδιασμό των προϊόντων στα οποία αυτές ανήκουν.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές πως ο ΑΜΣ δεν περιορίζεται μόνο στο σχεδιασμό/μοντελοποίηση. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτόν δεν είναι απλά ένα αντίγραφο ενός φυσικού αντικειμένου, αλλά αφορά στο σύνολο των τεχνολογικών παραμέτρων που αυτό ενσωματώνει. Για το σκοπό αυτό, ο ΑΜΣ ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία απευθύνεται, περιλαμβάνει ένα αριθμό διαφορετικών τεχνολογιών και διακεκριμένων δραστηριοτήτων όπως π.χ. ψηφιακή αποτύπωση επιφανειών, μετρήσεις διαστάσεων, διαχείριση και μαθηματική επεξεργασία νέφους σημείων, μοντελοποίηση σε CAD περιβάλλον, διαπίστωση ιδιοτήτων υλικού κι επιφανειακών/θερμικών κατεργασιών, λειτουργική ανάλυση συναρμολογημένων συνόλων, διαστασιολογική και γεωμετρική ανάλυση των επί μέρους εξαρτημάτων κ.α

Τα πεδία εφαρμογής του ΑΜΣ προκύπτουν από πραγματικές ανάγκες, οι οποίες και αποτελούν αφετηρία στην έμπνευση και υλοποίηση του. Τέτοιες ανάγκες είναι:

- Μεταφορά και εξέλιξη κατασκευαστικών πληροφοριών από πειραματικά μοντέλα ή ανταγωνιστικά προϊόντα.
- Αναθεώρηση/τροποποίηση/βελτίωση υφιστάμενων κατασκευών λόγω αλλαγών των αρχικών απαιτήσεων/δεδομένων/προδιαγραφών τους.

- Αποτύπωση τροποποιήσεων/επεμβάσεων που προέκυψαν από λειτουργικές, πειραματικές, κ.α. δοκιμές, από φθορές και βλάβες κανονικής ή αντικανονικής χρήσης.
- Αποτύπωση χειροποίητων πρωτοτύπων μοντέλων.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων/επεμβάσεων που προέκυψαν κατά την παραγωγική διαδικασία π.χ. παραμορφώσεις λόγω συγκόλλησης.
- Αποτύπωση τροποποιήσεων που προέκυψαν μετά τη διαδικασία της συναρμολόγησης.
- Εφαρμογή τεχνολογιών CAD/CAM/CAE σε αντικείμενα πολιτιστικού ενδιαφέροντος, π.χ. αντίγραφα αρχαίων γλυπτών.
- Βιοϊατρικές εφαρμογές, π.χ. αποτύπωση ανθρώπινης γνάθου, αποτύπωση χαρακτηριστικών προσώπου για επιδιόρθωση παραμορφώσεων
- Κατασκευή ανταλλακτικών που δεν διατίθενται πλέον από τον αρχικό κατασκευαστή του μηχανήματος.
- Άμεση επείγουσα αντικατάσταση εξαρτήματος που έχει αστοχήσει, π.χ. βιομηχανική παραγωγή, πλοία κ.α.
- Άρση της αποκλειστικότητας από τον μοναδικό προμηθευτή.
- Ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος με βάση τη μακροπρόθεσμη χρήση του προϊόντος.
- Ανάλυση των καλών και κακών χαρακτηριστικών από προϊόντα ανταγωνιστικών εταιρειών.



Εικόνα 4.1: Μετάβαση από τη φυσική κατάσταση στη ψηφιακή

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να πραγματοποιηθεί στο θέμα της συμβολής του ΑΜΣ στην ανταγωνιστικότητα. Εταιρίες ή ακόμη και χώρες όπως η Ελλάδα, οι οποίες κατεξοχήν εισάγουν μηχανολογικό εξοπλισμό που θεωρείται συχνά από τον αρχικό κατασκευαστή παρωχημένος αλλά παραμένει σε χρήση πέραν του προβλεπόμενου ορίου διάρκειας ζωής του (π.χ βιομηχανικός εξοπλισμός, αμυντικά συστήματα κ.α.), έχουν τη δυνατότητα με την εφαρμογή του ΑΜΣ και την παράλληλη ανάπτυξη επιστημονικά συγκροτημένης μεθοδολογίας, να κατασκευάσουν το δικό τους σύγχρονο εξοπλισμό, αναπτύσσοντας τη δική τους τεχνολογία και τεχνογνωσία.

Ακόμη αξίζει να επισημανθεί πως στον αντίποδα των παραπάνω πεδίων εφαρμογής υφίστανται και ορισμένα ‘απαγορευμένα’ πεδία στα οποία ο ΑΜΣ δεν πρέπει να βρίσκει εφαρμογή. Οι περιπτώσεις αυτές οριοθετούνται τις περισσότερες φορές από κώδικες ηθικής που αναφέρονται στην προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας και του βιομηχανικού απορρήτου. Πέρα όμως από την ηθική διάσταση, ο ουσιαστικός καθορισμός των περιοχών αυτών προκύπτει από την εκάστοτε ισχύουσα εθνική και διεθνή νομοθεσία που αφορά στον τρόπο και τη διάρκεια της κατοχύρωσης δικαιωμάτων ευρεσιτεχνίας, πνευματικής ιδιοκτησίας κ.λ.π.

4.2 Στάδια Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού

Τα στάδια και οι επιμέρους φάσεις που είναι απαραίτητες κατά τον ΑΜΣ εξαρτώνται κυρίως από τις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Κάθε εφαρμογή έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και τις δικές της ιδιαιτερότητες γι' αυτό και πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά και με ιδιαίτερη προσοχή. Στη γενική περίπτωση όπου αντικείμενο του ΑΜΣ είναι ένα συναρμολογημένο σύνολο εξαρτημάτων, ενδεικτικά στάδια είναι τα εξής:

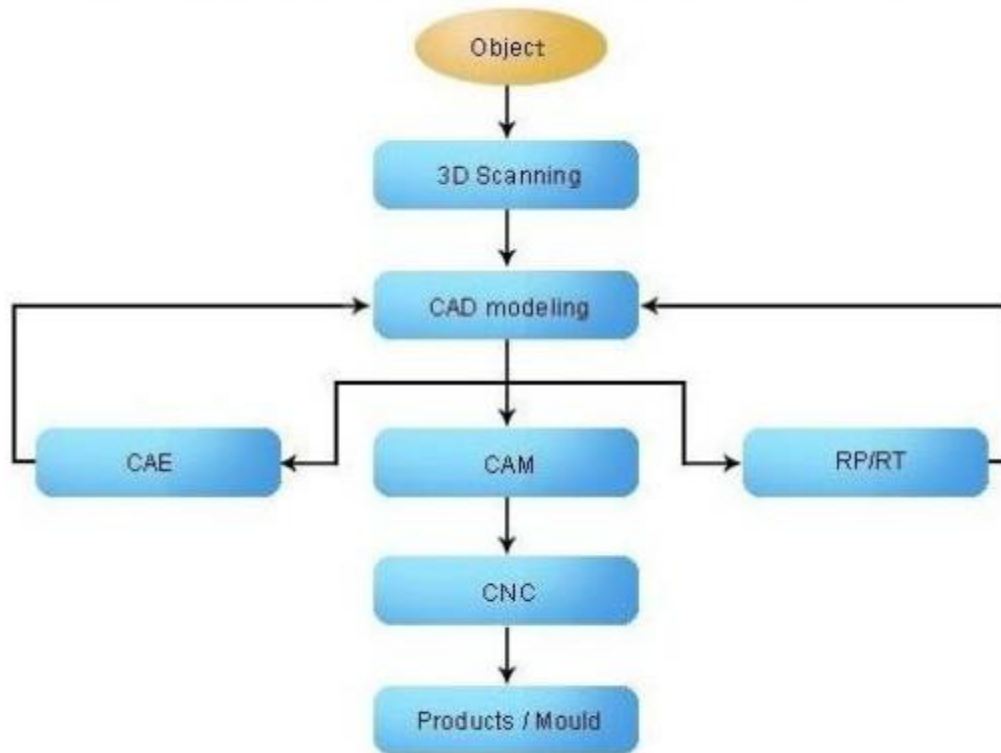
- 1. Λειτουργική / Οικονομικοτεχνική Ανάλυση:** Περιλαμβάνει τη συλλογή και την αξιολόγηση της διαθέσιμης τεκμηρίωσης και των πληροφοριών σχετικά με την κατασκευή που αποτελεί αντικείμενο ΑΜΣ, τον καθορισμό των ζητούμενων τεχνικών δεδομένων και των απαιτούμενων δοκιμών, την εκπόνηση χρονοδιαγράμματος, την αρχική εκτίμηση κόστους.
- 2. Διαδικασία Αποσυναρμολόγησης:** των επιμέρους υποσυνόλων κατά την οποία γίνεται έλεγχος, παρατήρηση, δοκιμές και αρχικές μετρήσεις παραμέτρων που αφορούν στη λειτουργία τους, αναγνώριση των εξαρτημάτων που τα αποτελούν, και καθορισμός των απαιτούμενων τεχνικών δεδομένων.
- 3. Σχέδιο διαχείρισης και καταγραφή:** για τον καθορισμό μιας ορθολογικής πορείας των αναγκαίων εργασιών, την αποφυγή επαναλήψεων, καθυστερήσεων, παραλήψεων, την επανεκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου κ.λ.π.
- 4. Ανάλυση εξαρτημάτων:** κατά την οποία μέσα από επιμέρους διαδικασίες όπως η διαστασιολογική και γεωμετρική ανάλυση των εξαρτημάτων, η ανάλυση υλικών, η αναγνώριση και ανάλυση ηλεκτρικών ή και ηλεκτρολογικών χαρακτηριστικών κ.α. καθορίζονται τα τεχνικά δεδομένα στα οποία βασίζονται οι επόμενες φάσεις.
- 5. Εκπόνηση Κατασκευαστικών σχεδίων:** στα οποία με βάση τα τεχνικά δεδομένα που προέκυψαν καθορίζεται το πλήρες σύνολο των παραμέτρων που απαιτούνται για την ανακατασκευή των εξαρτημάτων όπως π.χ. ανοχές και συναρμογές, υλικά, ποιότητα επιφανειών, επικαλύψεις κι επιφανειακές κατεργασίες, απαιτούμενοι έλεγχοι και δοκιμές κλπ. Στο στάδιο αυτό εντάσσεται ο ανασχεδιασμός και η ενδεχόμενη εισαγωγή βελτιώσεων ή αλλαγών στον αρχικό σχεδιασμό.
- 6. Ποιοτικός Έλεγχος:** ο οποίος αφορά στην πληρότητα και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα και τις απαιτήσεις των κατασκευαστικών σχεδίων του προηγούμενου σταδίου αλλά και στην κατασκευή πρωτοτύπων και τη διεξαγωγή σχετικών ελέγχων και δοκιμών.
- 7. Επισκόπηση / επανεξέταση της προτιθέμενης παραγωγής:** με στόχο την τελική εκτίμηση των οικονομικών μεγεθών και παραμέτρων της δοκιμαστικής παραγωγής, την αξιολόγηση προσφορών από υποψήφιους κατασκευαστές του αντικειμένου, τη λήψη αποφάσεων του τύπου «κατασκευή ι αγορά» κ.λ.π.
- 8. Δοκιμαστική Παραγωγή:** στην οποία συμπεριλαμβάνονται η κατασκευή, ο ποιοτικός έλεγχος των εξαρτημάτων, η συναρμολόγηση, ο έλεγχος και οι δοκιμές λειτουργίας των συναρμολογημένων συνόλων, ο έλεγχος της συμμόρφωσης τους με τις αρχικές απαιτήσεις και προδιαγραφές κ.λ.π.

9. **Οριστικοποίηση του συνόλου Τεχνικών Δεδομένων:** που αποτελεί το τελευταίο στάδιο και την κατάληξη της διαδικασίας του ΑΜΣ με την οριστική αποδοχή των εξαρτημάτων και των συναρμολογημένων συνόλων που προέκυψαν από τη δοκιμαστική παραγωγή.

4.3 Διάγραμμα Ροής Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού

Αρχικά εισάγονται έννοιες οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την εφαρμογή του ΑΜΣ στο σύγχρονο τεχνολογικό περιβάλλον και εν συνεχεία παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα ροής ΑΜΣ, στο οποίο γίνεται σαφής ο τρόπος με τον οποίο υλοποιούνται τα προαναφερθέντα στάδια με τη χρήση των σύγχρονων τεχνολογικών μέσων.

1. **Object:** Το προς ΑΜΣ αντικείμενο.
2. **3D Scanning:** Ψηφιακή αποτύπωση φυσικού αντικειμένου με στόχο τη συλλογή πληροφοριών, απαραίτητων για τη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου, σχετικών με το σχήμα και τη γεωμετρική μορφή του.
3. **CAD (Computer-Aided Design) modeling:** Μοντελοποίηση του αντικειμένου με τη βοήθεια υπολογιστή. Πραγματοποιείται συνήθως σε τυποποιημένα σχεδιαστικά πακέτα (π.χ. Solid-Works, Inventor, Pro Engineer, Catia κ.α.) αξιοποιώντας τις πληροφορίες που αντλήθηκαν από το 3D Scanning.
4. **CAE (Computer-Aided Engineering):** Μηχανολογικός σχεδιασμός εξ ολοκλήρου με τη βοήθεια υπολογιστή. Περιλαμβάνει την ανάλυση τάσεων και παραμορφώσεων, την κινηματική ανάλυση, τη θερμική ανάλυση, την υπολογιστική δυναμική των ρευστών (CFD Computational Fluid Dynamics), τη βελτιστοποίηση κ.α.
5. **RP/RT (Rapid Prototyping/Rapid Tooling):** Ταχεία προτυποποίηση (του προς δημιουργία αντικειμένου/καλουπιού). Αποτελεί την αυτόματη κατασκευή φυσικών τρισδιάστατων αντικειμένων με την τεχνολογία additive manufacturing (διαστρωματική/προσθετική παρασκευή) και υλοποιείται συνηθέστερα σε 3D Printers (τρειςδιάστατους εκτυπωτές).
6. **CAM (Computer-Aided Manufacturing):** Έλεγχος των εργαλειομηχανών και του συναφούς εξοπλισμού για την κατασκευή-επεξεργασία τεμαχίων με τη χρήση λογισμικού ηλεκτρονικών υπολογιστών.
7. **CNC (Computer Numerical Control):** Έλεγχος-Αυτοματοποίηση των κέντρων κατεργασιών με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.
8. **Product/Mould (Προϊόν/Καλούπι):** Παραγωγή του τελικού ανασχεδιασμένου προϊόντος ή καλουπιού, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία.



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα ροής ΑΜΣ

4.4 Κυριότερες Δυσκολίες στη Διεξαγωγή του Αντίστροφου Μηχανολογικού Σχεδιασμού

Παρόλο που η διαδικασία του ΑΜΣ έχει εξελιχτεί και βελτιωθεί σε μεγάλο βαθμό με το πέρασ των χρόνων και τη συναφή εξέλιξη μέσωσ, εργαλείων και τεχνικών του, στην πράξη εξακολουθούν να διαπιστώνονται ποικίλες τεχνικές δυσκολίες, κυριότερες εκ των οποίων είναι:

- Ψηφιακή αποτύπωση εσωτερικών τμημάτων αντικειμένου. Έστω και μετά την πλήρη αποσυναρμολόγηση, σε μεγάλο πλήθος εφαρμογών υπάρχουν δύσβατα εσωτερικά τμήματα τα οποία είναι μη προσεγγίσιμα κατά την ψηφιακή σάρωση.
- Η πολυπλοκότητα ή και το μέγεθος ενός τεμαχίου δημιουργεί την ανάγκη για περισσότερα από ένα νέφη σημείων που η «ευθυγράμμιση» τους (registration/alignment) εισάγει σε πολλές περιπτώσεις μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας.
- Τα μεγάλα νέφη σημείων εξακολουθούν να είναι δύσκολο να επεξεργαστούν από κοινούς συμβατικούς Η/Υ, απαιτώντας πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ.
- Για την αποτελεσματική διεξαγωγή της πλήρους διαδικασίας του ΑΜΣ απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός ο οποίος παραμένει ιδιαίτερα ακριβός, αλλά και εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό.
- Ζητήματα όπως ο καθορισμός των γεωμετρικών και διαστασιολογικών προδιαγραφών ακρίβειας με στόχο την πλήρη εναλλαξιμότητα, η αποτίμηση της φθοράς κατά τον ΑΜΣ κ.α. αποτελούν ασφαλώς τις αιτίες σημαντικών πρακτικών δυσκολιών και παραμένουν ανοιχτά πεδία έρευνας στον τομέα αυτό.

Κεφάλαιο 5

Έλεγχος προδιαγραφών ακρίβειας εξαρτημάτων με επιφάνειες ελεύθερης μορφής

5.1 Γεωμετρικές και Διαστασιολογικές Προδιαγραφές Ακρίβειας στις Μηχανολογικές Κατασκευές

Οι γεωμετρικές και διαστασιολογικές ανοχές (Γ&ΔΑ) είναι μια γλώσσα συμβόλων που διέπεται από αυστηρά θεσμοθετημένους κανόνες και χρησιμοποιείται για να καθορίζεται πλήρως το μέγεθος, το σχήμα, η μορφή, ο προσανατολισμός και η θέση όλων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του προς κατασκευή αντικειμένου. Μέσω των Γ&ΔΑ αντικατοπτρίζεται κατά κύριο λόγο η πραγματική σχέση και δυνατότητα συνδεσιμότητας μεταξύ τμημάτων που αποτελούν ζεύγος εξαρτημάτων που πρόκειται να συναρμολογηθούν. Μηχανολογικά σχέδια με κατάλληλο καθορισμό αλλά και ορθή σήμανση των γεωμετρικών ανοχών παρέχουν την δυνατότητα για μονοσήμαντη ερμηνεία και αποδοτική εφαρμογή των ανοχών και συναρμογών της κατασκευής. Το σύστημα των Γ&ΔΑ δημιουργήθηκε και εξελίχθηκε για να εξασφαλίσει την πλήρη εναλλαξιμότητα κατά τη συναρμολόγηση και κατ' επέκταση τη βελτίωση της ποιότητας και τη μείωση του κόστους κατασκευής. Αποτελεί ένα εργαλείο το οποίο όταν εφαρμόζεται σωστά εξασφαλίζει ότι κάθε μέρος ενός συναρμολογήματος θα συνδεθεί και θα λειτουργεί σωστά και σύμφωνα με τις προδιαγραφές σχεδιασμού του. Έτσι, μέσω των Γ&ΔΑ αντικατοπτρίζονται όλες οι μηχανολογικές απαιτήσεις του σχεδιασμού και εντοπίζονται όλα τα χαρακτηριστικά που ισχύουν στα στοιχεία αναφοράς (datum). Με αυτόν τον τρόπο, τα μηχανολογικά σχέδια με Γ&ΔΑ δεν σκιαγραφούν μόνο το μέγεθος και το σχήμα του τμήματος, αλλά υποδηλώνουν και τις σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών ανοχής.

5.1.1 Διαστασιολογικές Ανοχές – Το Σύστημα Ανοχών – Συναρμογών

Από τη συνεχή ανάπτυξη κι εξέλιξη στην μαζική βιομηχανική παραγωγή και τον συναφή διεθνή ανταγωνισμό που δημιουργήθηκε μεταξύ των προηγμένων βιομηχανικών κρατών στις αρχές του προηγούμενου αιώνα διαπιστώθηκε ότι:

- Η μαζική ή εν σειρά παραγωγή είναι απολύτως αναγκαία τόσο για την μείωση του κατασκευαστικού κόστους όσο και για την βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, λειτουργώντας παράλληλα θετικά στη ανταγωνιστικότητα.
- Η κατασκευή των προς συναρμολόγηση κομματιών είναι πρακτικά αδύνατο να πραγματοποιηθεί με «απόλυτη» - μαθηματική ακρίβεια, κυρίως λόγω σφαλμάτων των εργαλειομηχανών κατά την διαδικασία της κατεργασίας, διακύμανσης των περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, δονήσεις κ.α.), σφαλμάτων μετρήσεων από τα όργανα μέτρησης και την ανομοιογενή «απρόβλεπτη» συμπεριφορά των υλικών.
- Κάθε εξάρτημα πρέπει να είναι συναρμολογήσιμο, δηλαδή να μπορεί να συνδεθεί και να συνεργαστεί με άλλα κομμάτια έστω και αν κατασκευάζονται σε διαφορετικά εργοστάσια. Γι' αυτό το λόγο κατασκευάζονται και συναρμολογούνται με προκαθορισμένο βαθμό ελευθερίας ο οποίος καθορίζεται απόλυτα από τις Γ&ΔΑ.

Για την πλήρη αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων έχουν καθοριστεί σχετικοί κανονισμοί και έχουν κωδικοποιηθεί σε σειρές σχετικών προτύπων, π.χ. το πρότυπο ISO-286.

Toleranz DIN ISO 286 T2 Grenzmaß in µm										
Nennmaß Ø	H6	H7	H8	H11	F7	G6	G7	J7	K7	M7
< 3	+6 0	+10 0	+14 0	+60 0	+16 +6	+8 +2	+12 +2	+4 -6	0 -10	-2 -12
3 - 6	+8 0	+12 0	+18 0	+75 0	+22 +10	+12 +4	+16 +4	+6 -6	+3 -9	0 -12
6 - 10	+9 0	+15 0	+22 0	+90 0	+28 +13	+14 +4	+20 +5	+8 -7	+5 -10	0 -15
10 - 14	+11 0	+18 0	+27 0	+110 0	+34 +16	+17 +6	+24 +6	+10 -8	+6 -12	0 -18
14 - 18	+11 0	+18 0	+27 0	+110 0	+34 +16	+17 +6	+24 +6	+10 -8	+6 -12	0 -18
18 - 24	+13 0	+21 0	+33 0	+130 0	+41 +20	+20 +7	+28 +7	+12 -9	+6 -15	0 -21
Nennmaß Ø	N7	R7	S7	A11	C11	D10	E9	F8	C11	D10
< 3	-4 -14	-10 -20	-14 -24	+330 +270	+120 +60	+60 +20	+39 +14	+20 +6	+120 +60	+60 +20
3 - 6	-4 -16	-11 -23	-15 -27	+345 +270	+145 +70	+78 +30	+50 +20	+28 +10	+145 +70	+78 +30
6 - 10	-4 -19	-13 -28	-17 -32	+370 +280	+170 +80	+98 +40	+61 +25	+35 +13	+170 +80	+98 +40
10 - 14	-5 -23	-16 -34	-21 -39	+400 +290	+205 +95	+120 +50	+75 +32	+43 +16	+205 +95	+120 +50
14 - 18	-5 -23	-16 -34	-21 -39	+400 +290	+205 +95	+120 +50	+75 +32	+43 +16	+205 +95	+120 +50
18 - 24	-7 -28	-20 -41	-27 -48	+430 +300	+240 +110	+149 +65	+92 +40	+53 +20	+240 +110	+149 +65

Πίνακας 5.1: Πεδία ανοχών κατά ISO-286

5.1.2 Γεωμετρικές Ανοχές – Τύποι

Οι γεωμετρικές ανοχές καθορίζουν τις αρχές και τις μεθόδους ανοχής για τον έλεγχο της γεωμετρικής μορφής και των χαρακτηριστικών της. Χωρίζονται σε 4 διαφορετικούς τύπους ανοχών ανάλογα με τη χρήση τους.

- **Ανοχές Μορφής (Form):** χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του σχήματος και της μορφής ενός αντικειμένου και αφορούν ειδικότερα στην ευθύτητα, επιπεδότητα,

κυκλικότητα και κυλινδρικήτητα. Οι ανοχές μορφής δεν σχετίζονται με στοιχεία αναφοράς (datum).

- Ανοχές Προσανατολισμού (Orientation):** με τις οποίες ελέγχονται τα παράλληλα και κάθετα στοιχεία και όλες τις άλλες γωνιακές τους σχέσεις. Μια ανοχή προσανατολισμού καθορίζει ένα από τα εξής:
 - (α) ζώνη ανοχής που ορίζεται από δύο παράλληλα επίπεδα σε καθορισμένη γωνία.
 - (β) ζώνη ανοχής που ορίζεται από δύο παράλληλες γραμμές σε καθορισμένη γωνία.
 - (γ) μία κυλινδρική ζώνη ανοχής σε καθορισμένη γωνία.
- Ανοχές Θέσης (Location):** καθορίζουν τις αρχές ανοχής της θέσης. Περιλαμβάνονται θέση, ομοκεντρικότητα και συμμετρία τα οποία χρησιμοποιούνται για να ελεγχθούν:
 - (α) απόσταση από το κέντρο μεταξύ των χαρακτηριστικών μεγεθών όπως οπές, σχισμές, εξέχων όγκος
 - (β) η θέση των χαρακτηριστικών μεγεθών
 - (γ) ομοαξονικότητα των χαρακτηριστικών μεγεθών
 - (δ) ομοκεντρικότητα ή συμμετρία των χαρακτηριστικών μεγεθών
- Ανοχές Προφίλ (Profile):** μία ανοχή προφίλ περιγράφει μια επιφάνεια ή ένα σχήμα που αποτελείται από ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά ή ένα διαστάσιμο στοιχείο με ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά. Οι ανοχές προφίλ χρησιμοποιούνται για να καθοριστούν ζώνες ανοχής για τον έλεγχο της μορφής ή συνδυασμούς ανοχής από το μέγεθος, τη μορφή, τον προσανατολισμό και τη θέση ενός χαρακτηριστικού. Ανάλογα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού καθορίζεται και το αν οι ζώνες ανοχής προφίλ αφορούν στοιχεία αναφοράς ή όχι.
- Ανοχές Απόκλισης εκ' Περιστροφής (Runout):** είναι ανοχή που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λειτουργικής σχέσης ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών σε ένα άξονα αναφοράς. Οι τύποι των χαρακτηριστικών που ελέγχονται από τις ανοχές αυτές περιλαμβάνουν εκείνες τις επιφάνειες που κατασκευάζονται γύρω από έναν άξονα αναφοράς και εκείνων που κατασκευάζονται με ορθή γωνία προς τον άξονα αναφοράς.

APPLICATION	TYPE OF TOLERANCE	CHARACTERISTIC	SYMBOL
INDIVIDUAL FEATURES	FORM	STRAIGHTNESS	
		FLATNESS	
		CIRCULARITY	
		CYLINDRICITY	
INDIVIDUAL OR RELATED FEATURES	PROFILE	PROFILE OF A LINE	
		PROFILE OF A SURFACE	
RELATED FEATURES	ORIENTATION	ANGULARITY	
		PERPENDICULARITY	
		PARALLELISM	
	LOCATION	POSITION **	
		CONCENTRICITY	
		SYMMETRY	
	RUNOUT	CIRCULAR RUNOUT	
		TOTAL RUNOUT	

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά σύμβολα ανοχών

5.1.3 Βασικές Αρχές Γεωμετρικών και Διαστασιολογικών Ανοχών

Αρχή του Πλήρους Υλικού - Maximum Material Condition (ΑΠΥ - MMC) οι διαστάσεις του γεωμετρικά ιδανικού ενεργού περιγράμματος συναρμογής ενός κομματιού υπολογίζεται από τις διαστάσεις του πλήρους υλικού των επιμέρους στοιχείων του με συνυπολογισμό και των επιτρεπόμενων γεωμετρικών αποκλίσεων στις μέγιστες διαστάσεις. Η εφαρμογή της ΑΠΥ προσφέρει στην παραγωγή το πλεονέκτημα του συνδυασμού των ανοχών διαστάσεων και γεωμετρίας μεταξύ τους κατά τον τεχνικά και κοστολογικά επωφελέστερο τρόπο. Κατά αντίστροφο τρόπο η **Αρχή του Ελάχιστου Υλικού - Least Material Condition (ΑΕΥ - LMC)** ορίζει τις ελάχιστες διαστάσεις του υλικού εντός των προβλεπόμενων ορίων του.

Αρχή της Περιβάλλουσας Επιφάνειας (ΑΠΕ) επιβάλλει τον περιορισμό των επιτρεπόμενων γεωμετρικών αποκλίσεων μέσα στη γεωμετρικά ιδανική επιφάνεια υλικού που καθορίζει η διάσταση πλήρους υλικού (ISO 8015). Κύριο πλεονέκτημα της ΑΠΕ είναι η απλότητα της, στην εξασφάλιση ενός συνοπτικού ελέγχου διαστασιολογικών και γεωμετρικών αποκλίσεων.

Rule #1 - Envelope Principle: Η envelope principle λέει ότι όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θα πρέπει να οριοθετούνται εντός των ανωτάτων ποσών που αντιστοιχούν στον ιδανικό σχεδιασμό τους και να ισχύει η ΑΠΥ. Το αποτελεσματικό πραγματικό μέγεθος ενός απλού γεωμετρικού χαρακτηριστικού δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή της ΑΠΥ. Αυτό σημαίνει ότι το μέγεθος ενός γεωμετρικού χαρακτηριστικού με την ΑΠΥ, δεν πρέπει να έχει καμία απόκλιση μορφή. Σε περίπτωση που το μέγεθος του είναι μικρότερο από ότι η ΑΠΥ αλλά όχι μικρότερο από ότι η ΑΕΥ, οι αποκλίσεις μορφής είναι αποδεκτές.

- Η ΑΠΕ θέτει όρια μόνο σε αποκλίσεις μορφή όπως επιπεδότητα, κυκλικότητα, ευθύτητα και αποκλίσεις κυλινδρικότητας. Οι αποκλίσεις θέσης δεν είναι περιορισμένες από την εν λόγω αρχή. Η μόνη εξαίρεση είναι οι αποκλίσεις παραλληλισμού που περιορίζεται εξ ορισμού από την ΑΠΕ.
- Η ΑΠΕ ισχύει για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που είναι άμεσες εσωτερικές ή εξωτερικές διαστάσεις και για τις οποίες έχουν καθοριστεί ανοχές, αν και μπορούν να λαμβάνουν τη μορφή των στοιχείων της γενικής ανοχής.

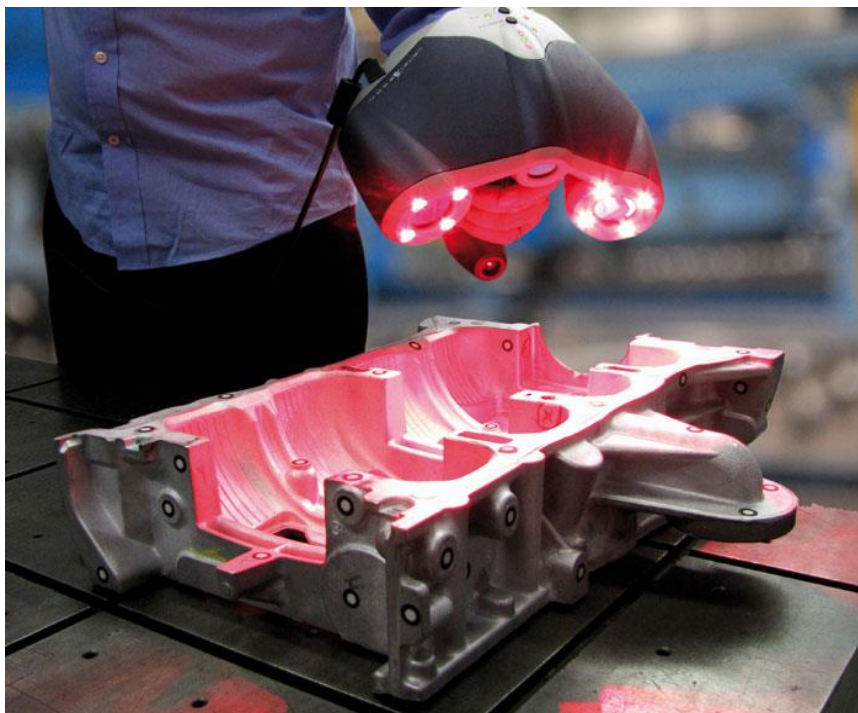
5.2 Σύγχρονες τεχνολογίες και μέσα ποιοτικού ελέγχου

Laser scanner – Σαρωτές λέιζερ: Ο ποιοτικός έλεγχος με τη χρήση laser scanner είναι ένας γρήγορος τρόπος για να ελεγχθούν και να συγκριθούν φυσικά αντικείμενα με την μετατροπή τους σε ψηφιακά μοντέλα. Οι σαρωτές λέιζερ σε αντίθεση με τις πιο παραδοσιακές τεχνικές ελέγχου, π.χ. μηχανές μέτρησης συντεταγμένων (CMM), δεν απαιτεί την επαφή με το προς επεξεργασία αντικείμενο. Σάρωση με λέιζερ είναι η ιδανική επιλογή για την καταγραφή των δεδομένων σε πολύπλοκες και ελεύθερες επιφάνειες για σκοπούς επιθεώρησης, με υψηλή ανάλυση και λεπτομέρεια καθώς και τον εντοπισμό και επιδιόρθωση κατασκευαστικών ελαττωμάτων.



Εικόνα 5.1: 3D Laser Scanner σε διαδικασία σάρωσης

Optical Scanners – Οπτικοί σαρωτές: αποτελούν μια εύκολη και υψηλής ακρίβειας λύση σάρωσης και ψηφιοποίησης αντικειμένων. Συνήθως πρόκειται για βραχίονα χειρός ο οποίος δίνει στον χειριστή του πλήρη ελευθερία κινήσεων και ευελιξία κατά την διάρκεια της σάρωσης. Οι κάμερες-αισθητήρες σε συνδυασμό με τα ειδικά συστήματα φωτισμού που διαθέτουν μετατρέπουν τις αντανάκλασεις σε ψηφιακά μοντέλα σε ελάχιστο χρόνο και με αρκετά μεγάλη ακρίβεια.

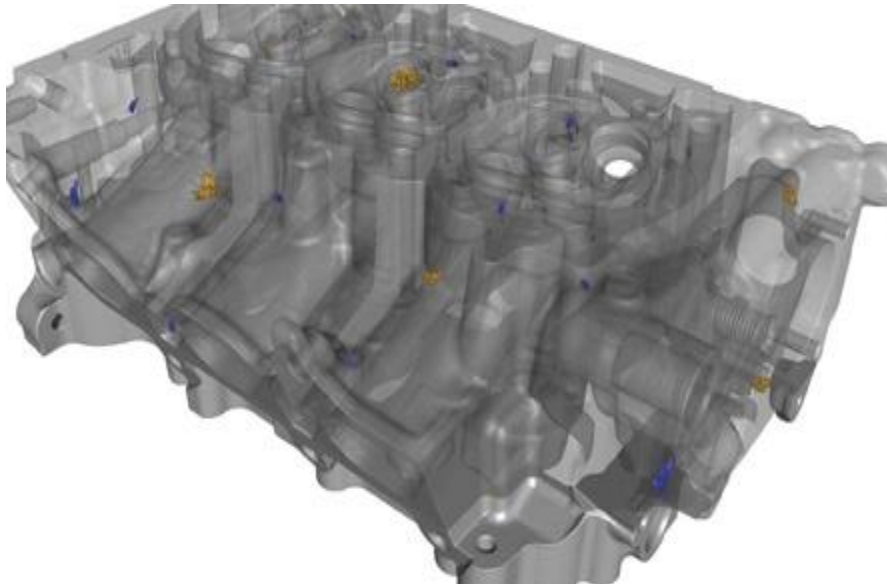


Εικόνα 5.2: Optical Scanner σε διαδικασία σάρωσης

Photogrammetry - Φωτογραμμετρία: είναι η μέθοδος του καθορισμού των γεωμετρικών ιδιοτήτων των αντικειμένων μέσω φωτογραφικών εικόνων. Το τελικό αποτέλεσμα της φωτογραμμετρίας είναι συνήθως ένας χάρτης, σχέδιο, μέτρηση ή ένα 3D μοντέλο κάποιου

πραγματικού αντικειμένου. Με βάση τη θέση της κάμερας η φωτογραμμετρία χωρίζεται στην Aerial Photogrammetry (Αεροφωτογραφία) και Close-range Photogrammetry. Στην πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται ευρύτατα στις χαρτογραφήσεις και η κάμερα είναι τοποθετημένη σε αεροπλάνο ή δορυφόρο ενώ στη δεύτερη, αντικείμενο και κάμερα έχουν πολύ μικρή απόσταση. Πρόκειται για αρκετά ακριβής μέθοδος αν και δεν εφαρμόζεται πολύ συχνά σε προβλήματα ανάστροφου μηχανολογικού σχεδιασμού.

Industrial computed tomography (ICT) - Βιομηχανική τομογραφία (BT): είναι μια διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιούνται ακτίνες-X για την παραγωγή τρισδιάστατων αναπαραστάσεων των αντικειμένων. Βασικό πλεονέκτημα της είναι ότι μπορεί να αναπαράγει αντικείμενα τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά γι' αυτό και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας για την εσωτερική επιθεώρηση των εξαρτημάτων όπως η ανίχνευση βλαβών, η ανάλυση αστοχιών, η μετρολογία, η ανάλυση συναρμολόγησης και βεβαίως ο ΑΜΣ. Τα CAD αρχεία που δημιουργούνται είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές ΑΜΣ και ανάλυσης των γεωμετρικών και διαστασιολογικών ανοχών των εξαρτημάτων.



Εικόνα 5.3: Μορφή ψηφιοποιημένου αρχείου μέσω βιομηχανικής τομογραφίας

Coordinate-measuring machine (CMM) – Μηχανές μέτρησης συντεταγμένων: είναι συσκευές μέτρησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου. Ο αισθητήρας επαφής που διαθέτουν διατρέχει την επιφάνεια του προς μέτρηση κομματιού λαμβάνοντας μετρήσεις σε 3 έως 6 βαθμούς ελευθερίας. Η σχετική μετατόπιση της βάσης του αισθητήρα ως προς το σύστημα αναφοράς, το οποίο προκαθορίζεται, αντιστοιχεί σε μεταβολή τάσης. Τα δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται για να προκύψει τελικά η γραφική απεικόνιση των σημείων, οπότε αποτυπώνεται η μορφή του μετρούμενου τεμαχίου. Επίσης με τη χρήση του λογισμικού μπορεί να γίνει ανάλυση και επεξεργασία των συντεταγμένων, ώστε να εξαχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η χρήση των CMM γίνεται είτε χειροκίνητα είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Εικόνα 5.4: Μηχάνη Μέτρησης Συντεταγμένων

Κεφάλαιο 6

Παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού

6.1 Γενική παρουσίαση του περιβάλλοντος CATIA PLM

Το CATIA είναι μια πλήρης πλατφόρμα 3D CAD/CAM/CAE ανεπτυγμένη από την γαλλική εταιρεία Dassault Systemes. Πρωτοεμφανίστηκε το 1977 από την κατασκευαστική εταιρεία αεροσκαφών Dassault Aviation ως CATI (*Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive*) και μετονομάστηκε σε CATIA το 1981 όταν την ανάπτυξη και πώληση του λογισμικού ανέλαβε η IBM και η πρώτη εφαρμογή του λογισμικού σε Η/Υ έγινε το 1988 με το CATIA V3. Με το πέρας των χρόνων υπήρξε συνεχής εξέλιξη του λογισμικού καταλήγοντας στη σημερινή έκδοση CATIA V6 R2012.

Η Dassault Systemes μέσω του CATIA έχει καταφέρει να προσφέρει ολοκληρωμένες λύσεις τόσο στη μοντελοποίηση όσο και στην προσομοίωση συστημάτων και προϊόντων. Το λογισμικό είναι σχεδιασμένο για να χρησιμοποιείται από μηχανικούς, σχεδιαστές και τεχνικούς σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Ο βιομηχανικός σχεδιασμός διευκολύνεται σημαντικά, είτε με αφετηρία τα σκαριφήματα δύο διαστάσεων είτε μέσω του εξαρχής τρισδιάστατου σχεδιασμού (μοντελοποίηση), καθώς δίνει στον χειριστή ευελιξία και ελευθερία κατά τον σχεδιασμό όπως επίσης και ταχύτητα.

Το λογισμικό πακέτο CATIA υποστηρίζει πλήρως πολλαπλά στάδια στην ανάπτυξη ενός προϊόντος, το σχεδιασμό (CAD), την κατεργασία (CAM) και τη μηχανική (CAE). Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να συνδυάζει παράλληλα κλάδους μηχανικής όπως σχεδιασμό, μηχανολογία, ηλεκτρολογία, αρχιτεκτονική συστημάτων, επιλογή πρώτων υλών και ανάπτυξη συστημάτων μηχανικής.

Ειδικότερα, όσον αφορά τον ΑΜΣ, τα εργαλεία του CATIA είναι ιδιαίτερα ισχυρά προσδίδοντας στο τελικό αποτέλεσμα μεγάλη ακρίβεια. Μπορεί να μετατρέψει φυσικά αντικείμενα σε ψηφιακά και επιπρόσθετα να αναλυθούν και να εξελιχθούν προτού καταλήξουν στη παραγωγική διαδικασία.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των δυνατοτήτων του CATIA είναι ότι μία πλειάδα από κατασκευαστικές εταιρείες παγκόσμιας εμβέλειας το χρησιμοποιούν καθημερινά για να σχεδιάσουν τα προϊόντα τους. Συγκεκριμένα, αεροναυπηγικές εταιρείες όπως Boeing, Airbus, Bell Helicopter, ναυπηγικές όπως GB Electric Boat, Newport News Shipbuilding, Beneteau Group καθώς επίσης και οι κορυφαίες αυτοκινητοβιομηχανίες ανά τον κόσμο όπως BMW, Porsche, Audi, Volkswagen, Honda, Jaguar Land Rover, Bentley Motors, Volvo είναι μερικές από τις εταιρείες που αναπτύσσουν τα προϊόντα τους μέσω του λογισμικού CATIA.

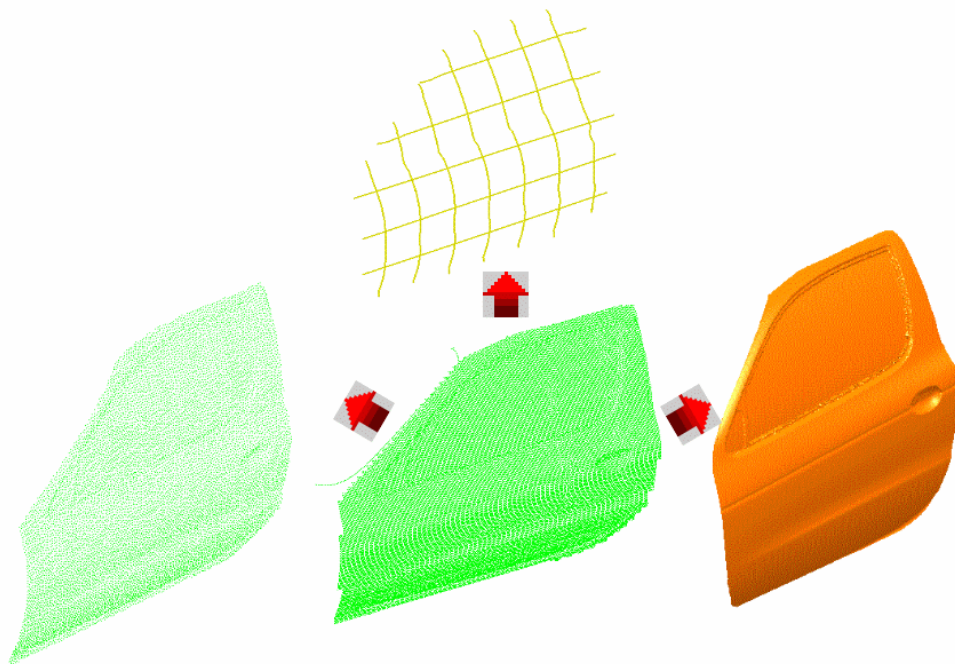
6.2 Παρουσίαση των CATIA workbenches που χρησιμοποιήθηκαν στη ΔΕ

6.2.1 Digitized Shape Editor (DSE)

Το Digitized Shape Editor είναι μια εφαρμογή που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή και επεξεργασία ψηφιοποιημένων νεφών σημείων. Τα νέφη σημείων μπορούν στη συνέχεια να τύχουν περαιτέρω επεξεργασίας στο workbench Quick Surface Reconstruction και να εξαχθούν σε διάφορες άλλες μορφές.

Μερικές βασικές εντολές που μπορεί να εκτελέσει ο χρήστης με την βοήθεια του workbench DSE είναι:

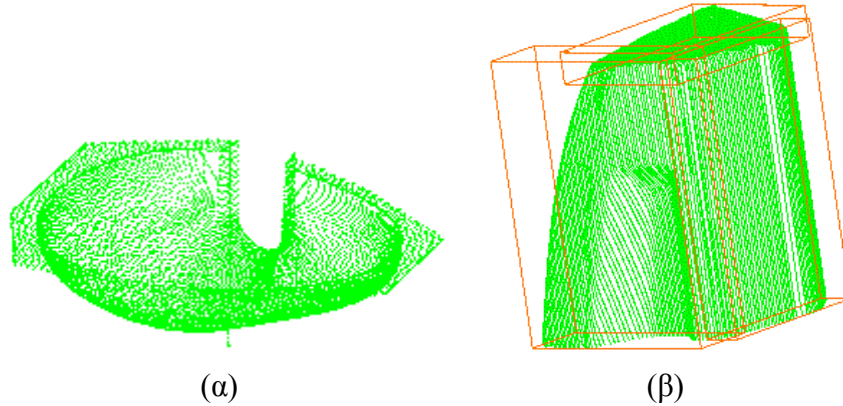
- Εξασφαλίζει γρήγορη επεξεργασία του νέφους – αν και αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αρκετά εκατομμύρια σημεία – όπως ενεργοποίηση, φιλτράρισμα, αφαίρεση και πρόσθεση σημείων κ.α.
- Κάνει εύκολους τους χειρισμούς των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν νέφος σημείων (σημεία, πλέγματα, σαρώσεις)
- Παρέχει λειτουργίες για την συγχώνευση και την ευθυγράμμιση δύο ή περισσότερων νεφών.
- Παρέχει εργαλεία για την ανάλυση του νέφους με οπτική βοήθεια και στατιστικά δεδομένα.
- Διατηρεί ακέραια την αρχιτεκτονική των προς επεξεργασία αντικειμένων
- Παρέχει tessellations να χρησιμοποιηθούν απευθείας με άλλες εφαρμογές ή για την απεικόνιση.
- Εξάγει τα μοντέλα που δημιουργούνται σε διάφορες μορφές αρχείων



Εικόνα 6.1: Workbench DSE (πραγματικό αντικείμενο – νέφος σημείων – πλέγμα)

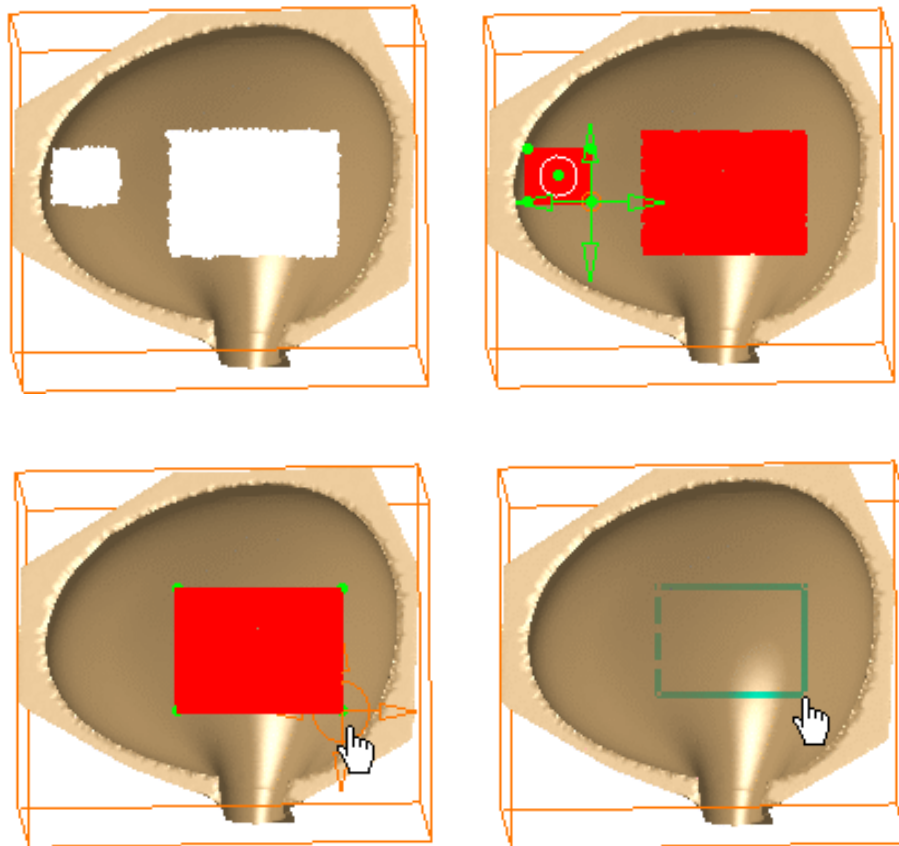
Παρακάτω επεξηγούνται καταρχήν οι κύριες εντολές/δυνατότητες του εν λόγω workbench.

- **Import:** Η εντολή επιτρέπει την εισαγωγή του νέφους σημείων σε μορφή ψηφιοποιημένου αρχείου (IGES 106 format) που πήραμε από το 3D scanner, στον εργασιακό περιβάλλον του CATIA. Μπορούμε να εισάγουμε ένα ή και περισσότερα αρχεία.



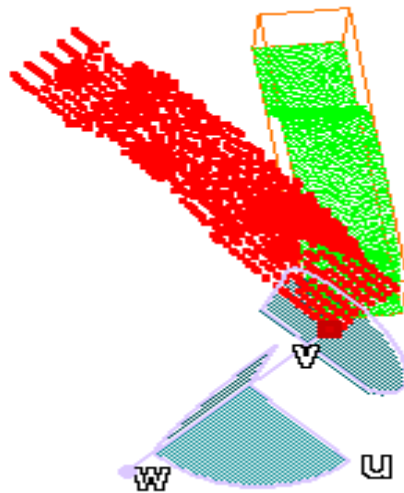
Εικόνα 6.2: (α) Τυπική μορφή νέφους σημείων (β) Εισαγωγή τριών νεφών σημείων

- **Activate:** Ενεργοποιεί το νέφος σημείων ή συγκεκριμένο μέρος του που επιθυμούμε να δουλέψουμε. Το νέφος σημείων προκύπτει από 3D scanner με το οποίο σαρώσαμε το αντικείμενο που θα σχεδιάσουμε. Υπάρχει η επιλογή εμφάνισης του νέφους σε polyline και σημείων ανάλογα με την προτίμηση του χρήστη. Στην ουσία οι δύο αυτές επιλογές δεν ίδιες απλά ο χρήστης επιλέγει τι θέλει να βλέπει.



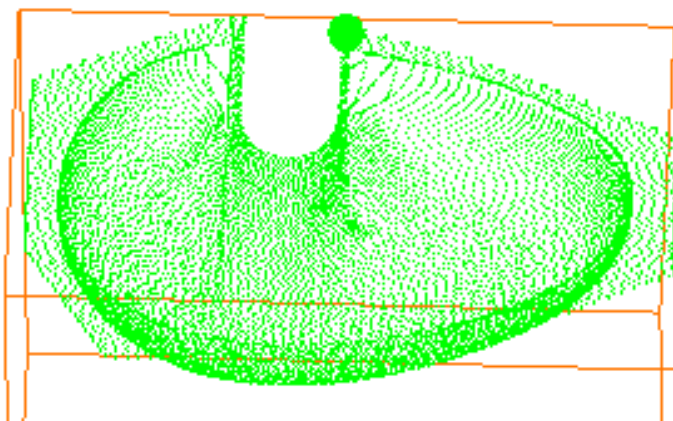
Εικόνα 6.3: Επιλογή και ενεργοποίηση ενός τμήματος του αντικειμένου

- **Align:** η εντολή Align χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση δύο ή και περισσότερων νέφων σημείων. Η ευθυγράμμιση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους μεταξύ των οποίων ευθυγράμμιση με την βοήθεια της πυξίδας, ευθυγράμμιση με χρήση σταθερών σημείων, ευθυγράμμιση με τη βοήθεια γεωμετρικών σχημάτων, ευθυγράμμιση με αντιστοίχιση σημείων (best fit) κ.α. Η όλη διαδικασία είναι ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα. Κύριο μειονέκτημα της είναι ότι ποτέ δεν γνωρίζουμε εάν τα νέφη έχουν ταιριάζει πλήρως ακόμη και μετά την εφαρμογή των εντολών. Γι αυτό το λόγο ο χειριστής χρειάζεται εμπειρία και υπομονή για να πετύχει όσο το δυνατό καλύτερη ευθυγράμμιση.

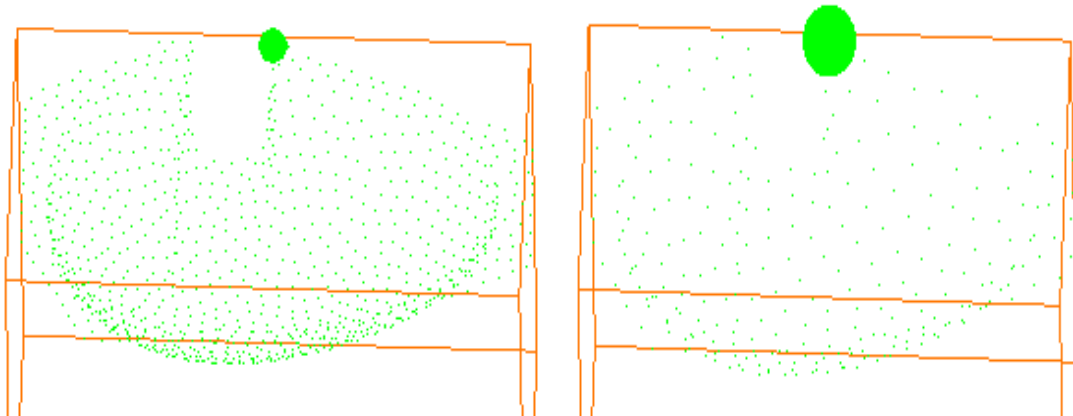


Εικόνα 6.4: Ευθυγράμμιση δύο νέφων σημείων με τη βοήθεια πυξίδας

- **Filter:** Κατά τη σάρωση του αντικειμένου μας παίρνουμε ένα πολύ μεγάλο αριθμό σημείων. Φιλτράροντας τα σημεία του νέφους παραμένει ένα μέρος αυτών χωρίς να επηρεάζεται το αρχικό σχήμα του νέφους καθώς το φιλτράρισμα γίνεται ομοιόμορφα. Επίσης, ο χειρισμός ενός πολύ μεγάλου νέφους σημείων μπορεί να προκαλέσει τεχνικές δυσκολίες στους απλούς συμβατούς ηλεκτρονικού υπολογιστές, συνεπώς το φιλτράρισμα ίσως είναι αναγκαστική επιλογή για τον χρήστη. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα φιλτραρισμένα σημεία δεν διαγράφονται εντελώς αλλά απενεργοποιούνται (hide) και μπορούν να τα ενεργοποιηθούν ξανά αν το θελήσουμε.



(α)



(β)

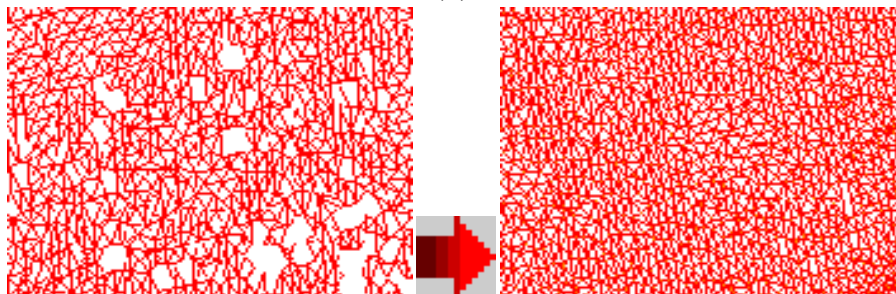
(γ)

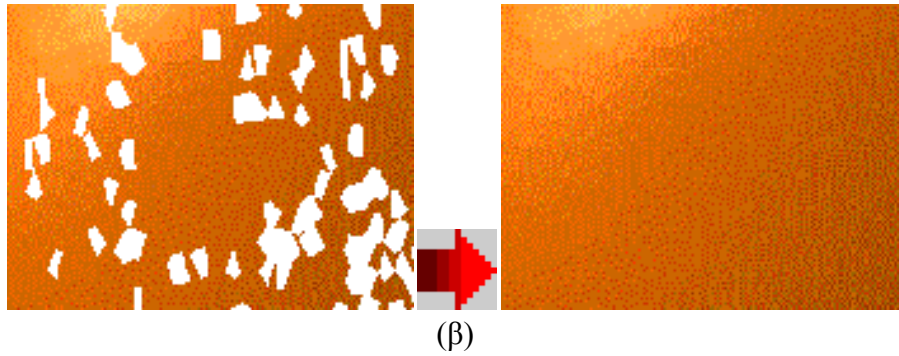
Εικόνα 6.5: Απεικόνιση νέφους σημείων σε διάφορες τιμές φιλτραρίσματος
 (α) 14335 σημεία - 100% (β) Homogeneous Radius: 4.78 - 986 σημεία - 6.88%
 (γ) Homogeneous Radius: 9.56 - 284 σημεία - 1.98%

- Mesh Creator:** Μέσω αυτής της εντολής δημιουργείτε το πλέγμα. Κύρια παράμετρο που εξαρτάται από το χρήστη είναι το *neighborhood* το οποίο αντιπροσωπεύει το μέγιστο μήκος άκρης των τριγώνων που θα εμφανιστούν μετά τη δημιουργία του πλέγματος. Επίσης, ανάλογα με την μορφή και την τραχύτητα του αντικειμένου, ο χρήστης πρέπει να διαλέξει μεταξύ *smooth* και *flat* εμφάνισης των τριγώνων.



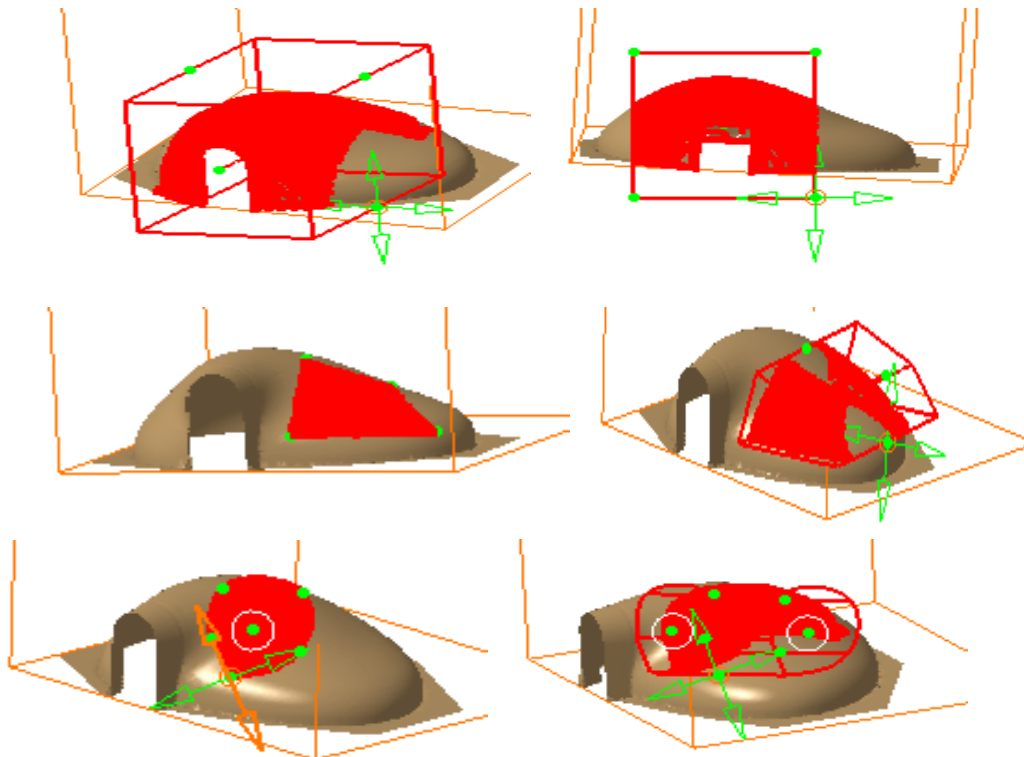
(α)





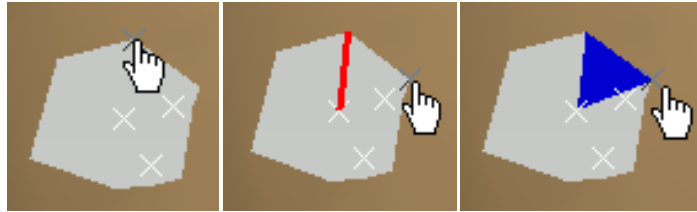
Εικόνα 6.6: (α) Τυπική μορφή πλέγματος (β) Μήκος άκρης τριγώνων με μικρό και μεγάλο neighborhood

- Remove:** Αφαιρεί τα στοιχεία τα οποία είναι αχρείαστα στην συνέχεια της διαδικασίας. Συνήθως πρόκειται για πλέγμα που έχει δημιουργηθεί λόγω των παραμέτρων που δώσαμε κατά την δημιουργία του πλέγματος ή λόγω κακής σάρωσης. Η εντολή αυτή δίνει την ευχέρεια να την χρησιμοποιήσουμε σε οποιαδήποτε στιγμή το θελήσουμε.

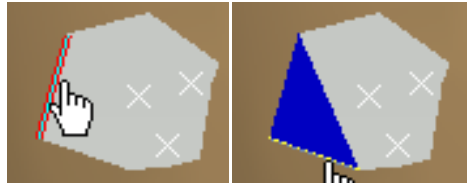


Εικόνα 6.7: Επιλογή τμήματος για διαγραφή (Rectangular – Polygonal – Spline)

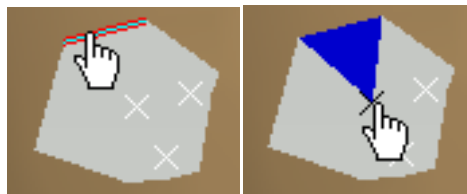
- Interactive triangle creation/ Remove elements:** δίνει τη δυνατότητα να προστεθούν τρίγωνα στο πλέγμα ή να αφαιρεθούν. Στη ουσία ο χρήστης αφαιρεί τρίγωνα από το ήδη υπάρχον πλέγμα ή προσθέτει τρίγωνα ενώνοντας σημεία που παραμένουν ανεκμετάλλευτα.



Ένωση τριών σημείων



Ένωση δύο γειτονικών ακρών και ενός σημείου

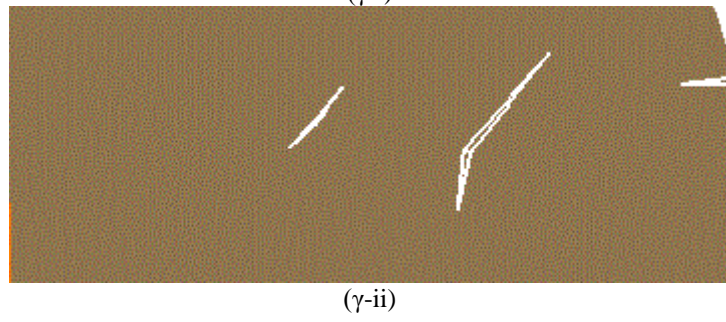
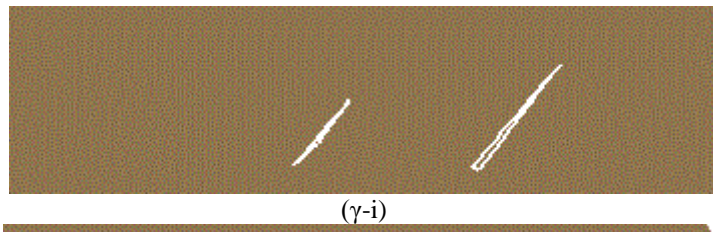
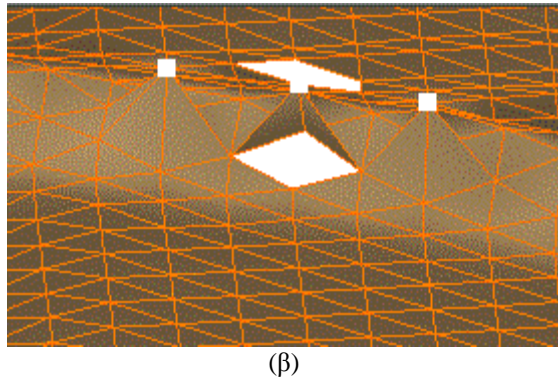
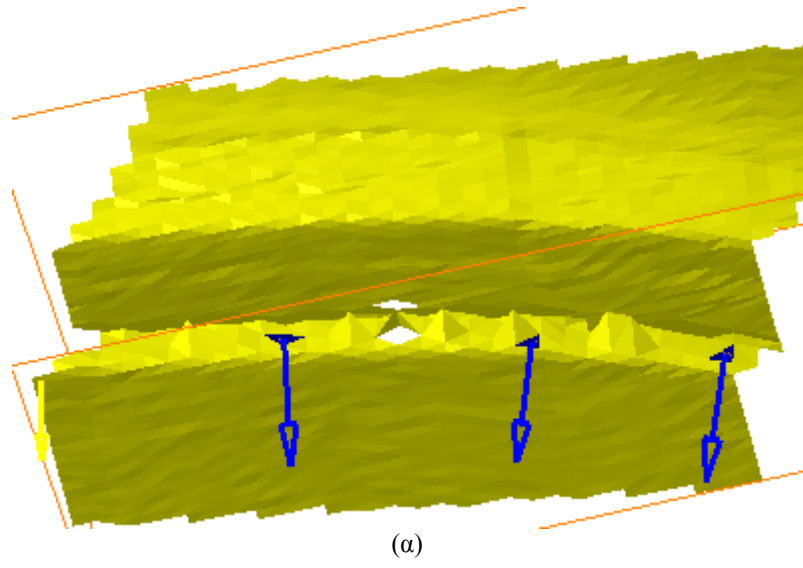


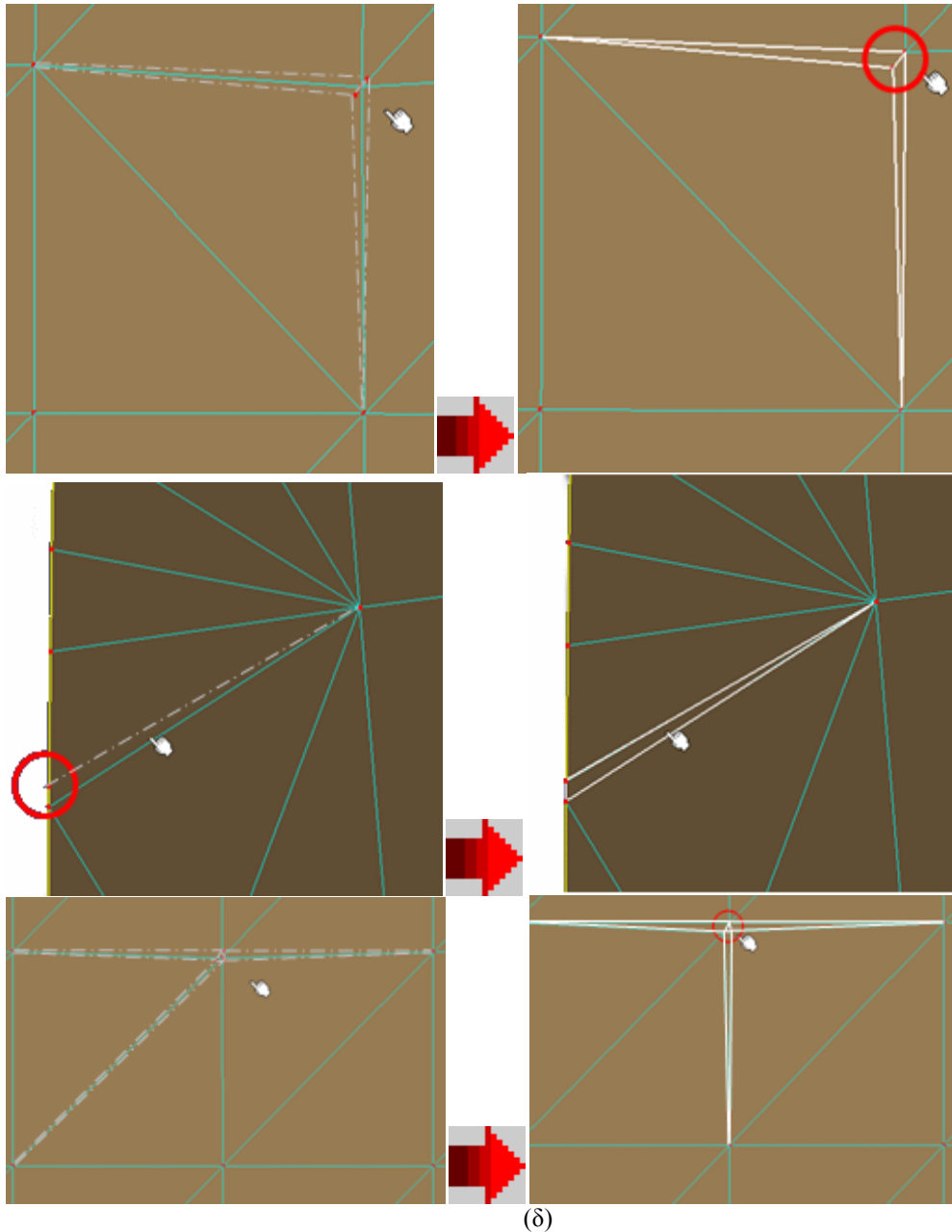
Ένωση μίας άκρης και ενός σημείου

Εικόνα 6.8: Τρόποι πρόσθεσης τριγώνων στο πλέγματος

- **Mesh Cleaner:** Αναφέρεται σε σημεία του πλέγματος τα οποία εμφανίζουν ορισμένα ελαττώματα όπως:
 - Corrupted triangles (κατεστραμμένα τρίγωνα)
 - Duplicated triangles (διπλά τρίγωνα)
 - Inconsistent orientation (ασυνεπής προσανατολισμό)
 - Non manifold edges (μη πολλαπλές άκρες)
 - Non manifold vertices (μη πολλαπλές κορυφές)
 - Long Edges (άκρες με μεγάλο μήκος)
 - Small angles (μικρές γωνίες)

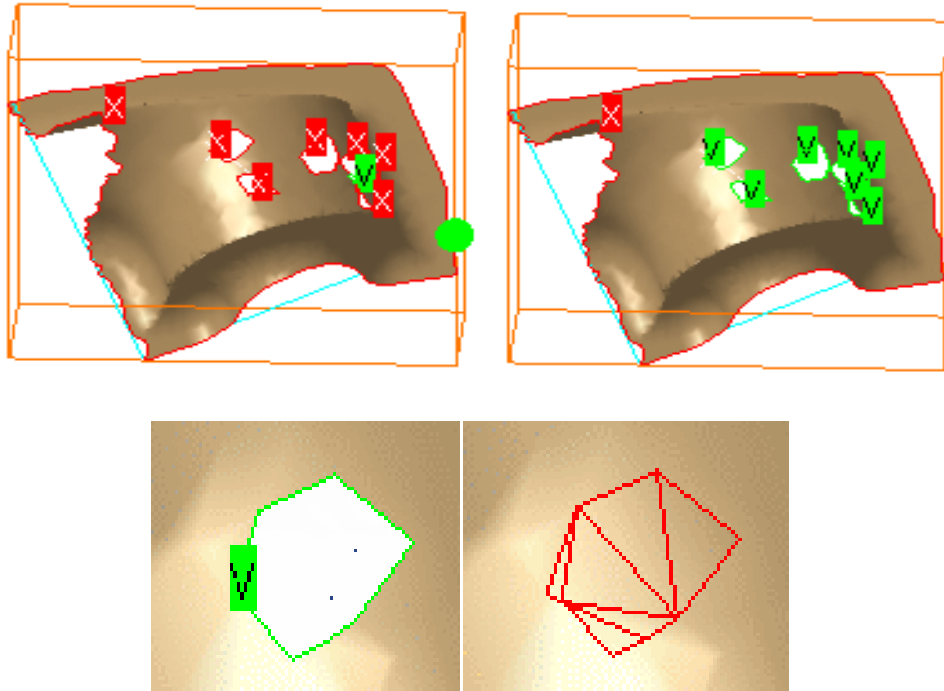
Ενεργοποιώντας την εντολή εντοπίζονται αυτόματα όλα τα ελαττώματα που έχουν δημιουργηθεί κατά την κατασκευή του πλέγματος. Είναι ένας εύκολος τρόπος να ελέγξουμε την ποιότητα του πλέγματος και να την βελτιώσουμε. Αν και η διόρθωση εναπόκειται στην κρίση του χρήστη καλό είναι να γίνεται άμεσα ούτως ώστε να μην επηρεάζονται αρνητικά οι επόμενες ενέργειες που θα γίνουν στην επεξεργασία του πλέγματος.





Εικόνα 6.9: (α) Τρίγωνα με ασυνεπή προσανατολισμό (β) Εμφάνιση μη πολλαπλών κορυφών (γ) Εμφάνιση τριγώνων με γωνία μικρότερη των (i) 6 μοιρών (ii) 8 μοιρών (δ) Διπλά τρίγωνα πριν και μετά τη διόρθωση

- Fill Edges:** Με αυτή την εντολή κλείνουν οι τρύπες που υπάρχουν στο πλέγμα είτε γιατί η σάρωση σε μερικές περιοχές του αντικειμένου δεν έγινε σωστά είτε γιατί υπήρξε ανάγκη αφαίρεσης μέρους του πλέγματος. Αφού καθοριστεί το μέγιστο μήκος πλευράς τριγώνων που θα σχηματιστούν και το πρόγραμμα αναγνωρίζει αυτόματα ποιές τρύπες μπορούν να κλείσουν και ποιες όχι. Έστω και αν το μήκος που δίνουμε είναι μικρό υπάρχει η δυνατότητα να κλείσει η τρύπα διότι τα σημεία στο συγκεκριμένο σημείο παραμένουν ενεργά και λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία επούλωσης του πλέγματος.



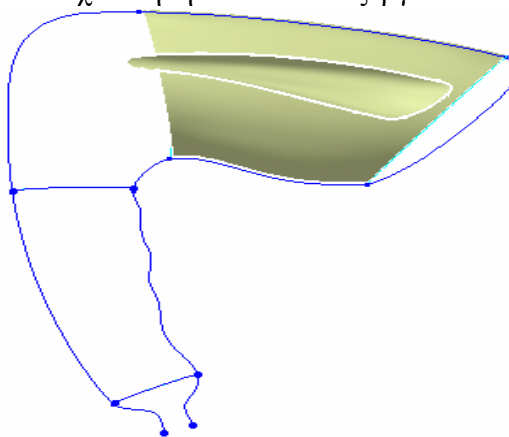
Εικόνα 6.10: Εμφάνιση κενών τμημάτων στο πλέγμα και επούλωση τους

Export: Εντολή για εξαγωγή των στοιχείων από το πρόγραμμα. Η εξαγωγή μπορεί να γίνει στις παρακάτω μορφές:

- ASCII RGB
- ASCII User Format
- ASCII Free
- Cgo
- STL

6.2.2 Quick Surface Reconstruction (QSR)

Το workbench Quick Surface Reconstruction δημιουργεί εύκολα και γρήγορα επιφάνειες από ψηφιοποιημένα στοιχεία που έχουν ήδη υποστεί επεξεργασία στο DSE.

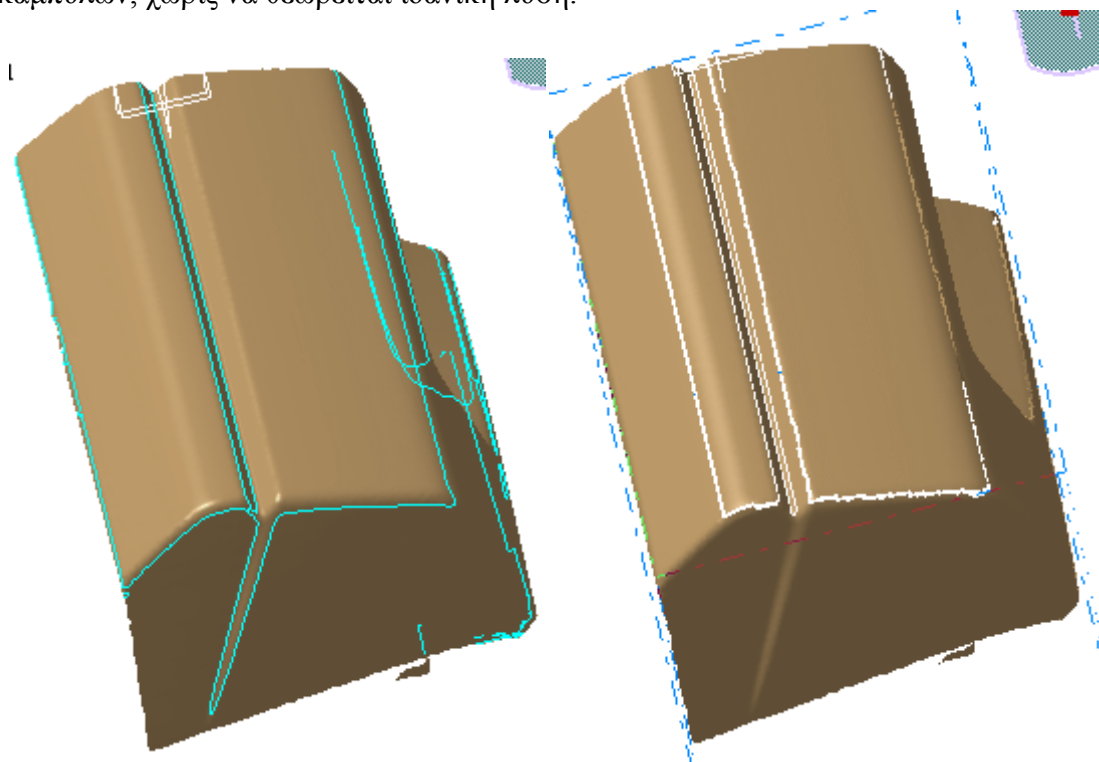


Εικόνα 6.11: Workbench QSR (Κατασκευή καμπυλών και επιφανειών)

- Προσφέρει γρήγορη κατασκευή επιφανειών ανάλογα με το είδος του σχήματος του νέφους
- Οργανικά σχήματα, δηλαδή ελεύθερες επιφάνειες μορφής, χωρίς χαρακτηριστικά όπως κύλινδρους, fillets, planes, κ.λπ.
- Μηχανικά σχήματα όπως, planes, κύλινδρος, σφαίρα, κώνος

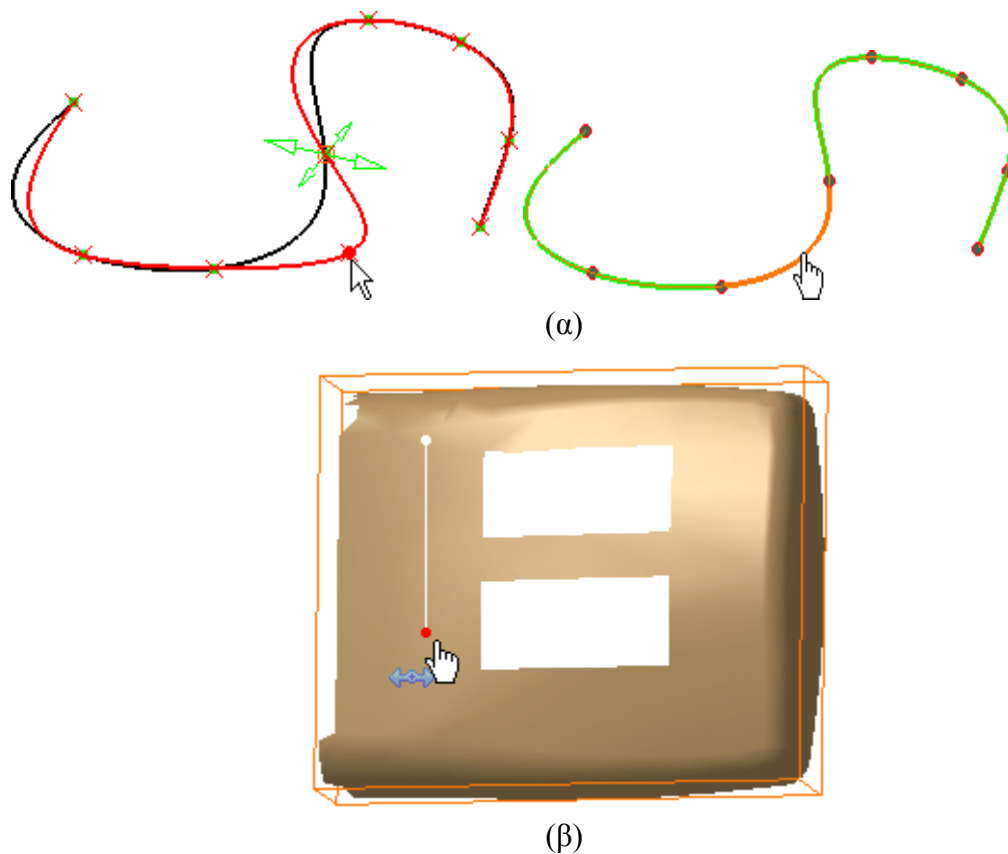
Επίσης, χάρη στα εργαλεία του QSR μπορούμε να αναλύσουμε την καμπυλότητα των συνόρων και των καμπυλών καθώς επίσης και να δημιουργήσουμε mesh segmentations στις επιφάνειες. Πρόκειται για ένα workbench άκρως βοηθητικό τόσο στην ανάλυση των καμπυλών όσο και στην κατασκευή των επιφανειών. Μερικές πολύ βασικές εντολές του QSR επεξηγούνται περισσότερο πιο κάτω.

- **Segmentation by slope:** Η εντολή εμφανίζει γραμμές στο αναλυμένο πλέγμα όπου η απόκλιση από την κατεύθυνση κλίσης αντιστοιχεί στην τιμή γωνίας που καθορίζει ο ίδιος ο χρήστης. Οι γραμμές στο στοιχείο σχηματίζονται ανάλογα με το μήκος των ακτινών και τις ακτίνες καμπυλότητας τους. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης έχει μία πρώτη άποψη για το πως πρέπει να διαχωρίσει το πλέγμα σε τμήματα έτσι ώστε αργότερα να είναι πιο εύκολη η κατασκευή των καμπύλων στο πλέγμα. Η εντολή ουσιαστικά δεν επιφέρει οποιαδήποτε αλλαγή στα στοιχεία αλλά δίνει μια πρώτη εκτίμηση στον σχηματισμό των καμπυλών, χωρίς να θεωρείται ιδανική λύση.



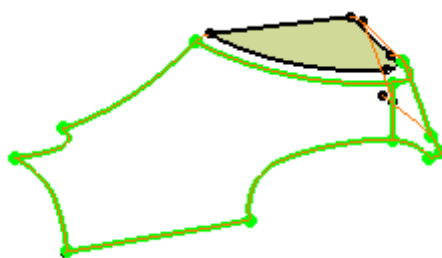
Εικόνα 6.12: Segmentation by slope σε μικρή και μεγάλη γωνία

- **3D curves/ Curves on mesh:** Μέσω της εντολής σχεδιάζονται οι καμπύλες στο πλέγμα χωρίζοντας το σε τμήματα. Η σχεδίαση των καμπυλών στα σωστά σημεία και τμήματα έχει τεράστια σημασία ούτως ώστε αργότερα οι επιφάνειες που θα δημιουργηθούν να είναι αρμονικά συνδεδεμένες μεταξύ τους και να εφάπτονται όσο το δυνατό περισσότερο στο πλέγμα προσδίδοντας του μεγαλύτερη ακρίβεια.



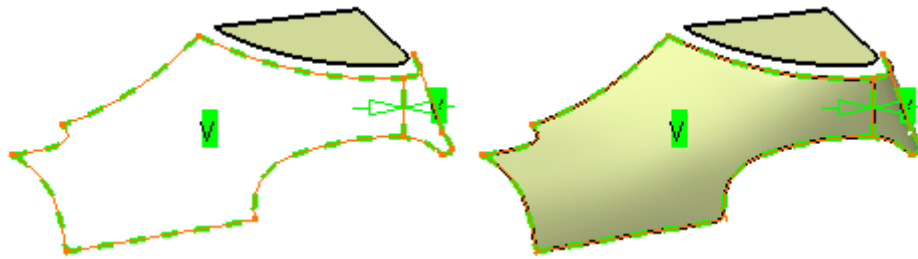
Εικόνα 6.13: (α) 3D καμπύλες (β) Καμπύλες στο πλέγμα

- **Network of curves:** Δημιουργείται ένα δίκτυο από καμπύλες επιλέγοντας τις επιθυμητές καμπύλες. Ουσιαστικά μετατρέπονται όλες τις καμπύλες σε μία. Η εντολή αυτή έχει άμεσο αποτέλεσμα στην δημιουργία των επιφανειών καθώς η επιφάνεια που θα δημιουργηθεί είναι μία και ενιαία. Επιπρόσθετα, με τη χρήση της εντολής εξοικονομείται αρκετό χρόνο.



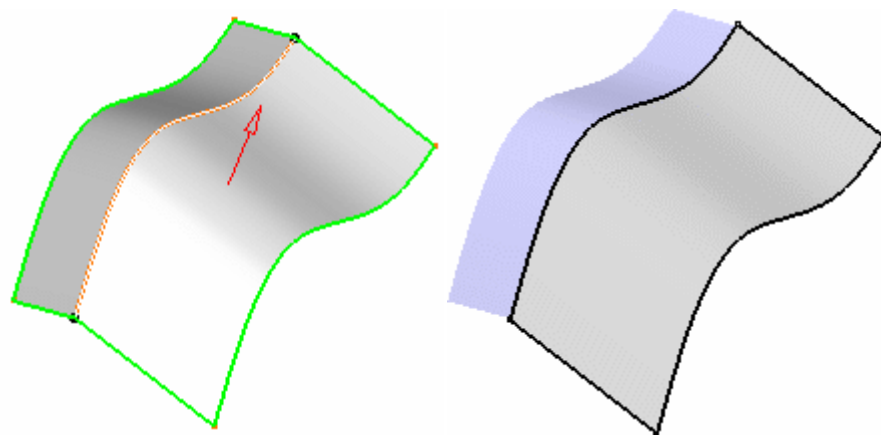
Εικόνα 6.14: Εμφάνιση δικτύου καμπυλών

- **Network of surfaces/Creating surfaces by Powerfit:** Δημιουργεί την επιφάνεια με βάση το network of curves. Πρόκειται για εντολή που εκτελείται αυτόματα από το πρόγραμμα και το μόνο που πρέπει να ρυθμίσει ο χρήστης είναι εάν η κάθε καμπύλη ορίζει ένα σημείο ή μία εφαπτομένη.

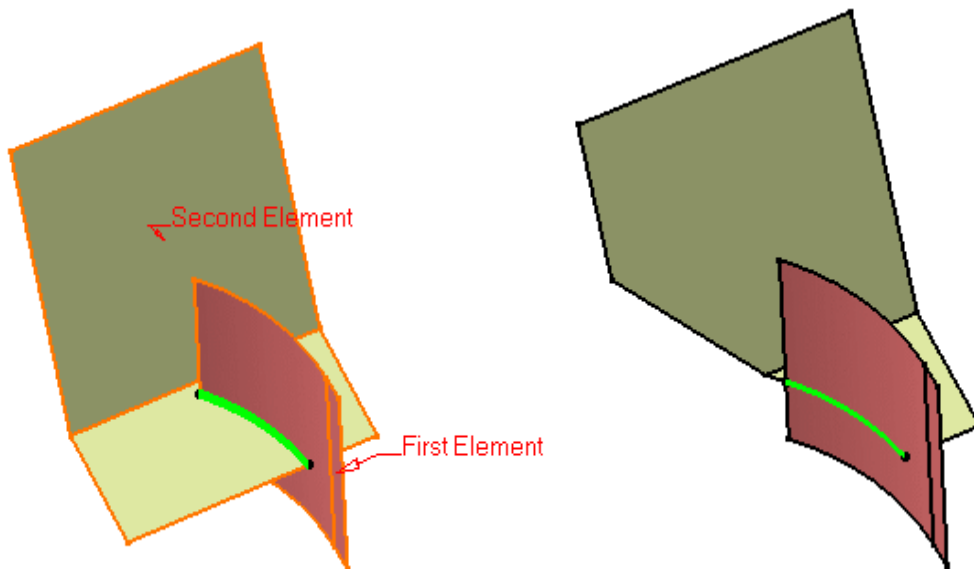


Εικόνα 6.15: Δημιουργία επιφάνεια μέσω δικτύου καμπυλών

- **Join surfaces – Split surfaces:** Με την χρήση των δύο αυτών εντολών μπορούμε να ενώσουμε δύο ή και περισσότερες διαφορετικές επιφάνειες ή να τις διαχωρίσουμε. Επιπρόσθετα μας δίνετε η δυνατότητα να διαγράψουμε επιφάνειες ανάλογα με τη γεωμετρική μορφή μιας άλλης επιφάνειας.



(α)



(β)

Εικόνα 6.16: (α) Ένωση δύο επιφανειών (β) Διαγραφή μέρους επιφάνειας

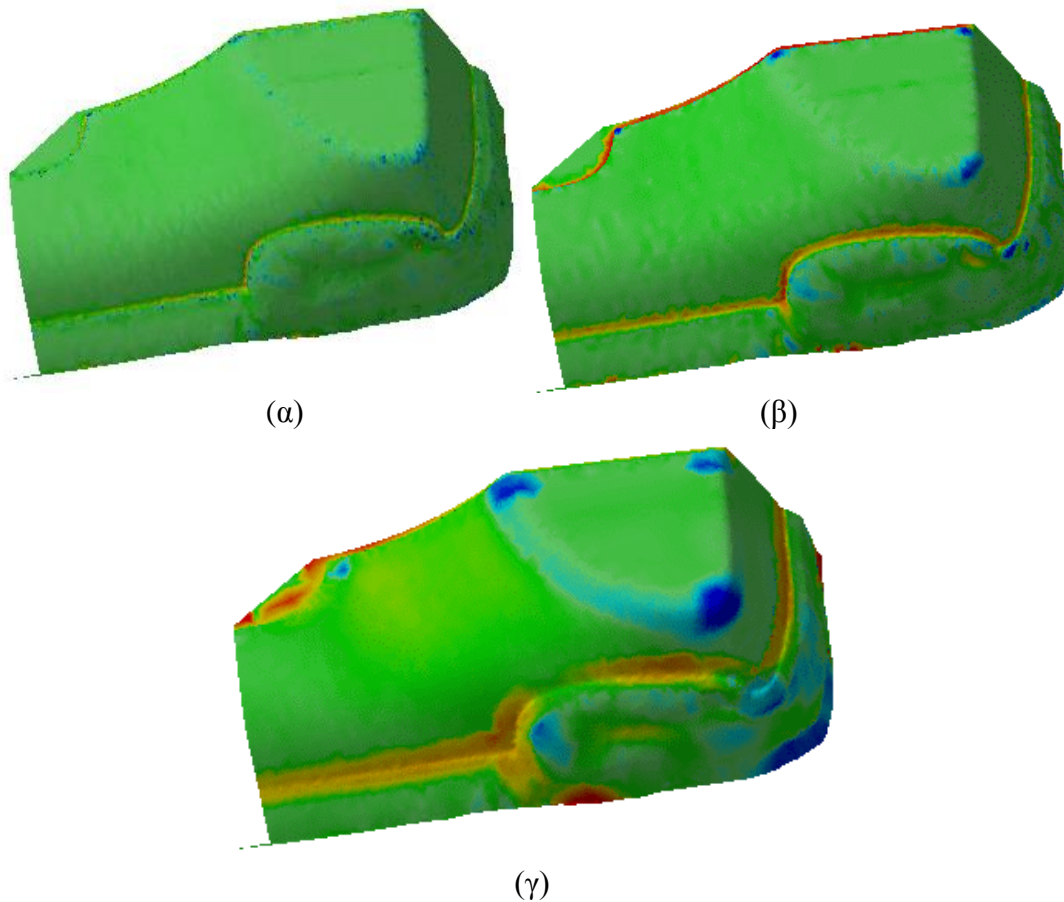
- **Automatic surfaces:** Η εντολή αυτή δημιουργεί αυτόματα επιφάνειες μέσω του πλέγματος. Πρόκειται για εντολή που βρίσκεται σε πρόωρο στάδιο ανάπτυξης της και συνεπώς είναι παραγωγική σε απλές μορφές πλέγματος. Αναμένεται με μεγάλο

ενδιαφέρον η εξέλιξη της τα επόμενα χρόνια καθώς η αυτόματη κατασκευή των επιφανειών θα είναι ένα πολύ βοηθητικό εργαλείο, ιδιαίτερα σε σημεία του πλέγματος τα οποία είναι δύσκολο να επεξεργαστούν.



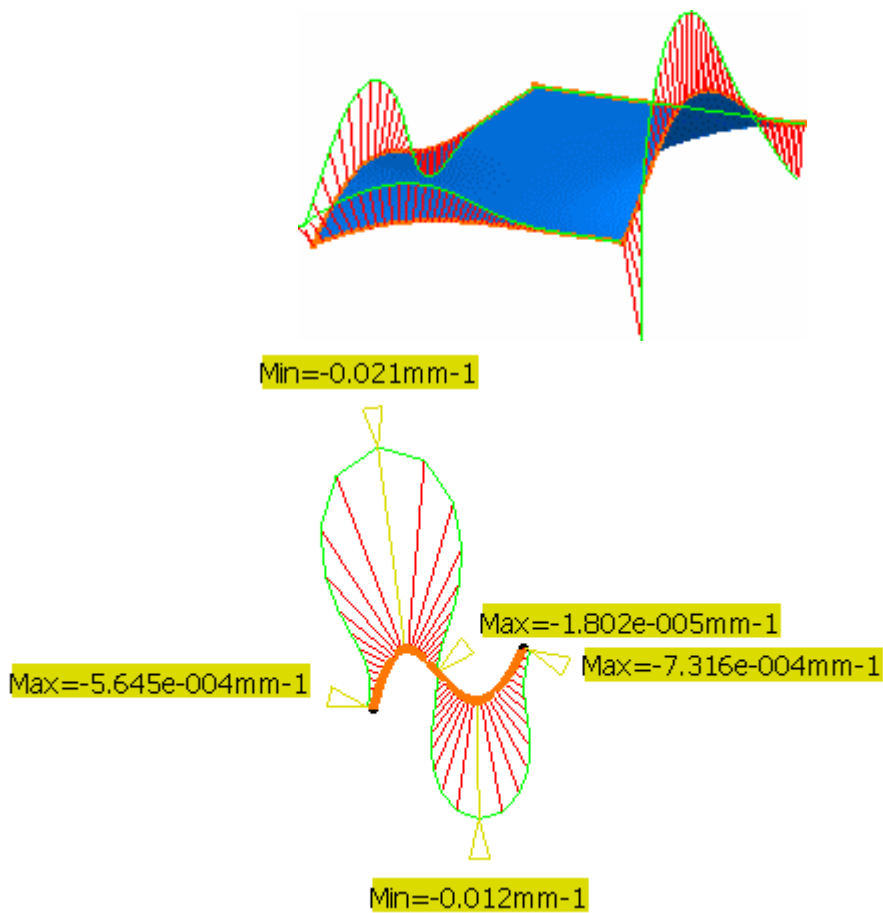
Εικόνα 6.17: Δημιουργία επιφάνειας μέσω εντολής Automatic surfaces

- **Curvature mapping:** Χαρτογραφείται η καμπυλότητα του πλέγματος. Υπάρχουν πέντε καμπυλότητες: Μέγιστη, Ελάχιστη, Μέση, Gaussian και Απόλυτη.



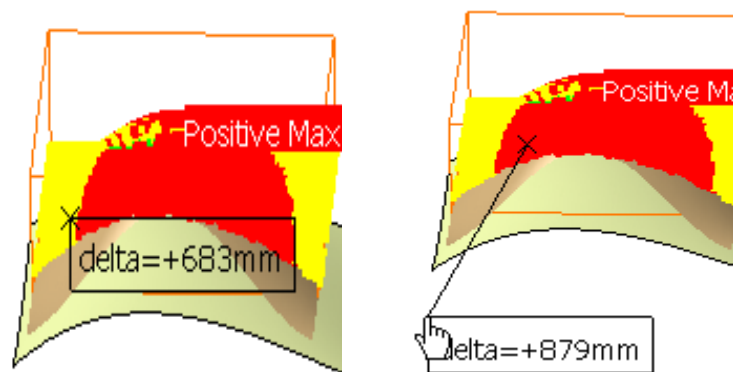
Εικόνα 6.18: Εμφάνιση χαρτογράφησης πλέγματος σε (α) μικρή (β) μεσαία και (γ) μεγάλη ακτίνα εισροής (Influent Radius)

- Porcupine Curvature Analysis:** Αναλύει την καμπυλότητα των καμπυλών και των συνόρων της επιφάνειας. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα παρουσίασης των αποτελεσμάτων και σε μορφή γραφικής παράστασης.



Εικόνα 6.19: Ανάλυση καμπυλότητας καμπυλών

- Annotation:** δίνει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν υπομνήματα ή πλαίσια σχολιασμού. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να κάνουμε πιο ευδιάκριτα χαρακτηριστικά σημεία, όπως μέγιστα και ελάχιστα σημεία απόκλισης του αντικειμένου και να προσθέσουμε βοηθητικά σχόλια σε περιπτώσεις σχεδιασμού του αντικειμένου από μια ομάδα σχεδιαστών.

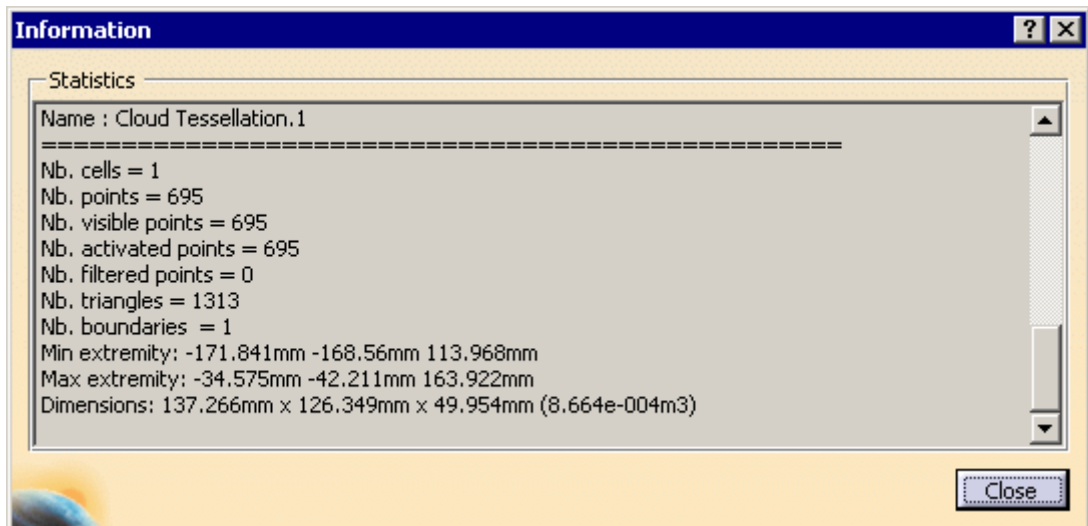


Εικόνα 6.20: Δημιουργία πλαισίων σχολιασμού

6.2.3 Επιπλέον χρήσιμες εντολές

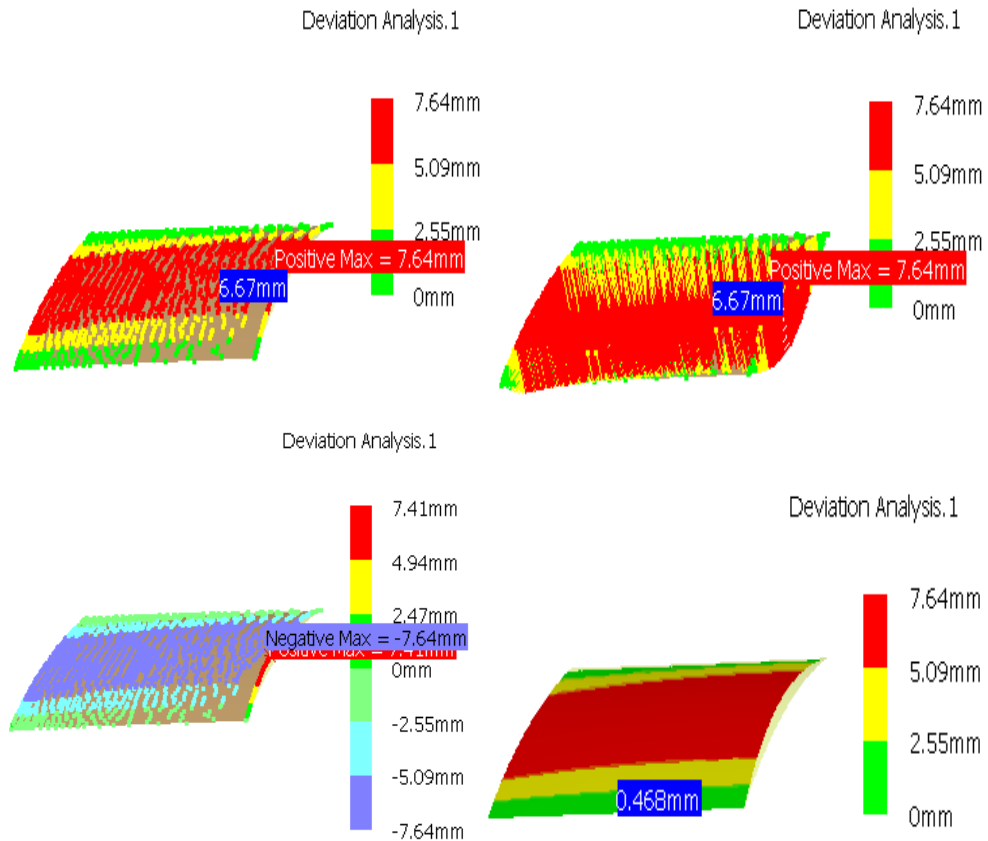
Πρόκειται για εντολές οι οποίες δεν επιφέρουν κάποια αλλαγή στα στοιχεία σχεδιασμού και μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας. Σκοπός των εντολών αυτών είναι να μεταφέρουν πληροφορίες για το αντικείμενο στον σχεδιαστή και να τον ενημερώσουν για την μέχρι στιγμής πρόοδο του.

- **Information:** Μπορούμε καθ' ολη τη διάρκεια της διαδικασίας να πάρουμε διάφορες πληροφορίες για το συγκεκριμένο πλέγμα όπως:
 - αριθμό κελιών
 - αριθμό σημείων
 - αριθμό ενεργών
 - αριθμό ανενεργών σημείων
 - αριθμό τριγώνων
 - αριθμό συνόρων (αν υπάρχουν)
 - βασικές διαστάσεις του πλέγματος.



Εικόνα 6.21: Τυπική εμφάνιση πληροφοριών στοιχείου

- **Deviation Analysis:** Μέσω της εντολής Deviation Analysis μπορούμε να συγκρίνουμε δύο στοιχεία του αντικειμένου. Αφού ορίσουμε το μέτρο σύγκρισης (συνήθως το νέφος σημείων ή το πλέγμα) και το συγκρίσιμο στοιχείο (συνήθως πλέγμα ή επιφάνεια) μας παρουσιάζεται γραφικά η απόκλιση των δύο. Υπάρχουν διάφορες οπτικές εμφανίσεις των αποτελεσμάτων για περισσότερη ευκολία του χρήστη.



Εικόνα 6.22: Διάφορες μορφές εμφάνισης εντολής Deviation analysis

6.3 Παρουσίαση του Hardware που χρησιμοποιήθηκε για το laser scanning

Η σάρωση των αντικειμένων γίνεται με την βοήθεια ενός χειροκίνητου φορητού μετρητικού βραχίονα Laser Scanner, στην δική μας περίπτωση με το ScanArm της FARO. Πρόκειται για Laser scanner που δεν έχει επαφή με το αντικείμενο σάρωσης (non-contact measurement system) παρά μόνο μια μικρή λωρίδα λέιζερ εκπέμπεται προς το αντικείμενο για την εκτέλεση της σάρωσης. Το FARO ScanArm προσφέρει γρήγορη και αποτελεσματική ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου. Απλά ή σύνθετα σχήματα μπορούν εύκολα να σαρωθούν με πολύ μεγάλη ακρίβεια και σε ελάχιστο χρόνο. Είναι ιδανικό εργαλείο για μετατροπή νέφους σημείων σε CAD μοντέλα, σε εφαρμογές rapid prototyping, reverse engineering και 3D modeling.

- Ακρίβεια: $\pm 35\text{mm}$
- Ταχύτητα σάρωσης: έως 19.200 points/sec
- Ακτίνα μέτρησης 1,2 μέτρα
- 7 βαθμοί ελευθερίας



Εικόνα 6.23: Χειροκίνητος βραχίονας FARO ScanArm Laser Scanner

Κατά την σάρωση, το FARO ScanArm συνδέεται με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω του σχεδιαστικού πακέτου Geomagic Studio μπορούμε να έχουμε παρακολουθήσουμε οπτικά την διαδικασία της σάρωσης. Με αυτό τον τρόπο μπορεί ο χειριστής του scanner να έχει οπτική επαφή με την περιοχή σάρωσης, να παρατηρήσει περιοχές που δεν σαρώθηκαν σωστά και να κάνει διορθώσεις, να πάρει διάφορες πληροφορίες για το νέφος σημείων ή και να το επεξεργαστεί.



Εικόνα 6.24: Λείζερ κάμερα FARO ScanArm

Κεφάλαιο 7

Παρουσίαση της Μεθοδολογίας

Στο παρών κεφάλαιο θα επιχειρηθεί να τυποποιηθεί η διαδικασία επεξεργασίας ενός φυσικού αντικειμένου από την σάρωση του μέχρι και την έξοδο του από το λογισμικό CATIA. Η συγκεκριμένη βηματική ανάλυση προκύπτει σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στις εφαρμογές της ΔΕ χωρίς να σημαίνει ότι τα βήματα της είναι δεσμευτικά ως προς το χρόνο εκτέλεσης τους ή ακόμη και την αποφυγή εκτέλεσης κάποιας εντολής.

Το κάθε αντικείμενο, εξάρτημα ή μηχανή που βρίσκεται προς επεξεργασία έχει τα δικά της ιδιαίτερα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζουν την εκάστοτε ακριβή βηματική διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί. Επομένως, ο χειριστής του CATIA έχει την ευχέρεια και την ελευθερία να ακολουθήσει την δική του σειρά εκτέλεσης των εντολών σύμφωνα με την ανταπόκριση που λαμβάνει από το CATIA στην εκτέλεση των εντολών.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στις εφαρμογές της ΔΕ χωρίστηκε σε δύο μέρη. Το πρώτο χρησιμοποιώντας τις εντολές του workbench DSE και το δεύτερο του workbench QSR. Καθένα από τα δύο αυτά μέρη αποτελείται από τέσσερις φάσεις.

Αρχικά οι εντολές του DSE χωρίστηκαν ως εξής:

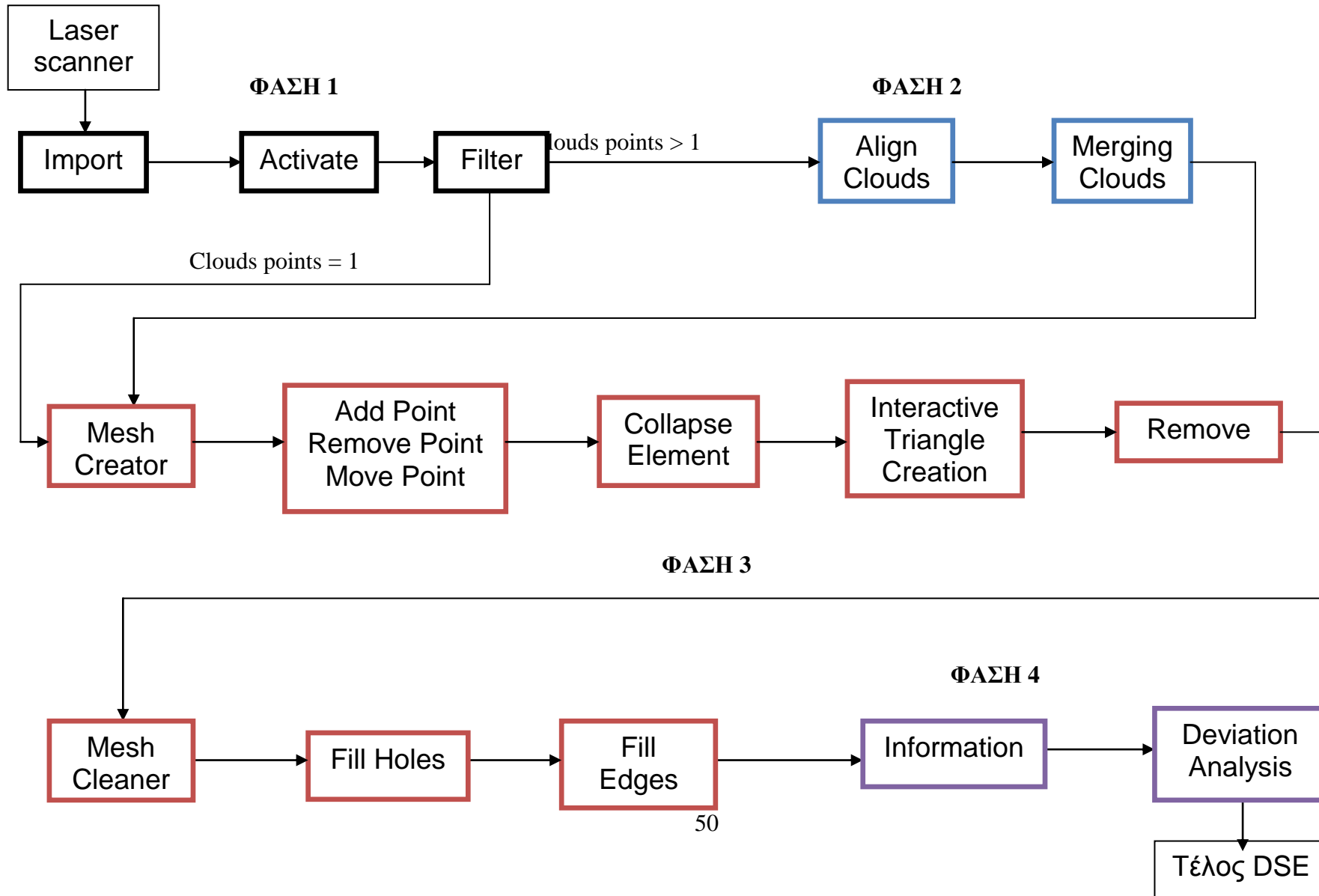
1. Επεξεργασία νέφους σημείων: Αφορά την εισαγωγή, ενεργοποίηση και φιλτράρισμα του νέφους σημείων έτσι ώστε να δημιουργήσουμε ένα όσο το δυνατό πιο ποιοτικό νέφος. Ένα καλής ποιότητας νέφος είναι η βάση για την καλύτερη εκτέλεση των εντολών που θα ακολουθήσουν.
2. Ευθυγράμμιση νέφους σημείων: Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με περισσότερα από δύο νέφη σημείων. Η ευθυγράμμιση τους είναι απολύτως αναγκαία έτσι ώστε τα σημεία του τελικού ενιαίου νέφους που θα σχηματιστεί να περιλαμβάνουν όλες τις επιφάνειες του αντικειμένου σε σωστές αποκλίσεις. Στις σπάνιες περιπτώσεις όπου η εφαρμογή απαιτεί μόνο ένα νέφος η φάση της ευθυγράμμισης παραλείπεται.
3. Δημιουργία και επεξεργασία πλέγματος: Αποτελείται από μία σειρά εντολών σκοπός των οποίων είναι η κατασκευή και διόρθωση του πλέγματος, με την προσθαφαίρεση πλέγματος ή σημείων, την επούλωση κενών τμημάτων και την επιδιόρθωση κακών συνδέσεων.

4. Ανάλυση πλέγματος: Είναι η σύγκριση απόκλισης μεταξύ του νέφους σημείων και του τελικού πλέγματος.

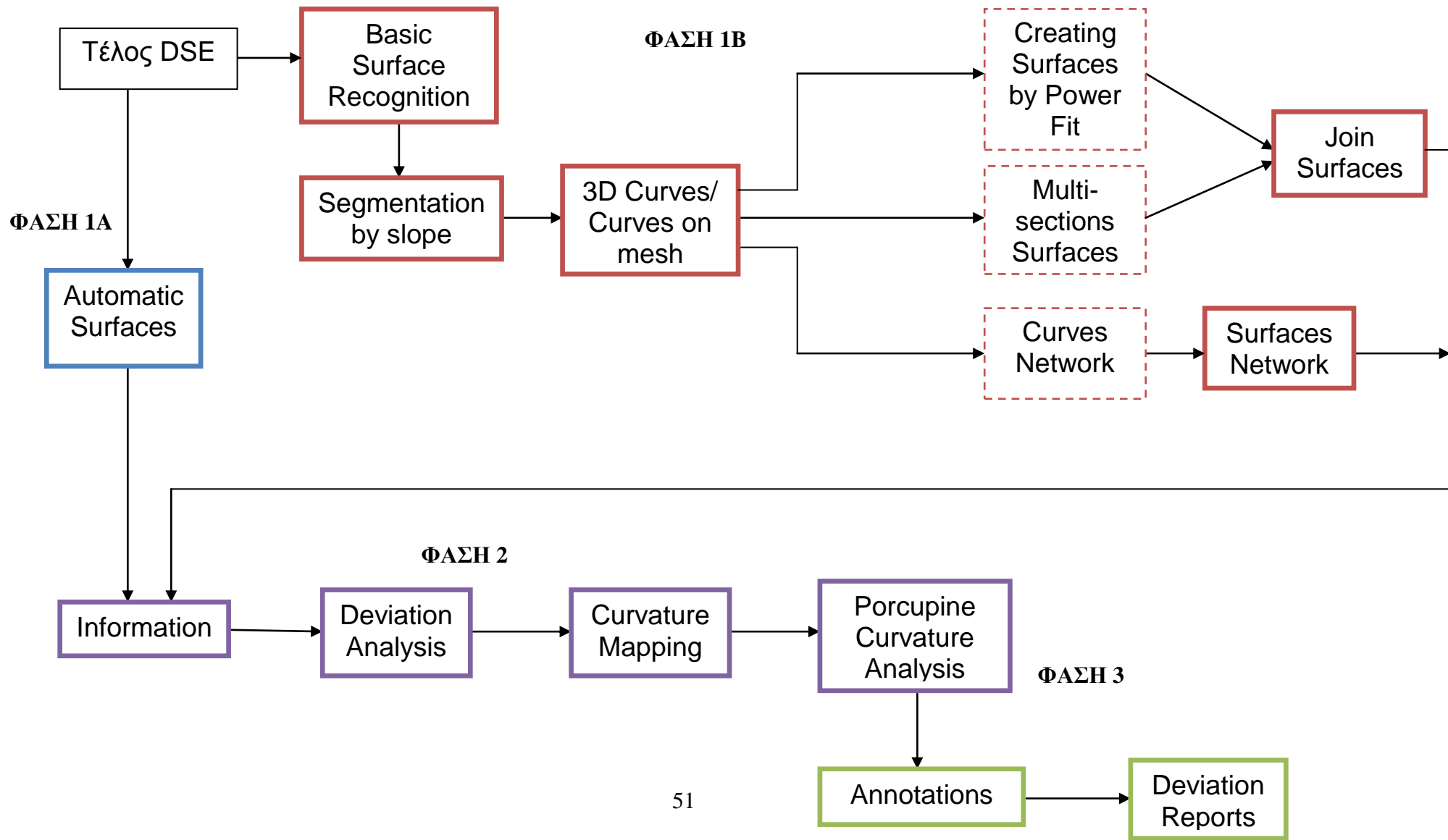
Στο δεύτερο μέρος της διαδικασίας με τη βοήθεια των εντολών του QSR εκτελέστηκαν οι εξής φάσεις:

1. Αυτόματη κατασκευή επιφανειών - Διαχωρισμός πλέγματος και κατασκευή επιφανειών: Η φάση αυτή αφορά την κατασκευή των επιφανειών. Αρχικά επιχειρούμε να κατασκευάσουμε τις επιφάνειες αυτόματα με την εντολή Automatic surfaces. Εάν η εντολή είναι δυνατό να εκτελεστεί προχωράμε στη επόμενη φάση. Εναλλακτικά θα πρέπει να ασχοληθούμε με μια σειρά από εντολές έτσι ώστε να κατασκευάσουμε αρχικά καμπύλες και στη συνέχεια τις επιφάνειες.
2. Ανάλυση επιφανειών: Γίνεται ανάλυση της καμπυλότητας του πλέγματος και των καμπυλών καθώς επίσης και η απόκλιση μεταξύ νέφους σημείων, πλέγματος και επιφανειών.
3. Σχολιασμός και αναφορές: Δημιουργούνται υπομνήματα, σημεία σχολιασμού και σημειώσεων καθώς και τελικές αναφορές για το ψηφιακό πλέον αντικείμενο.

Διάγραμμα 7.1: Τυπική Βηματική Διαδικασία Digitized Shape Editor



Διάγραμμα 7.2: Τυπική Βηματική Διαδικασία Quick Surfaces Reconstruction



Digitized Shape Editor	
ΦΑΣΗ 1	Επεξεργασία νέφους σημείων
ΦΑΣΗ 2	Ευθυγράμμιση νέφους σημείων
ΦΑΣΗ 3	Δημιουργία και επεξεργασία πλέγματος
ΦΑΣΗ 4	Ανάλυση πλέγματος

Quick Surfaces Reconstruction	
ΦΑΣΗ 1Α	Αυτόματη κατασκευή επιφανειών
ΦΑΣΗ 1Β	Διαχωρισμός πλέγματος και κατασκευή επιφανειών
ΦΑΣΗ 2	Ανάλυση επιφανειών
ΦΑΣΗ 3	Σχολιασμός και αναφορές

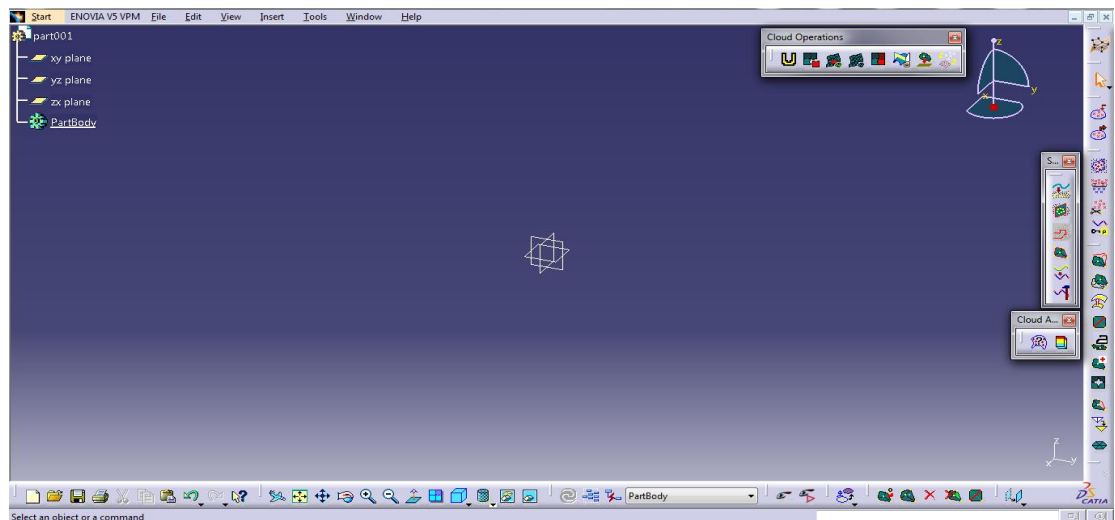
Υπομνήματα διαγραμμάτων DSE και QSR

Κεφάλαιο 8

Εφαρμογές

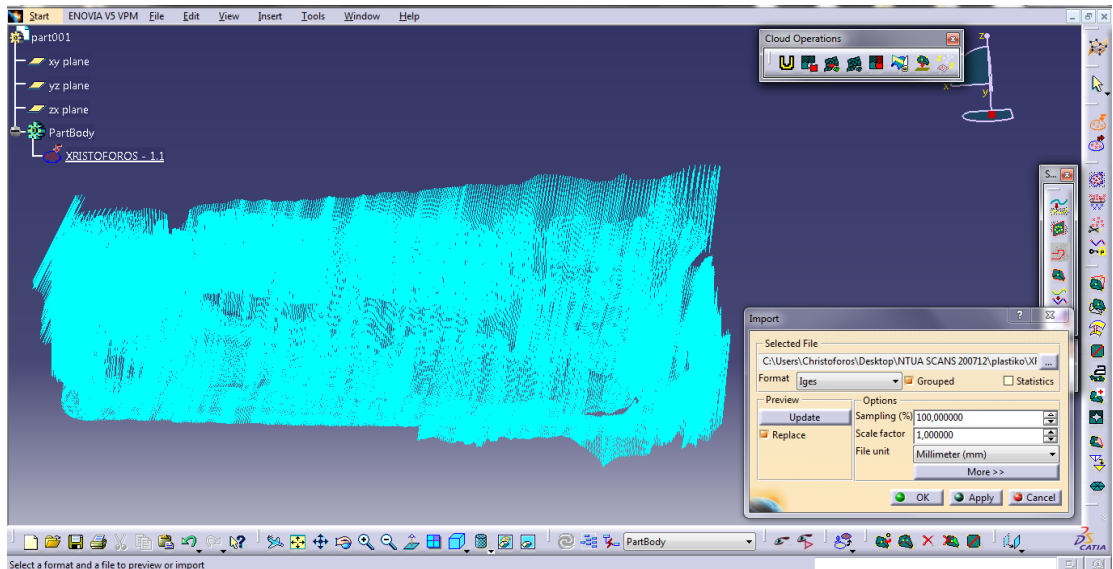
8.1 Πλαστικό πλυντηρίου

Ενεργοποίηση φύλλου εργασίας (workbench) **Digitized Shape Editor**.

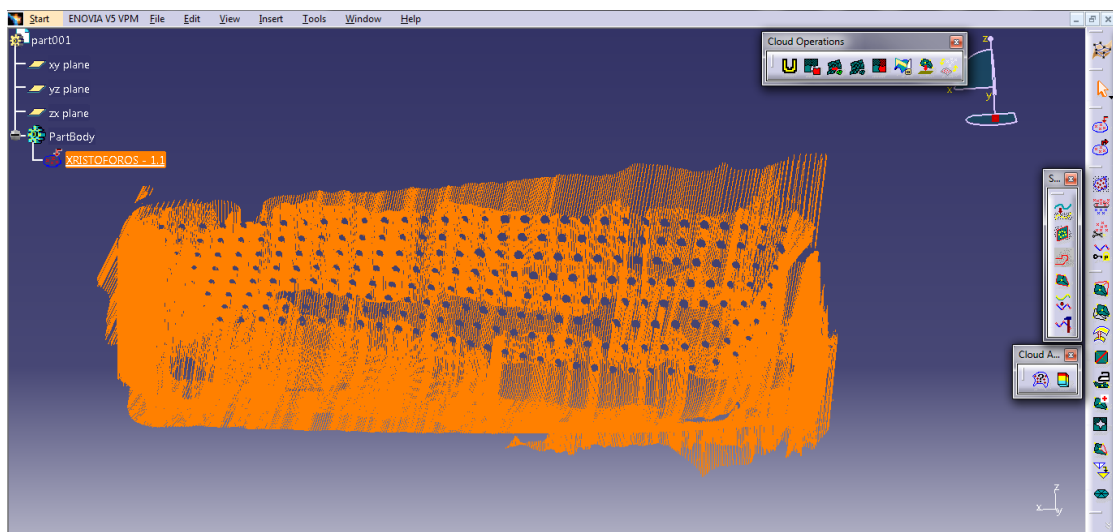


Εικόνα 8.1.1: Workbench DSE

- **Import:** Εισάγουμε στο λογισμικό το νέφος σημείων.

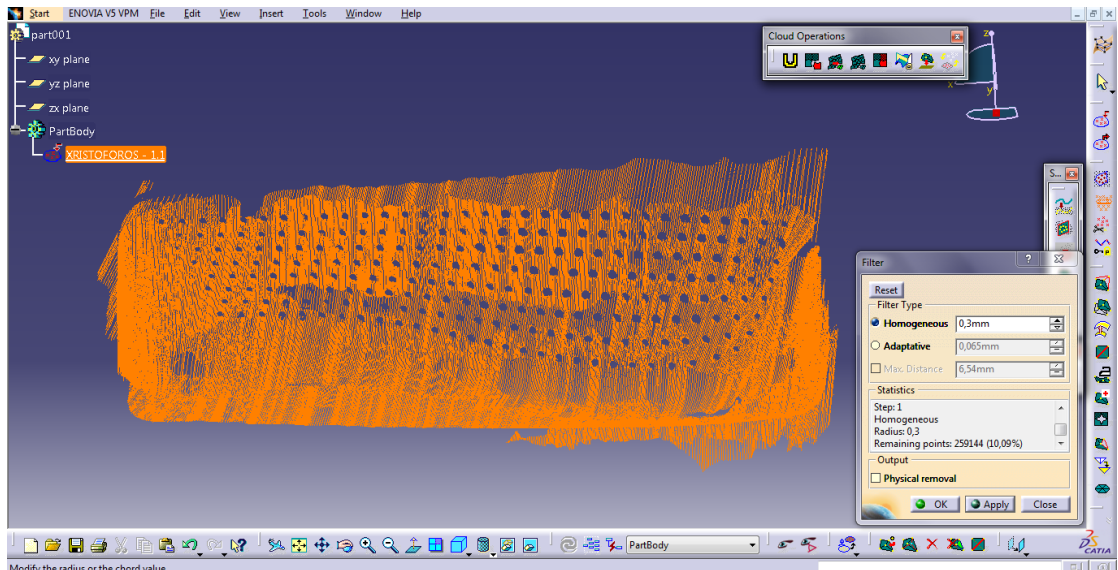


Εικόνα 8.1.2: Νέφος σημείων σε εμφάνιση polyline



Εικόνα 8.1.3: Νέφος σημείων σε εμφάνιση σημείων

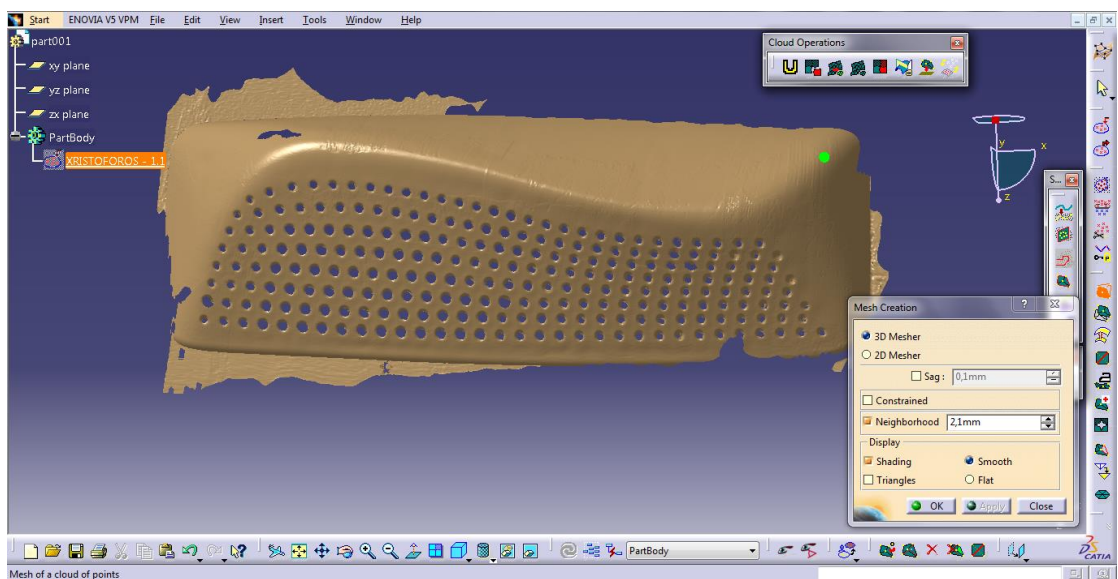
- **Filter:** Φιλτράρουμε τα σημεία του νέφους κρατώντας ένα μέρος αυτών χωρίς να χάσουμε το σχήμα του νέφους. Καθορίζουμε την ακτίνα φιλτραρίσματος Homogeneous radius = 0,3mm και παρατηρούμε ότι από τα 2569119 σημεία (100%) που είχαμε αρχικά μετά το φιλτράρισμα έχουν παραμείνει 259144 σημεία δηλαδή μόλις το 10,09%, αρκετά όμως για να μπορούμε να συνεχίσουμε την διαδικασία. Τα φιλτραρισμένα σημεία δεν διαγράφονται αλλά απενεργοποιούνται.



Εικόνα 8.1.4: Φιλτραρισμένο νέφος σημείων

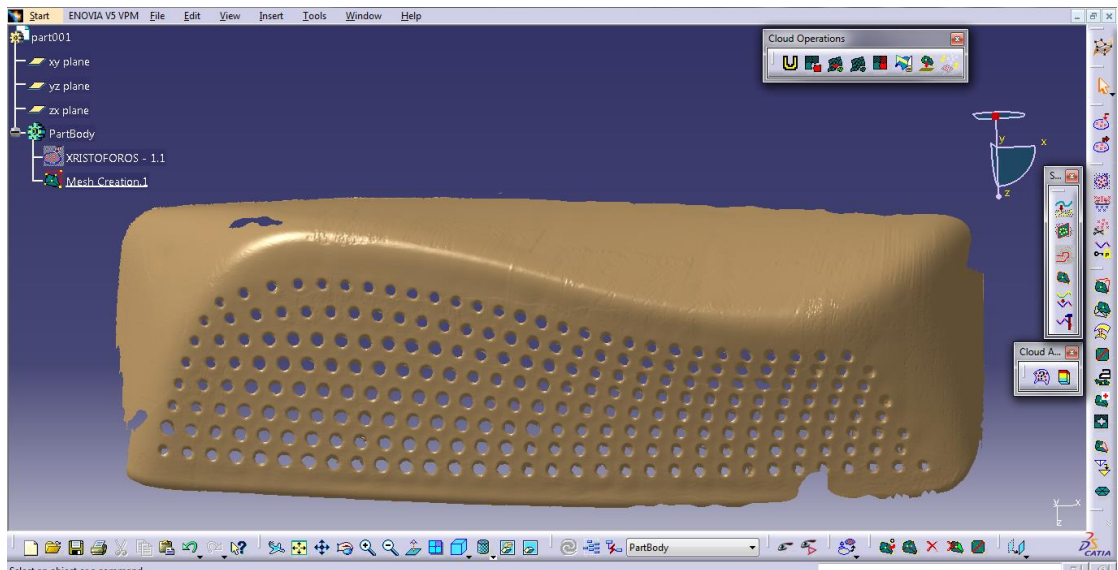
- Mesh Creator:** Μέσω αυτής της εντολής δημιουργείτε το πλέγμα. Κύρια παράμετρο που εξαρτάται από εμάς είναι το neighborhood το οποίο αντιπροσωπεύει το μέγιστο μήκος πλευράς γειτονικών τριγώνων που θα σχηματιστούν κατά τη δημιουργία του πλέγματος.

Neighborhood = 2,1mm (Smooth)



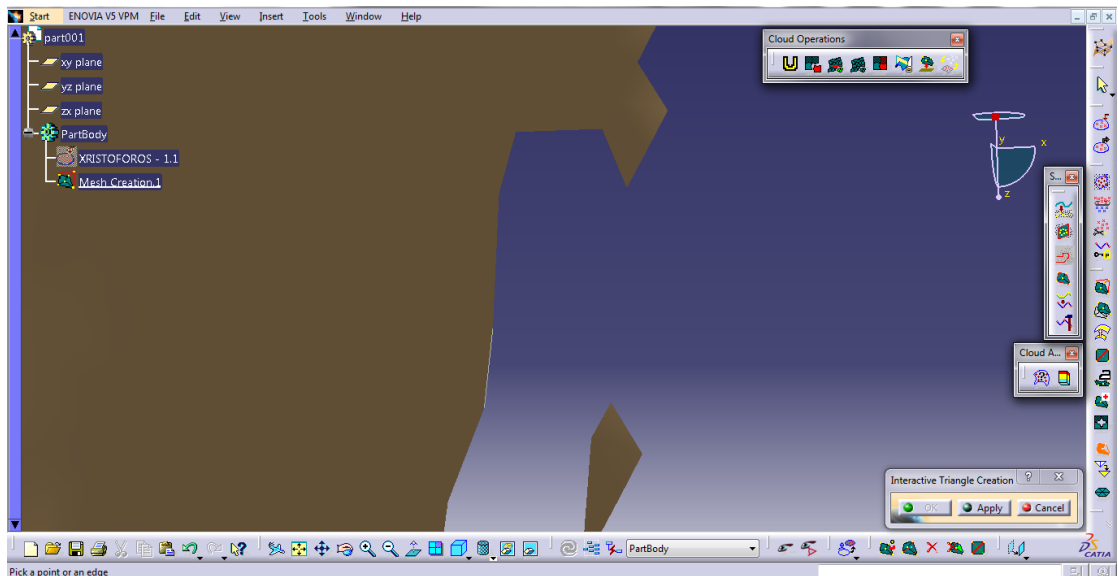
Εικόνα 8.1.5: Κατασκευή πλέγματος

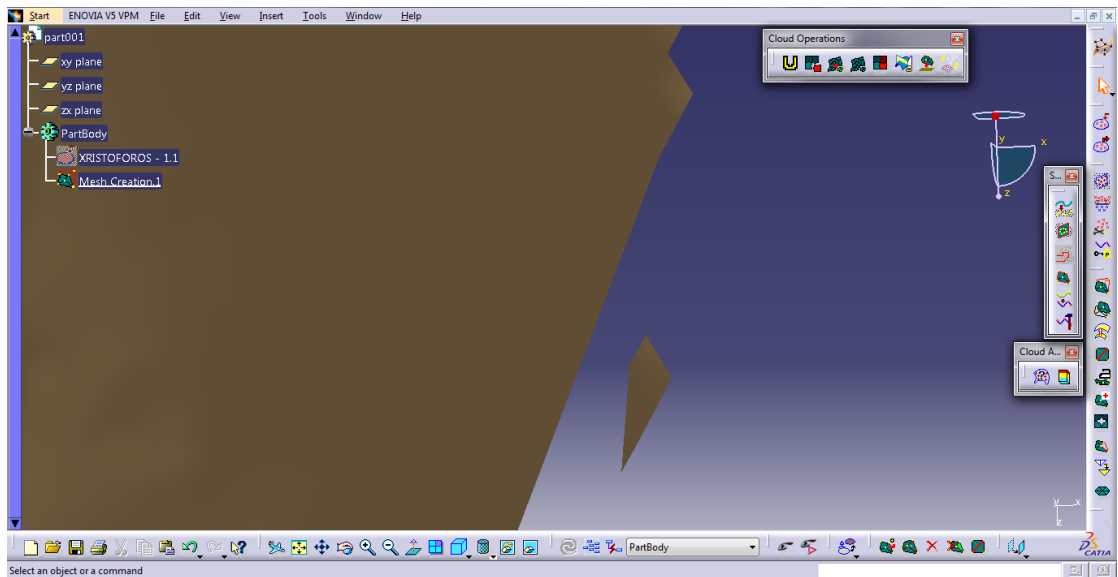
- Remove:** Αφαιρούμε τα στοιχεία τα οποία δεν μας χρειάζονται. Από το σχήμα φαίνεται ξεκάθαρα η απομάκρυνση των περιττών σημείων που προέκυψαν λόγω κακής σάρωσης.



Εικόνα 8.1.6: Αφαίρεση αγρείαστων τμημάτων πλέγματος

- Interactive triangle creation:** Σε διάφορα περιοχές του πλέγματος όπου δεν υπάρχουν αρκετά σημεία σάρωσης γι' αυτό και τα δημιουργούμε εμείς έτσι ώστε να καλυφτούν τα κενά του πλέγματος. Πρόκειται για χρονοβόρα εντολή η οποία απαιτεί υπομονή γι' αυτό ο χρήστης πρέπει να έχει την κρίση εάν πρέπει να δημιουργήσει το επιπλέον πλέγμα ή όχι και σε ποια σημεία.

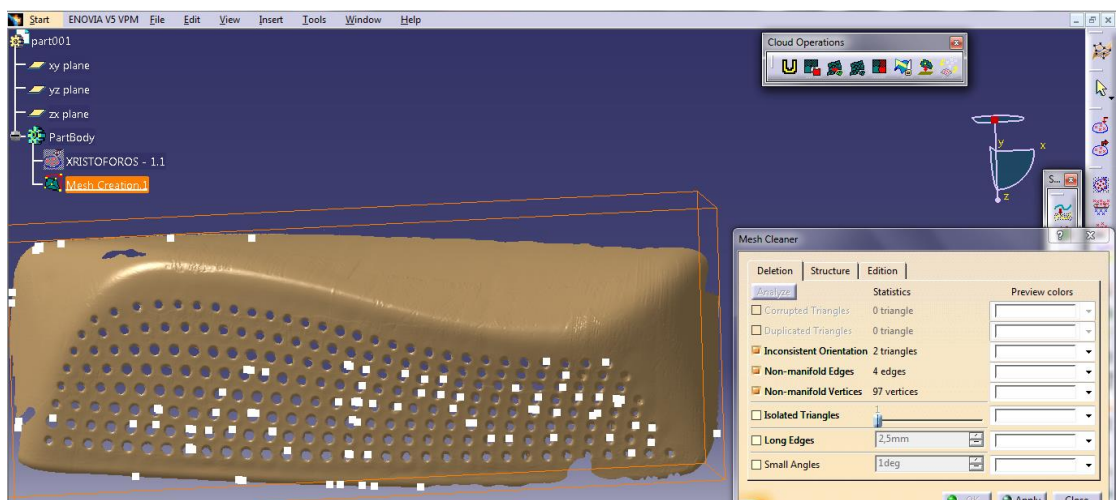




Εικόνα 8.1.7: Πρόσθεση τριγώνων με interactive triangle creation

Mesh Cleaner: Ενεργοποιώντας την εντολή εντοπίζονται αυτόματα όλα τα ελαττώματα του πλέγματος και εναπόκειται στο χρήστη εάν θα τις διορθώσει και πότε. Ορισμένες εντολές που ακολουθούν απαιτούν ένα πλήρες διορθωμένο πλέγμα γι' αυτό και η συγκεκριμένη εντολή θεωρείται λίγο πολύ υποχρεωτική. Με την ενεργοποίηση της εντολής παρουσιάστηκαν τα πιο κάτω σφάλματα, τα οποία και διορθώθηκαν άμεσα.

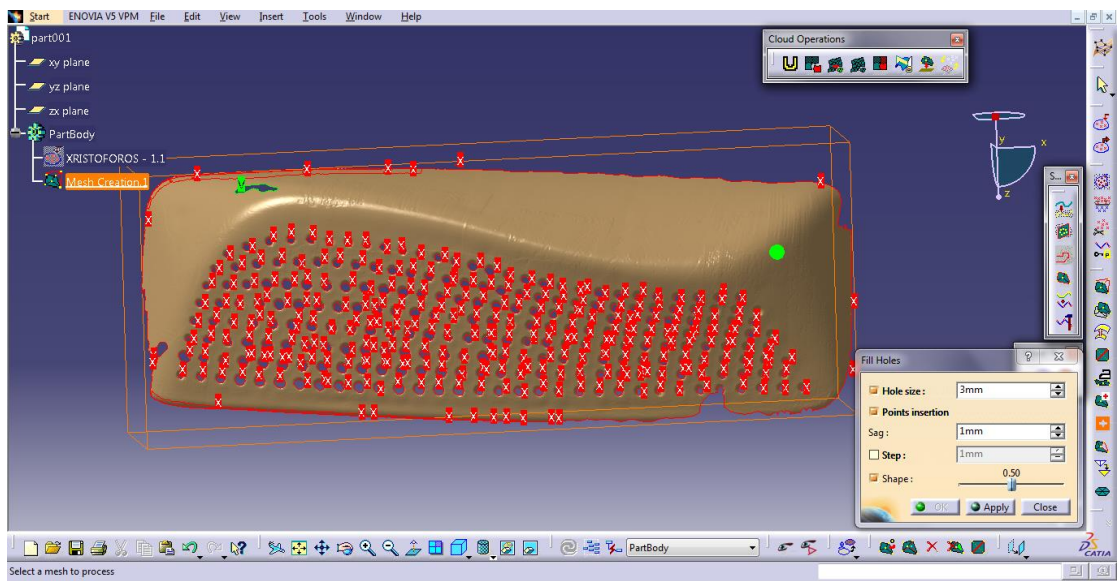
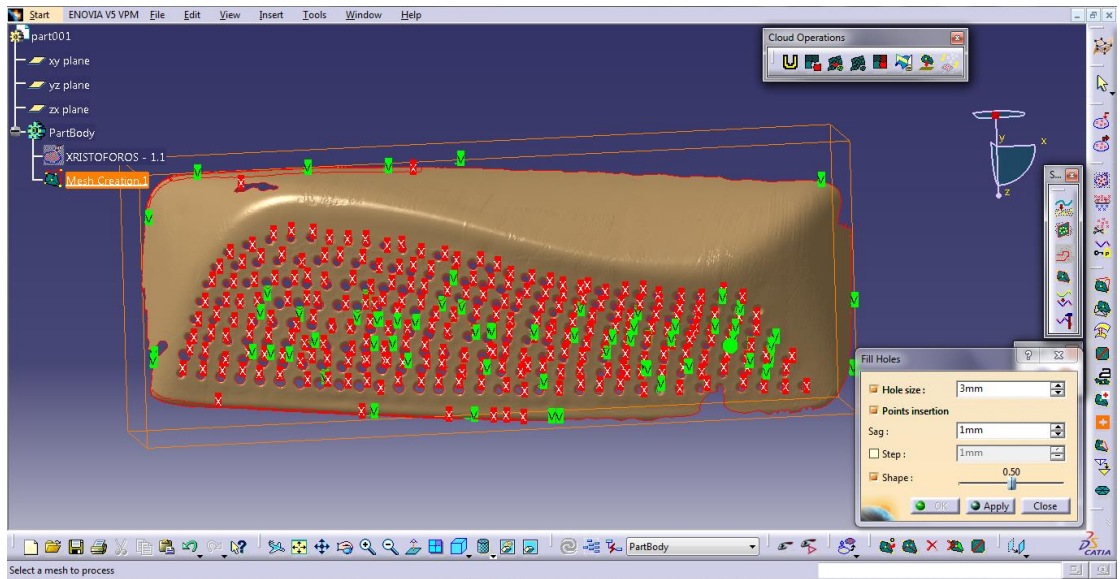
- corrupted triangles = 0 κατεστραμμένα τρίγωνα
- duplicated triangles = 0 διπλά τρίγωνα
- inconsistent orientation = 2 ασυνεπής προσανατολισμό
- non manifold edges = 7 μη πολλαπλές άκρες
- non manifold vertices = 98 μη πολλαπλές κορυφές



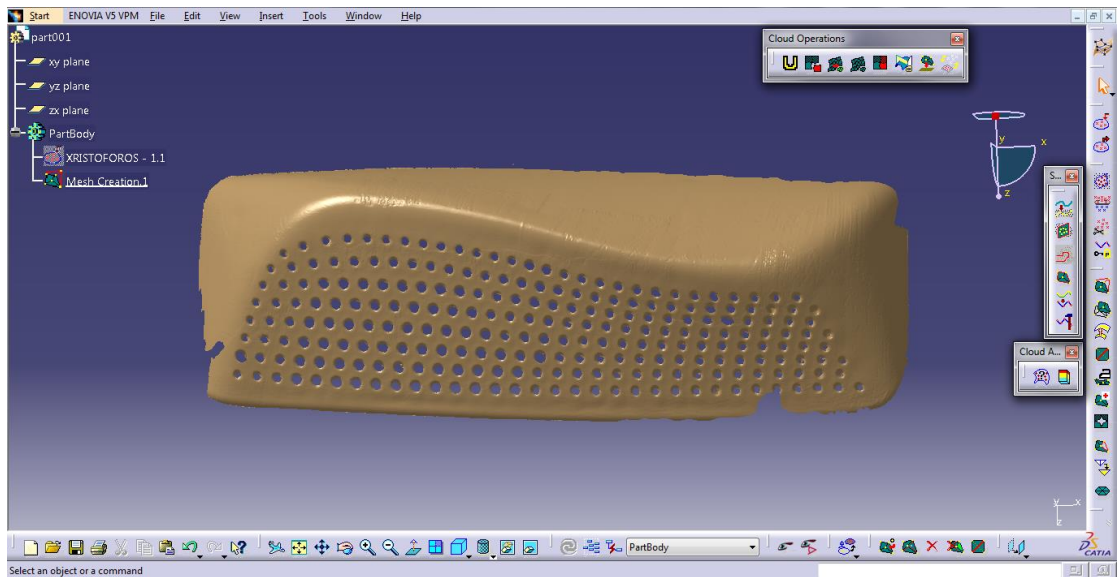
Εικόνα 8.1.8: Οι άσπρες κουκίδες υποδηλώνουν τα σημεία σφάλματος

- **Fill Edges:** Εντολή για το κλείσιμο των οπών του πλέγματος. Εισάγουμε το μέγιστο μήκος πλευράς τριγώνων που θέλουμε να σχηματιστούν και το πρόγραμμα αναγνωρίζει αυτόματα ποιές τρύπες μπορούν να κλείσουν και

ποιές όχι. Έστω και αν το μήκος που ορίζουμε είναι μικρό θεωρητικά, στις πλείστες των περιπτώσεων είναι αρκετό για να επουλώσει τα κενά τμήματα και να δώσει στο πλέγμα σχήμα.



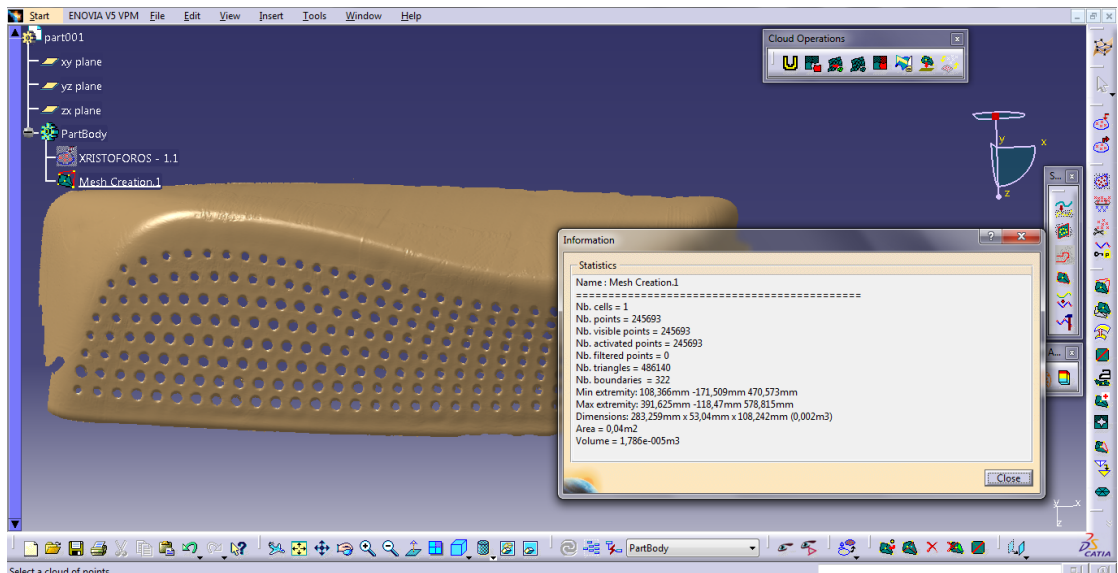
Εικόνα 8.1.9: Εφαρμογή εντολής fill edges. Το πράσινο και κόκκινο χρώμα διαχωρίζει ποια κενά που μπορούν να κλείσουν και ποια όχι



Εικόνα 8.1.10: Τελική εμφάνιση πλέγματος

- **Information:** Εμφανίζει γενικές πληροφορίες για το πλέγμα με κυριότερες τις πιο κάτω:

- Number cells = 1
- Number points = 2.569.119
- Number visible points = 259.144
- Number activated points = 2.569.119
- Number filtered points = 2.309.975
- Dimensions = 292,811mm x 55,253mm x 132,796mm

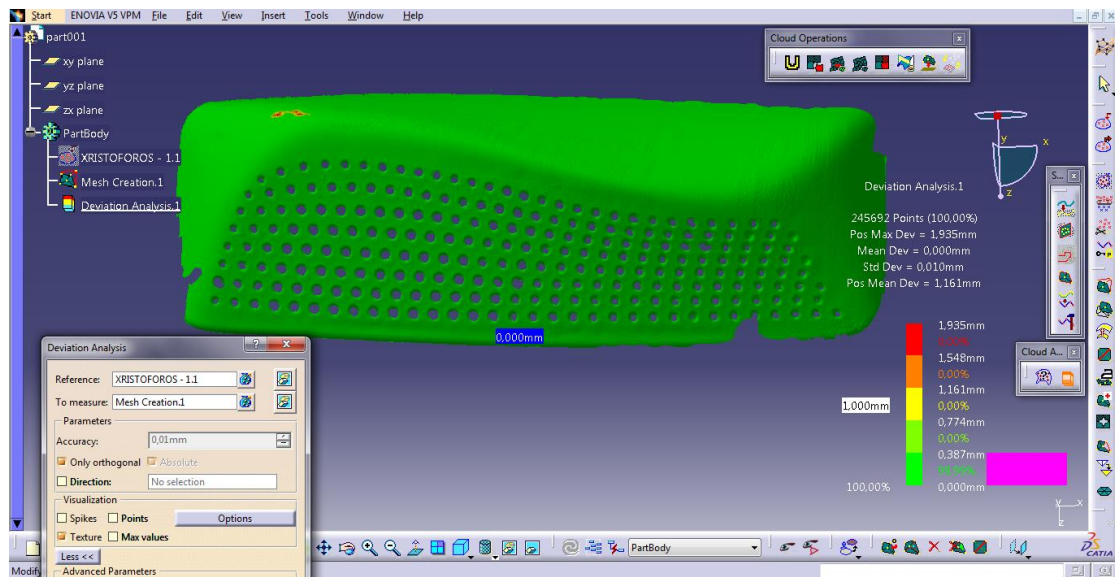


Εικόνα 8.1.11: Πληροφορίες για το πλέγμα

- **Deviation Analysis:** Συγκρίνοντας την απόκλιση του πλέγματος σε σχέση με το νέφος σημείων πήραμε τα εξής αποτελέσματα.

Ποσοστό σημείων του πλέγματος που αποκλίνουν από το νέφος σημείων				
0-0,387mm	0,387-0,774mm	0,774-1,161mm	1,161-1,548mm	1,548-1,935mm
99,99%	0%	0%	0%	0%
Μεγιστη απόσταση απόκλισης = 1,935mm				
100% των σημείων είναι εντός ορίων ανοχής				

Πίνακας 8.1: Deviation analysis νέφος σημείων - πλέγμα

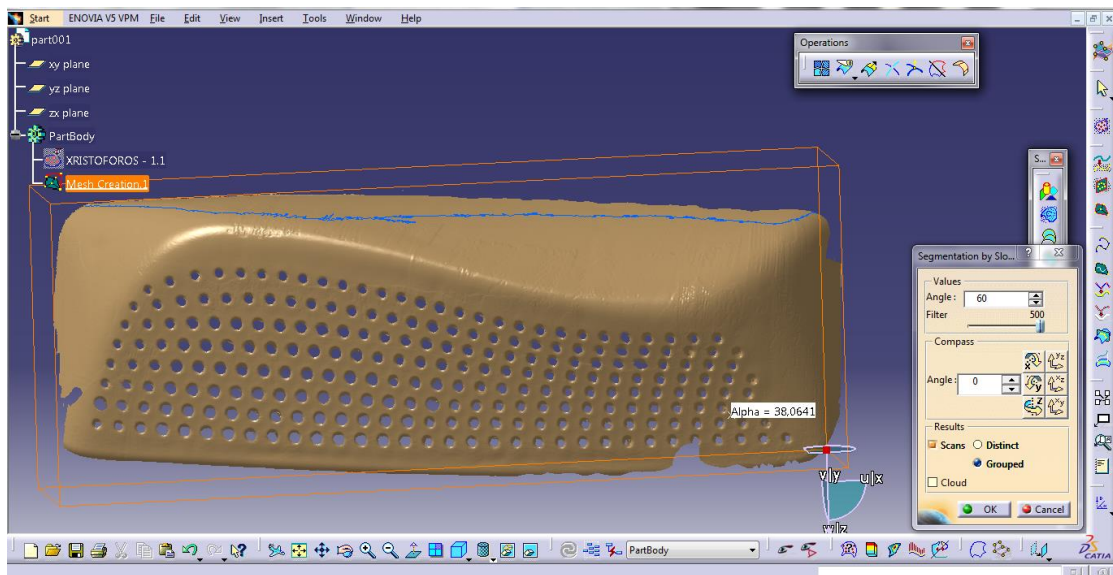
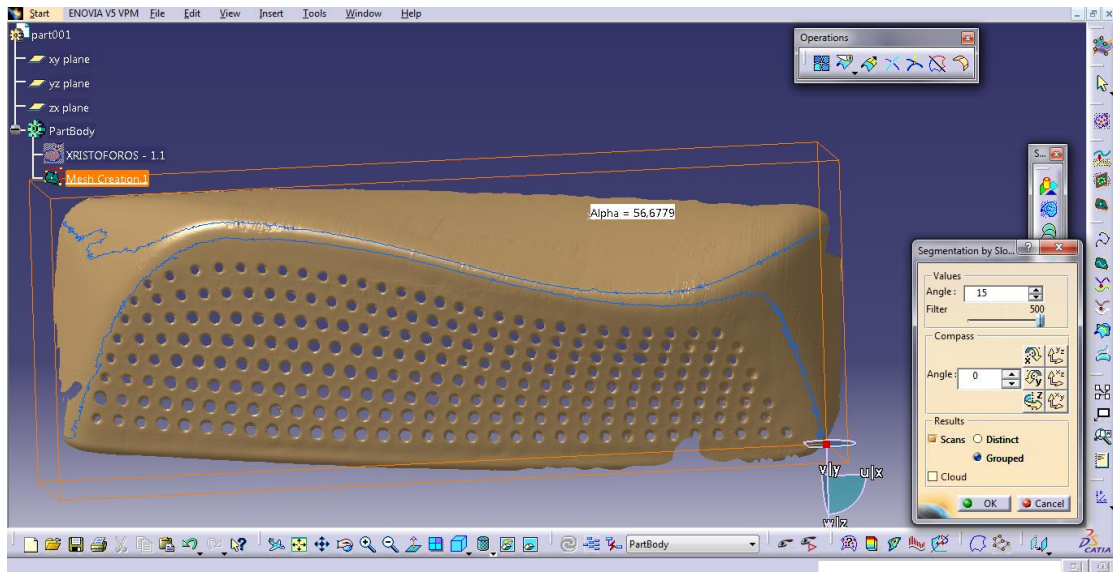


Εικόνα 8.1.12: Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ νέφους και πλέγματος

Συνεπώς, η απόκλιση των δύο είναι μηδενική. Έχουμε κατορθώσει να δημιουργήσουμε ένα πολύ καλό πλέγμα που σχεδόν ταυτίζεται με το νέφος σημείων. Η διαδικασία μέσω DSE έχει πια ολοκληρωθεί και η συνέχεια της επεξεργασία θα γίνει μέσω QSR.

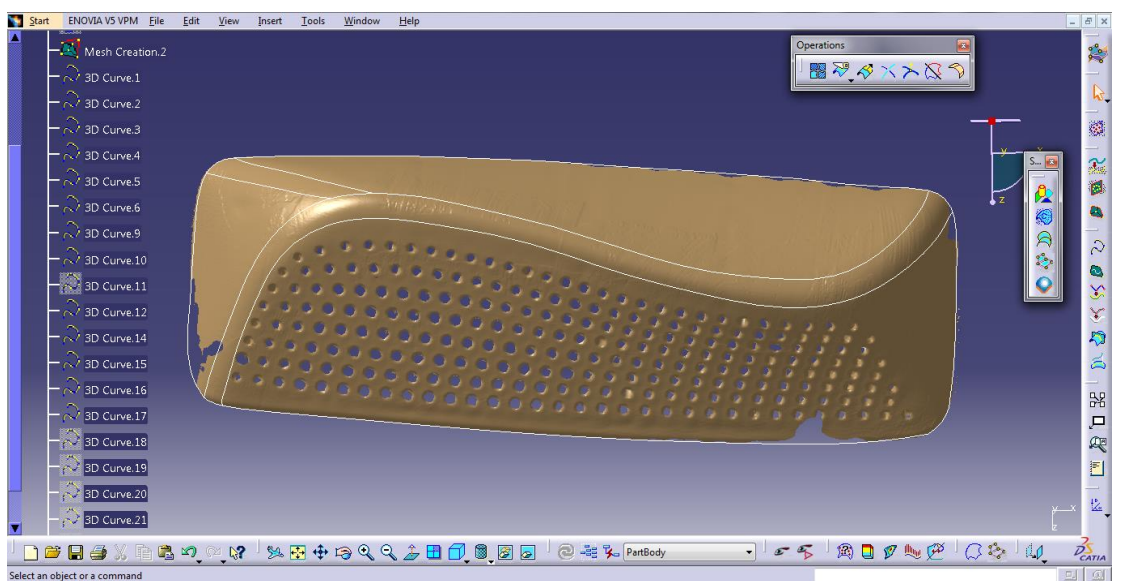
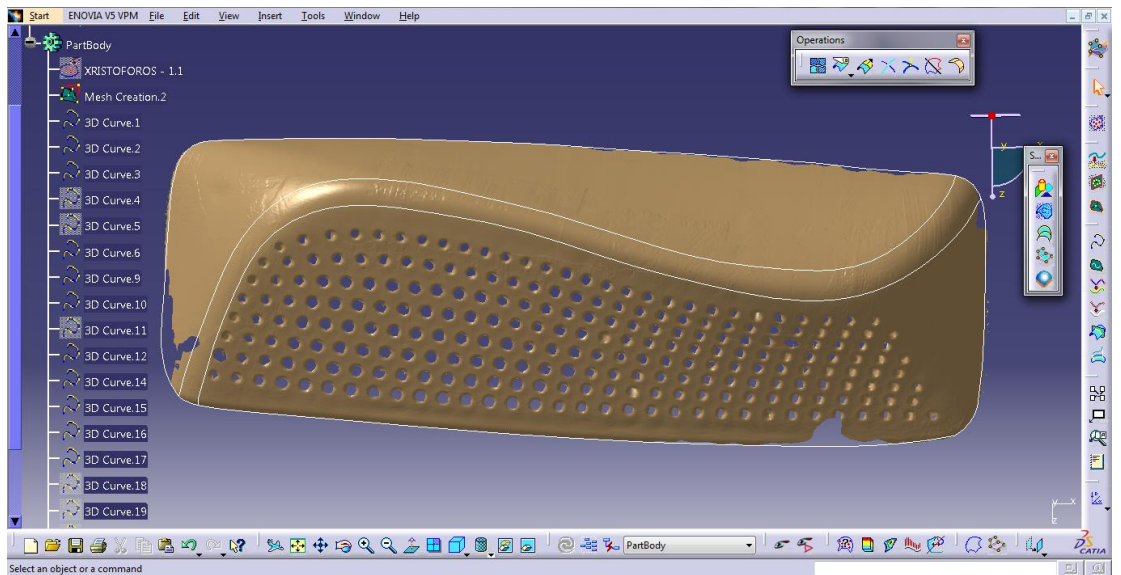
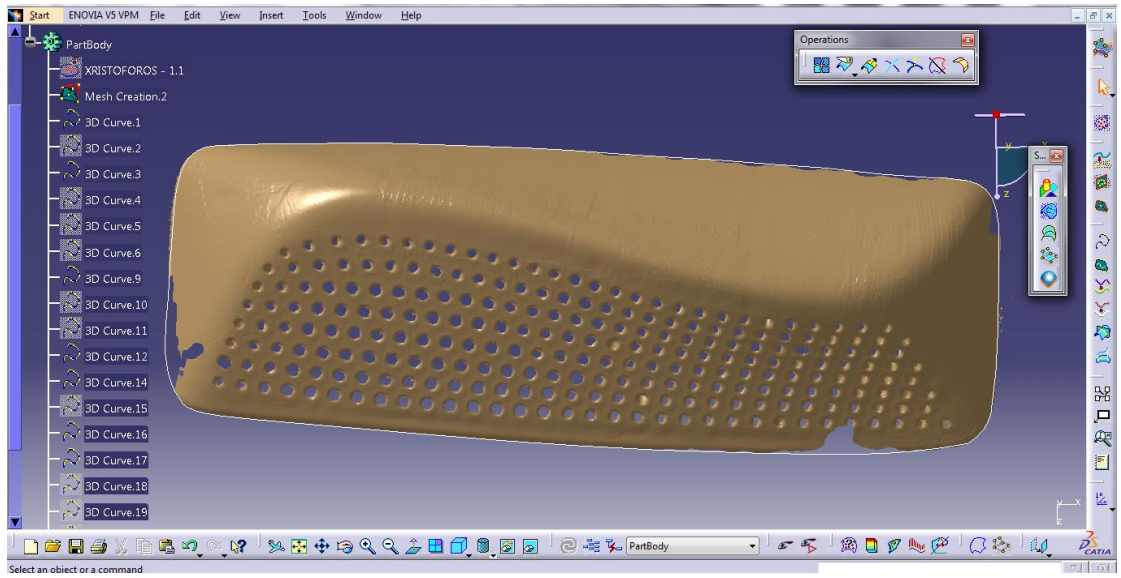
Ενεργοποίηση φύλλου εργασίας (workbench) **Quick Surface Reconstruction**.

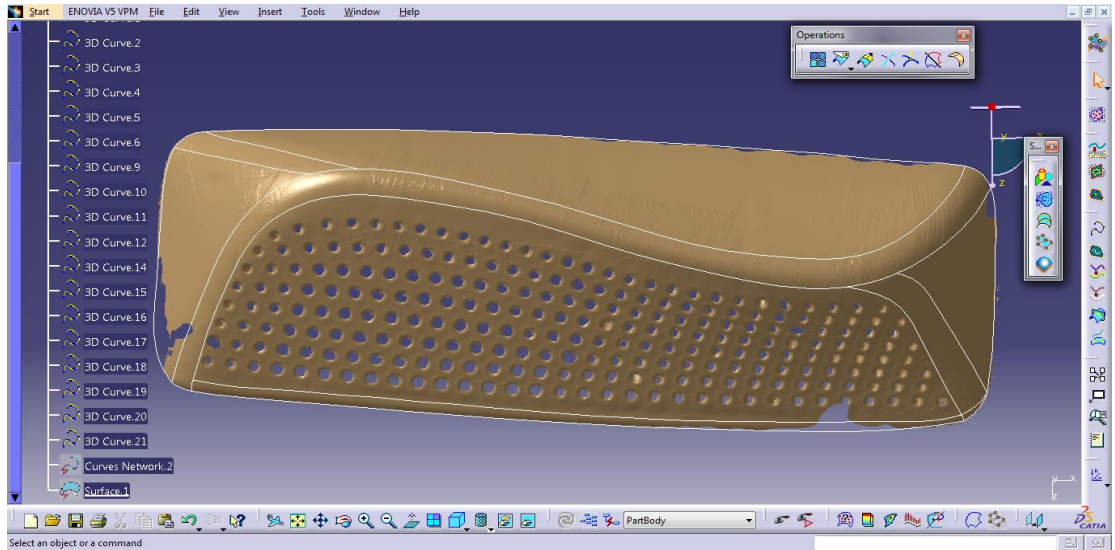
- **Segmentation by slope:** Χρησιμοποιώντας αυτή την εντολή μας παρουσιάζονται γραφικά στο πλέγμα καμπύλες ανάλογα με την καμπυλότητα του αντικειμένου. Είναι ένας εύκολος τρόπος να διαχωρίσουμε το αντικείμενο σε τμήματα και να προβλέψουμε τον σχηματισμό κατασκευής των καμπυλών



Εικόνα 8.1.13: Segmentation by slope με κλίση 15 και 60 μοιρών

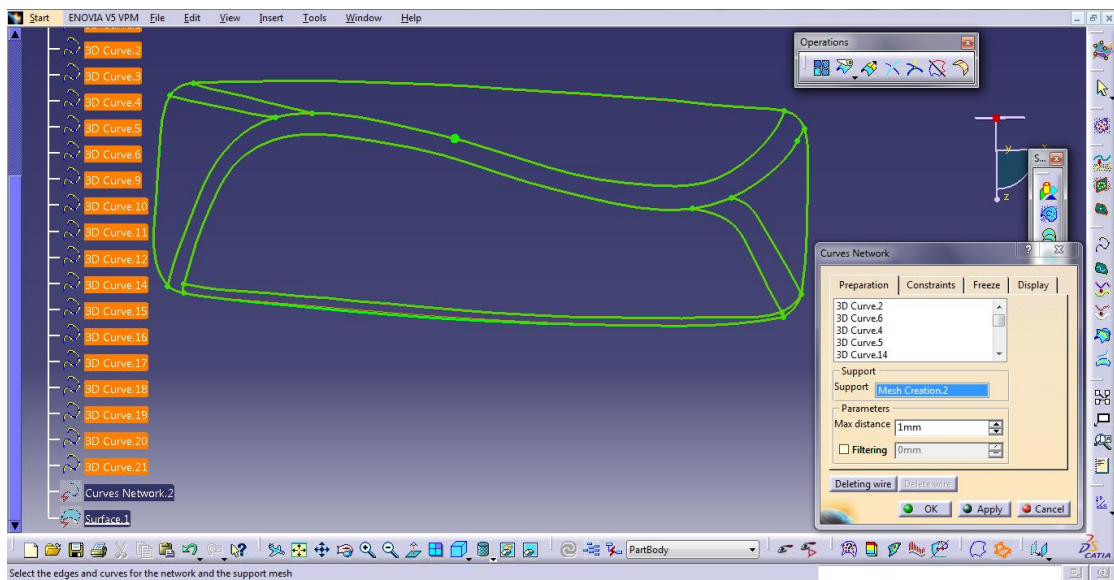
- **3D curves/ Curves on mesh:** Σχεδιάζουμε καμπύλες στο πλέγμα χωρίζοντας το σε τμήματα ανάλογα με την καμπυλότητα. Ο σωστός σχεδιασμός και η τοποθέτηση των καμπυλών στα κατάλληλα σημεία αποτελεί την βασικότερη παράμετρο για την κατασκευή των επιφανειών στα επόμενα βήματα.





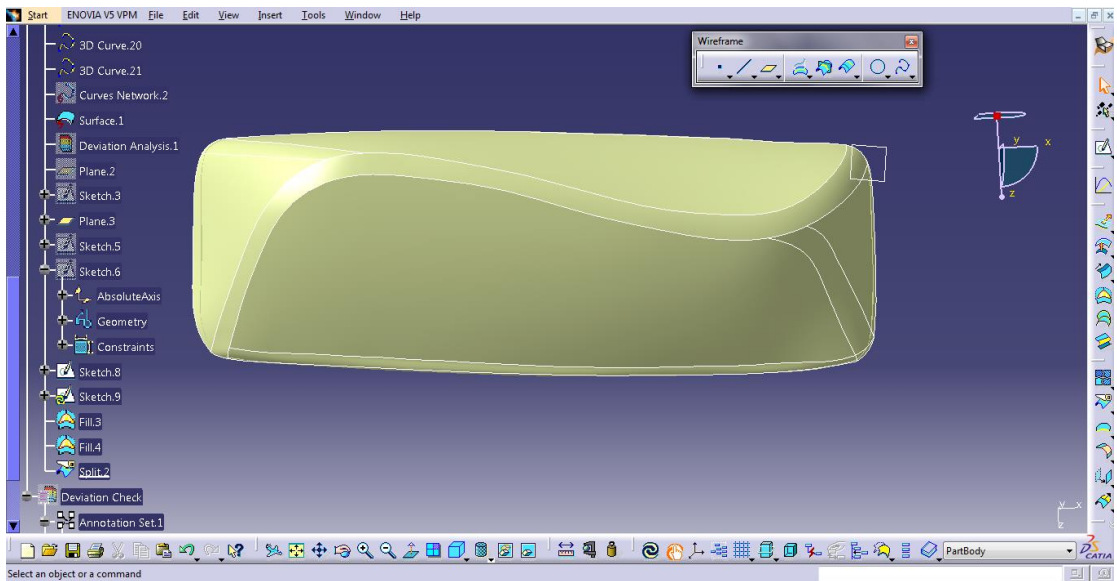
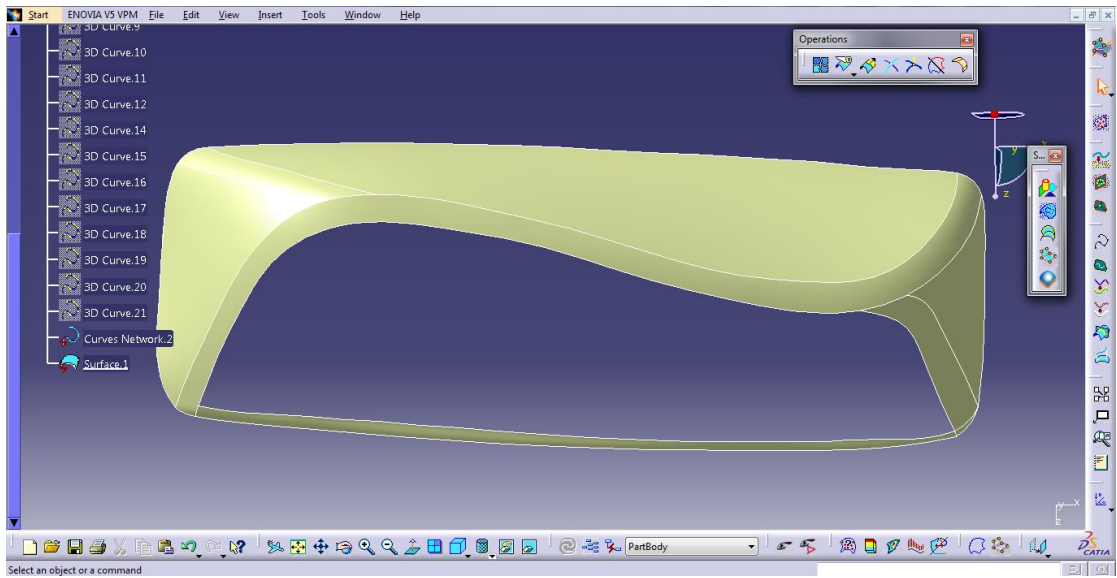
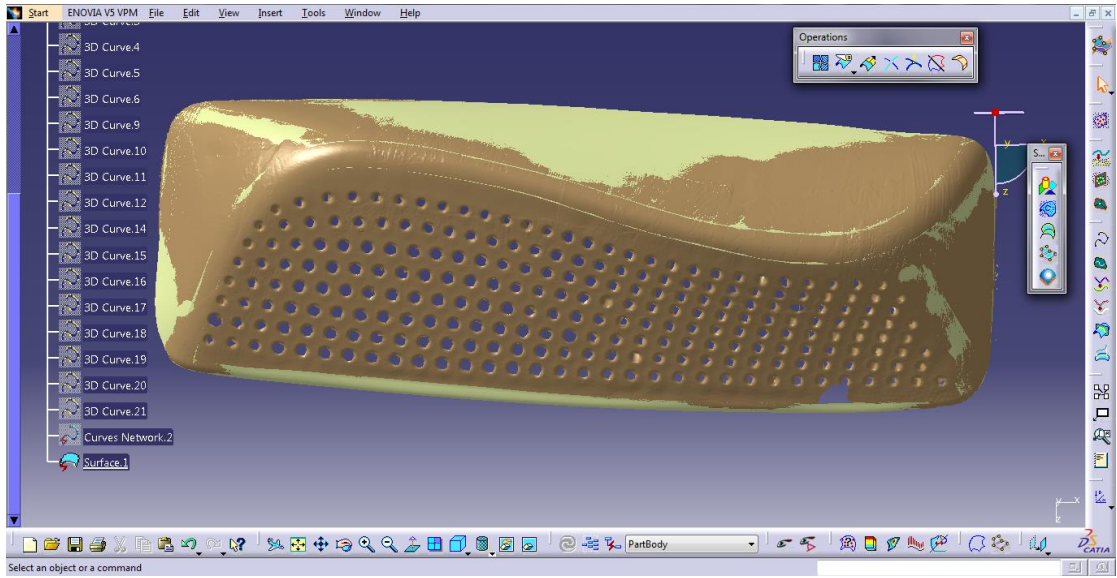
Εικόνα 8.1.14: Βηματική διαδικασία κατασκευής καμπυλών

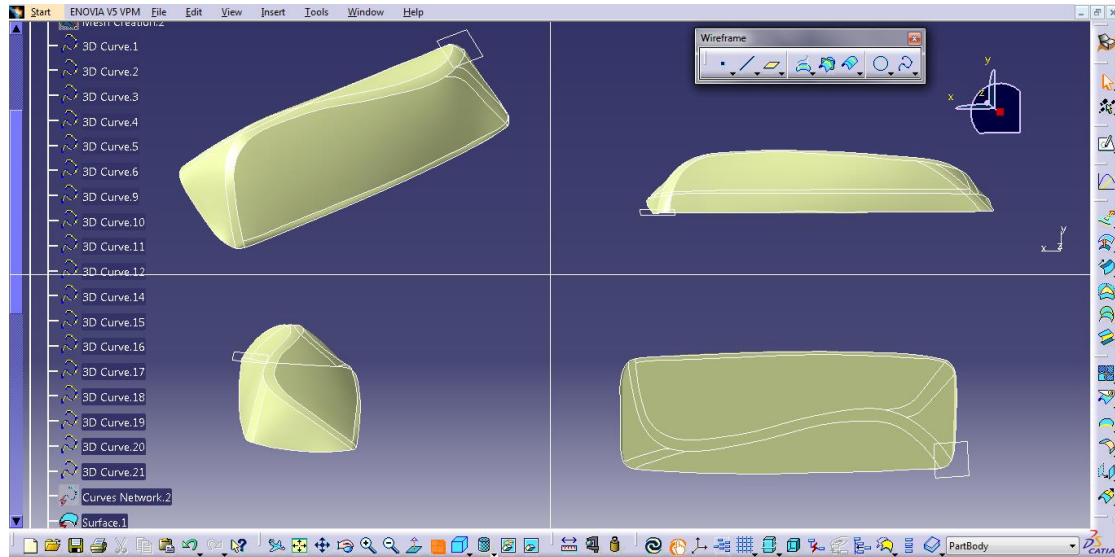
- **Network of curves:** Δημιουργούμε ένα δίκτυο από καμπύλες συνδέοντας όλες τις πιο πάνω γραμμές.



Εικόνα 8.1.15: Εμφάνιση δικτύου καμπυλών

- **Network of surfaces/Creating surfaces by Powerfit:** Κατασκευάζουμε ένα δίκτυο από επιφάνειες με βάση το πιο πάνω δίκτυο καμπυλών. Η επιφάνεια είναι μία και ενιαία αλλά μπορούμε να την δούμε χωρισμένη στα διάφορα τμήματα που σχηματίστηκαν κατά την κατασκευή των καμπυλών του πλέγματος.



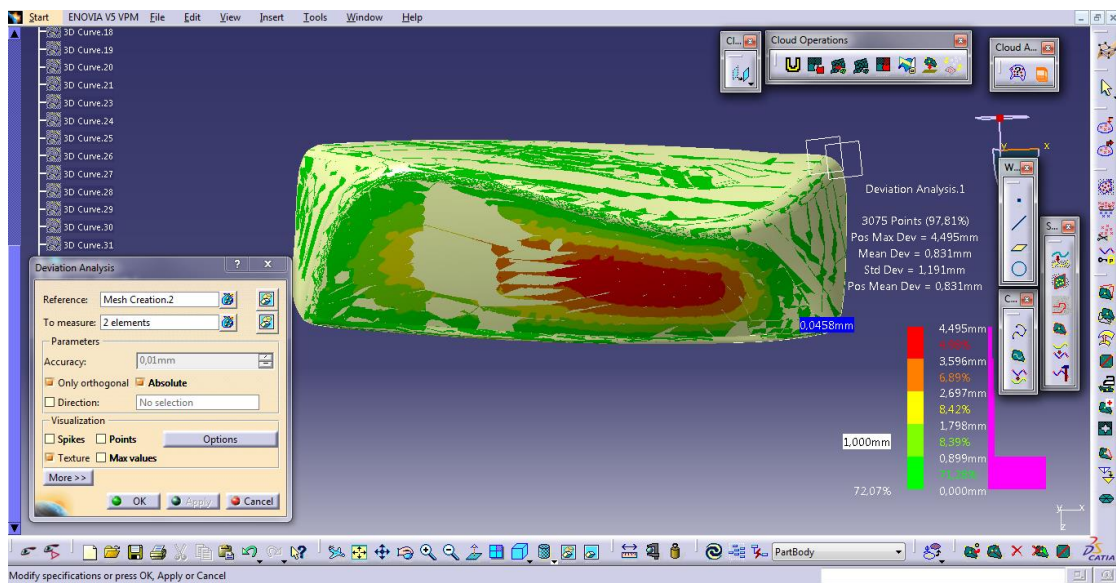


Εικόνα 8.1.16: Οι επιφάνειες που δημιουργήθηκαν από το δίκτυο καμπυλών

Deviation Analysis

Ποσοστό σημείων των επιφανειών που αποκλίνουν από το πλέγμα				
0-0,899mm	0, 899-1,798mm	1,798-2,697mm	2,697-3,596mm	3,596-4,495mm
71,28%	8,39%	8,42%	6,89%	4,98%
Μέγιστη απόσταση απόκλισης = 4,495mm				
72,07% των σημείων είναι εντός ορίων ανοχής				

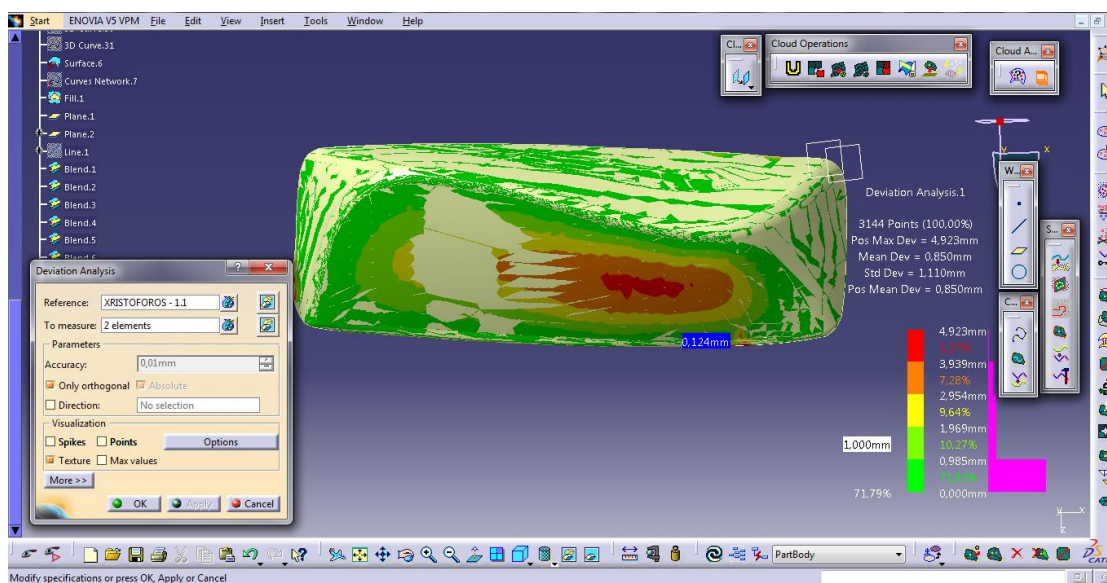
Πίνακας 8.2: Deviation analysis επιφάνειες - πλέγμα



Εικόνα 8.1.17: Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ πλέγματος και επιφανειών

Ποσοστό σημείων των επιφανειών που αποκλίνουν από το νέφος σημείων				
0-0,985mm	0,985-1,969mm	1,969-2,954mm	2,954-3,939mm	3,939-4,923mm
71,53%	10,27%	9,64%	7,28%	1,27%
Μέγιστη απόσταση απόκλισης = 4,923mm				
71,79% των σημείων είναι εντός ορίων ανοχής				

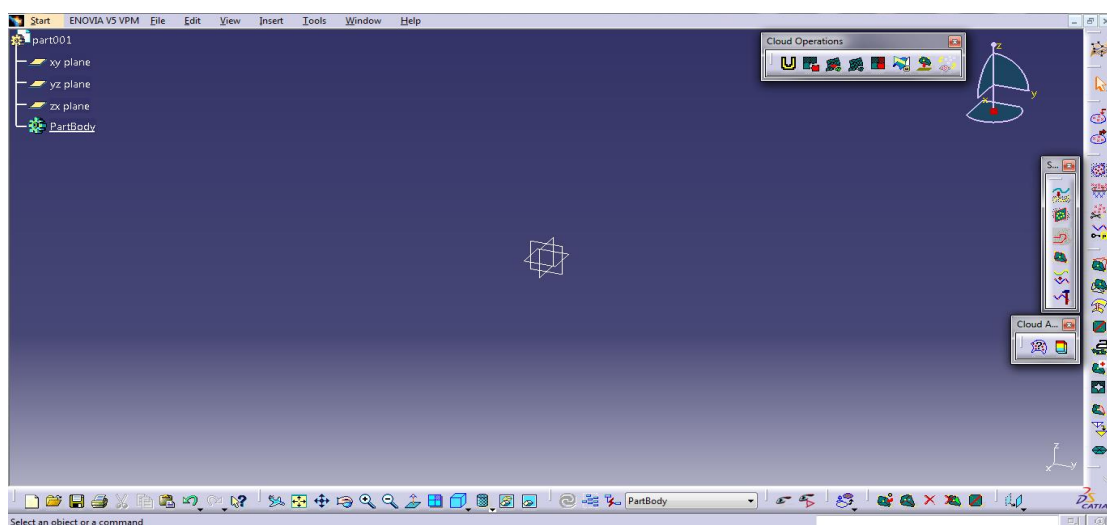
Πίνακας 8.3: Deviation analysis επιφάνειες – νέφος σημείων



Εικόνα 8.1.18: Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ νέφους και επιφανειών

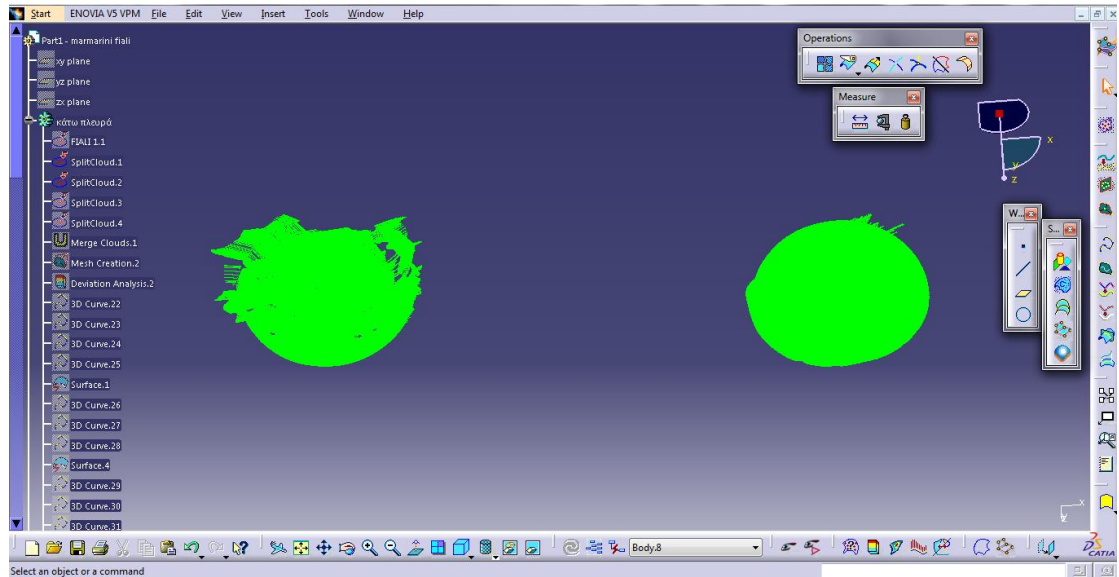
8.2 Μαρμάρινη Φιάλη

Ενεργοποίηση φύλλου εργασίας (workbench) **Digitized Shape Editor**.



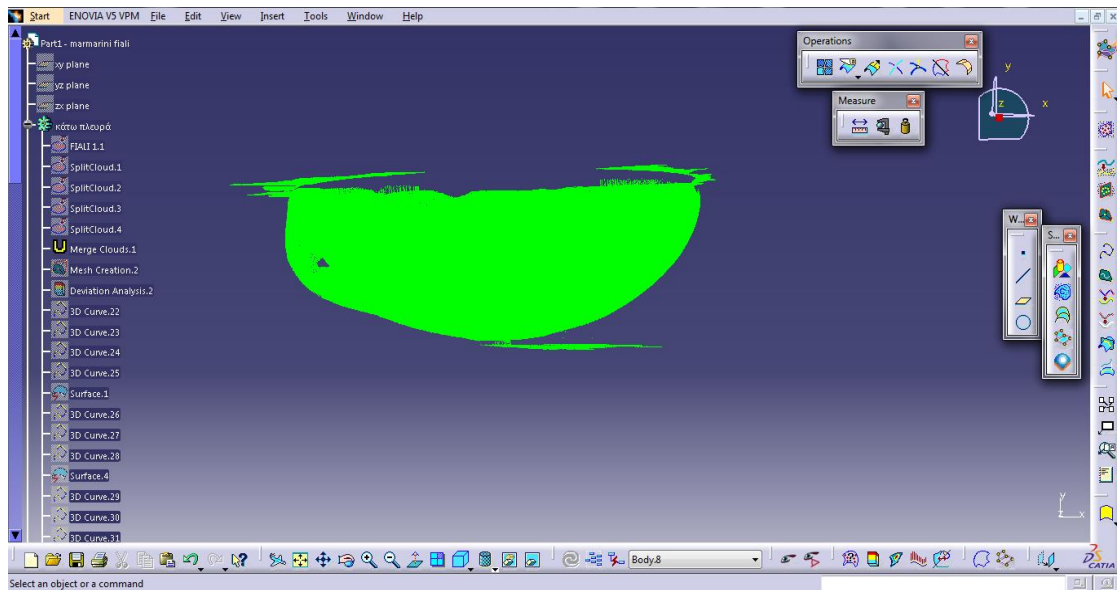
Εικόνα 8.2.1: Workbench QSR

1. **Import:** Εισάγουμε στο λογισμικό το νέφος σημείων. Σε αυτή την εφαρμογή για την σάρωση της φιάλης χρειάστηκαν δύο νέφη σημείων, ένα για την εσωτερική κοιλότητα (πάνω μέρος) και ένα για την εξωτερική κοιλότητα (κάτω μέρος).



Εικόνα 8.2.2: Εισαγωγή των δύο νεφών σημείων στο QSR

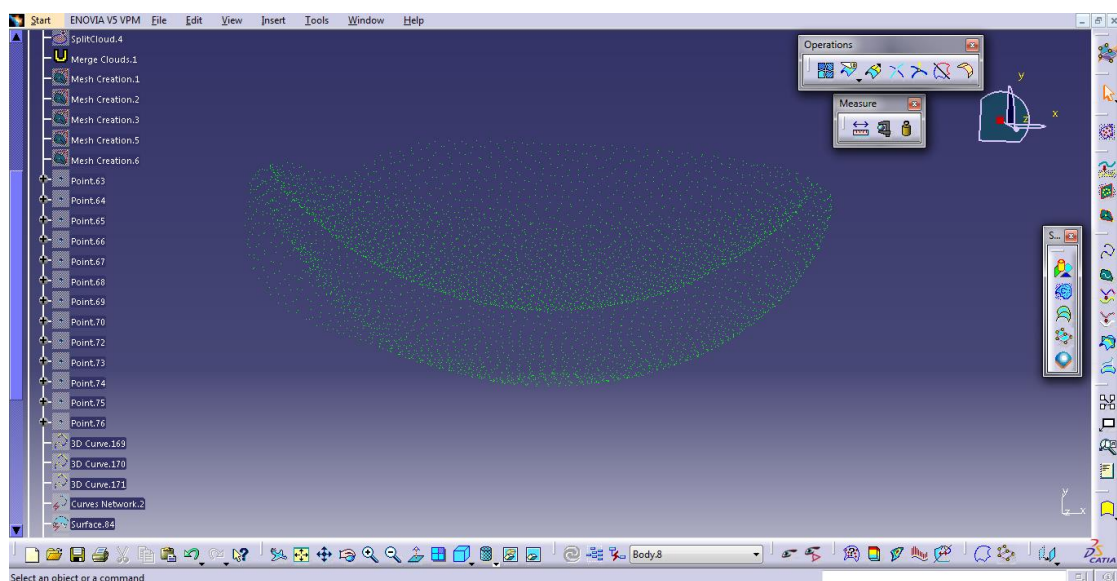
2. **Align:** η εντολή Align χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση δύο ή και περισσότερα νεφών σημείων. Για την ευθυγράμμιση των δύο νεφών στην περίπτωση της μαρμάρινης φιάλης χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός της ευθυγράμμιση με την βοήθεια της πυξίδας και ευθυγράμμιση με καλύτερο ταίριασμα. Πρώτα με τη βοήθεια της πυξίδας ευθυγραμμίσαμε τα νέφη όσο το δυνατό περισσότερο ούτως ώστε στη συνέχεια με την ενεργοποίηση της ευθυγράμμισης με βάση καλύτερο ταίριασμα το λογισμικό να ανιχνεύσει το μέγιστο δυνατό αριθμό κοινών σημείων και ευθυγραμμίσει πλήρως τα δύο νέφη.
3. **Merge Cloud:** γίνεται εφαρμογή της εντολής για να συμπτυχθούν τα δύο νέφη σε ένα.



Εικόνα 8.2.3: Συγχώνευση των δύο σε ένα ενιαίο νέφος σημείων

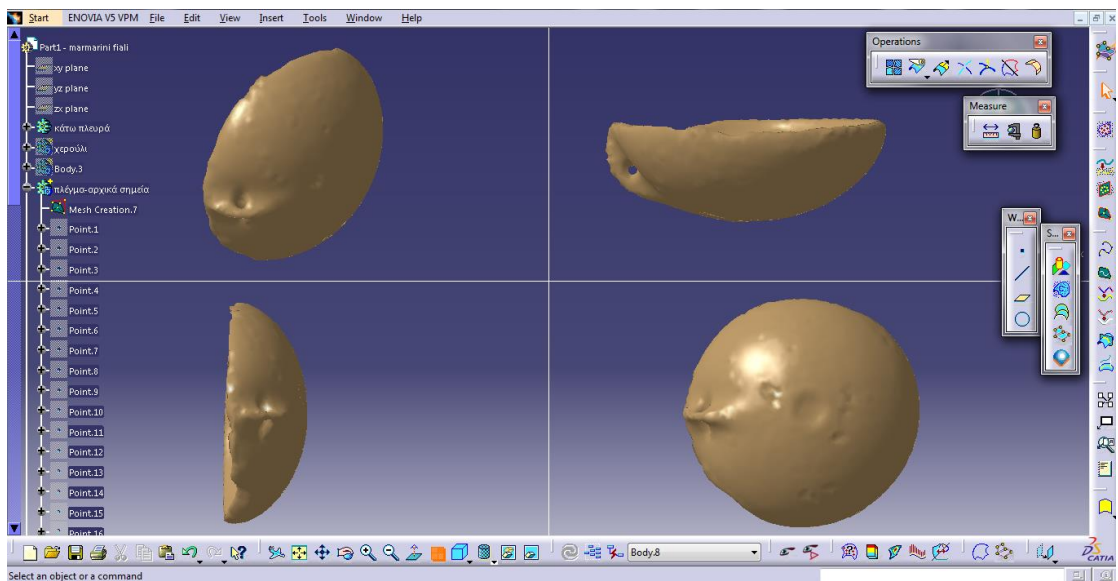
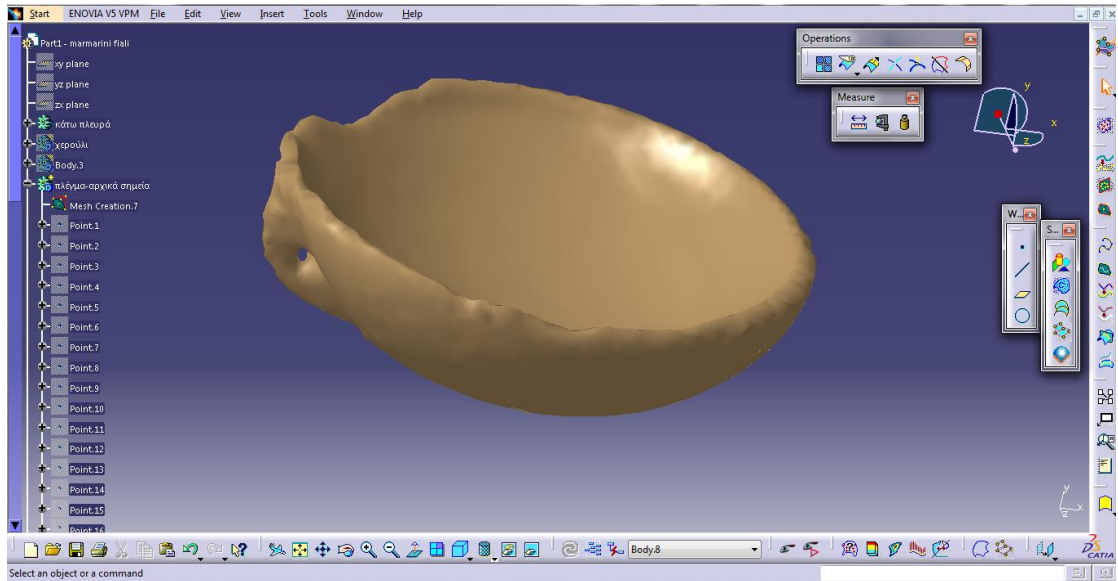
4. **Filter:** Φιλτράρουμε τα σημεία του νέφους κρατώντας ένα μέρος αυτών χωρίς να χάσουμε το σχήμα του νέφους.

Αρχικά είχαμε 8.563.667 (100% αρχικού νέφους) σημεία τα οποία μετά από φιλτράρισμα με Homogeneous radius = 0,008 mm παρέμεινε προς επεξεργασία το 9,615% δηλαδή 823.425 σημεία. Μετά το Merge clouds το ενιαίο πλέον νέφος φιλτράρεται για δεύτερη φορά με Homogeneous radius = 0,1. Έτσι, από τα 823.425 σημεία του ενιαίου νέφους (100% ενιαίου νέφους) έχουν παραμείνει 5155 σημεία δηλαδή ποσοστό 0,626% και μόλις 0,0602% του αρχικού νέφους που εισήχθηκε στο λογισμικό. Παρατηρείται και από την πιο κάτω εικόνα ότι παρέμειναν ενεργά πολύ λίγα σημεία σε σχέση με το πολύ μεγάλο όγκο που συλλέχθηκε από τη σάρωση, παρόλα αυτά όμως, όπως θα δούμε και στη συνέχεια είναι αρκετά για να σχηματιστεί ένα αρκετά καλής ποιότητας πλέγμα και να συνεχιστεί η διαδικασία χωρίς προβλήματα.



Εικόνα 8.2.4: Τελική μορφή νέφους μετά από φιλτράρισμα

5. **Mesh Creator:** για τη δημιουργία του πλέγματος επιλέχθηκε Neighborhood = 0,377 mm και Smooth εμφάνιση.



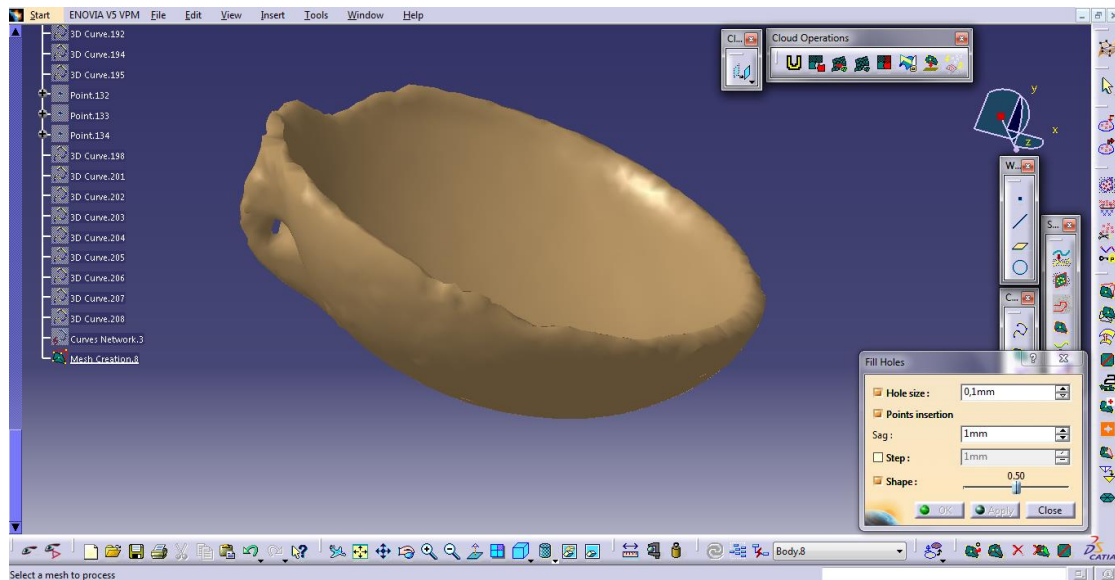
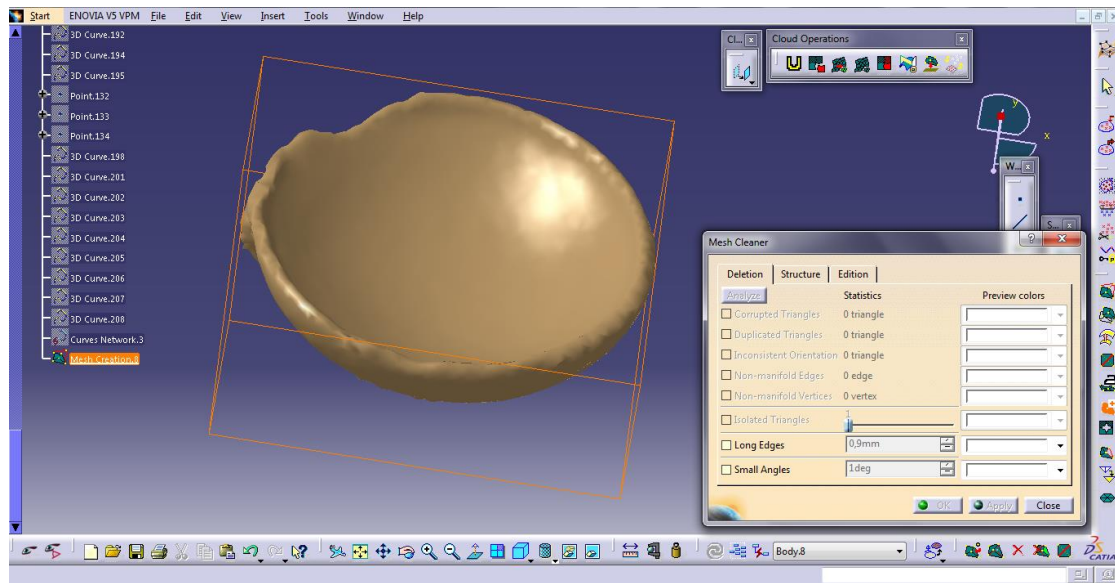
Εικόνα 8.2.5: Κατασκευή του πλέγματος

6. **Remove:** Παράλληλα με την εκτέλεση των πιο πάνω εντολών, αφαιρέθηκαν όλα τα αχρείαστα σημεία του νέφους. Τα περισσότερα από αυτά προέκυψαν λόγω της σύμπτυξης των δύο αρχικών νεφών δηλαδή, σημεία που σαρώθηκαν δύο φορές, μία κατά την σάρωση της εσωτερική κοιλότητας και μία από την εξωτερική κοιλότητα και δεν ανιχνεύθηκαν ως κοινά σημεία σάρωσης κατά τη διαδικασία της ευθυγράμμισης.

7. **Mesh Cleaner:** Ενεργοποιώντας την εντολή εντοπίζονται όλα τα ελαττώματα του πλέγματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν εντοπίστηκε κανένα σφάλμα στο πλέγμα. Η μη ύπαρξη οποιουδήποτε ελαττώματος είναι η πιο

πειστική απόδειξη ότι τα μέχρι τώρα βήματα της διαδικασίας έχουν γίνει σωστά, αρχής γενομένης από τη σάρωση μέχρι και την κατασκευή του πλέγματος.

- corrupted triangles = 0 κατεστραμμένα τρίγωνα
- duplicated triangles = 0 διπλά τρίγωνα
- inconsistent orientation = 0 ασυνεπής προσανατολισμό
- non manifold edges = 0 μη πολλαπλές άκρες
- non manifold vertices = 0 μη πολλαπλές κορυφές



Εικόνα 8.2.6: Εντοπισμός σφαλμάτων και τελική εμφάνιση πλέγματος

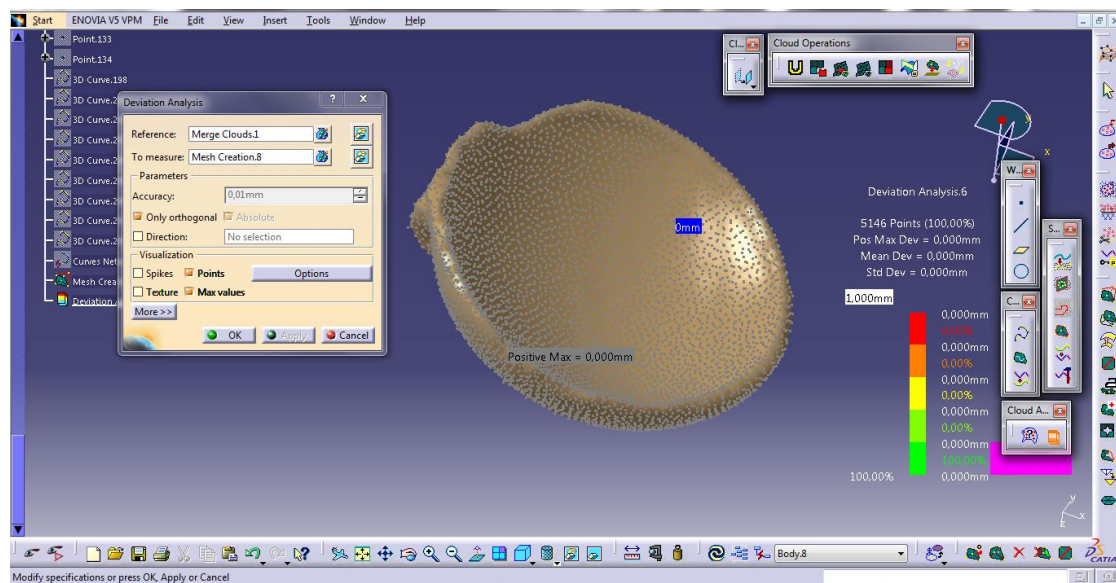
8. Information:

- Number cells = 2
- Number points = 8.563.667
- Number visible points = 5.155
- Number activated points = 823.425
- Number filtered points = 818270
- Dimensions = 5,187mm x 1,91mm x 4,991mm

9. **Deviation Analysis:** Αναλύοντας το πλέγμα σε σύγκριση με το νέφος σημείων παρατηρούμε ότι

Ποσοστό σημείων του πλέγματος που αποκλίνουν από το νέφος σημείων				
0-0,033mm	0,033 -0,65mm	0,65-0,98mm	0,98-0,131mm	0,131-0,163mm
100%	0%	0%	0%	0%
Μεγιστη απόσταση απόκλισης = 0 mm				
100% των σημείων είναι εντός ορίων ανοχής				

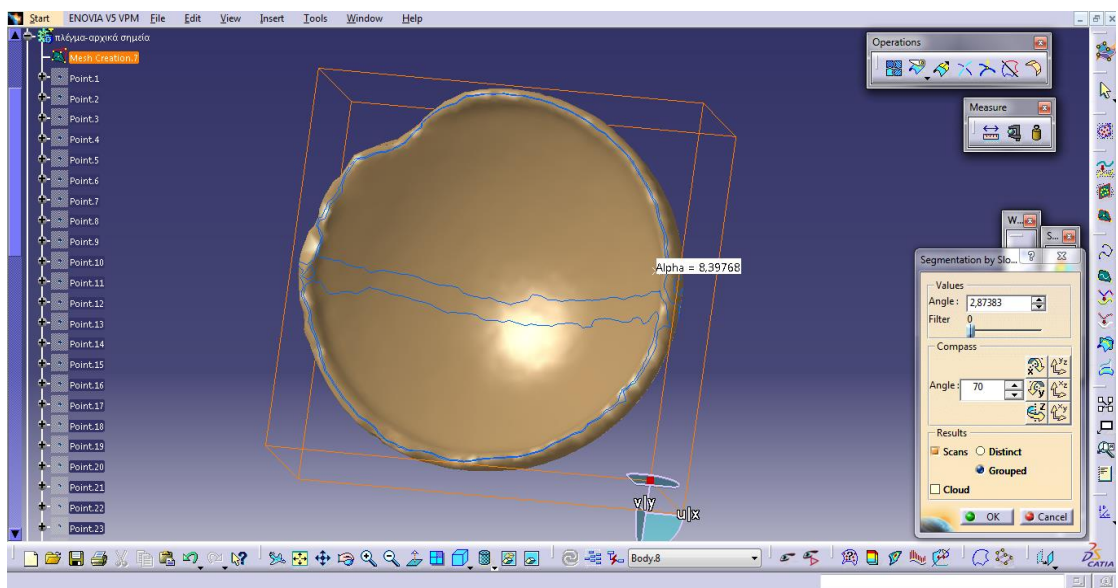
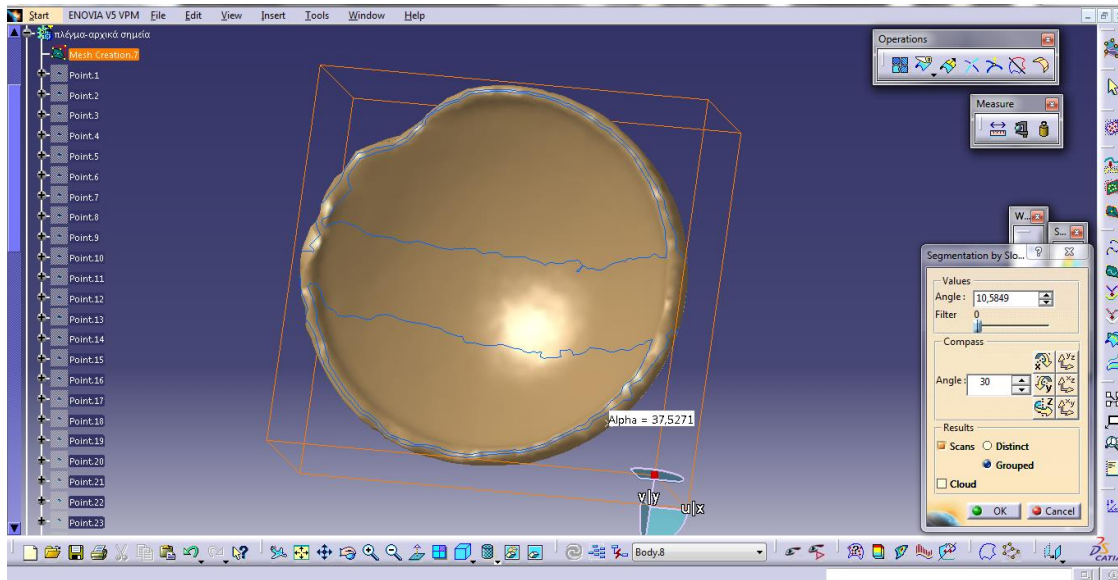
Πίνακας 8.4: Deviation analysis πλέγμα – νέφος σημείων



Εικόνα 8.2.7: Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ ενιαίου νέφους και πλέγματος

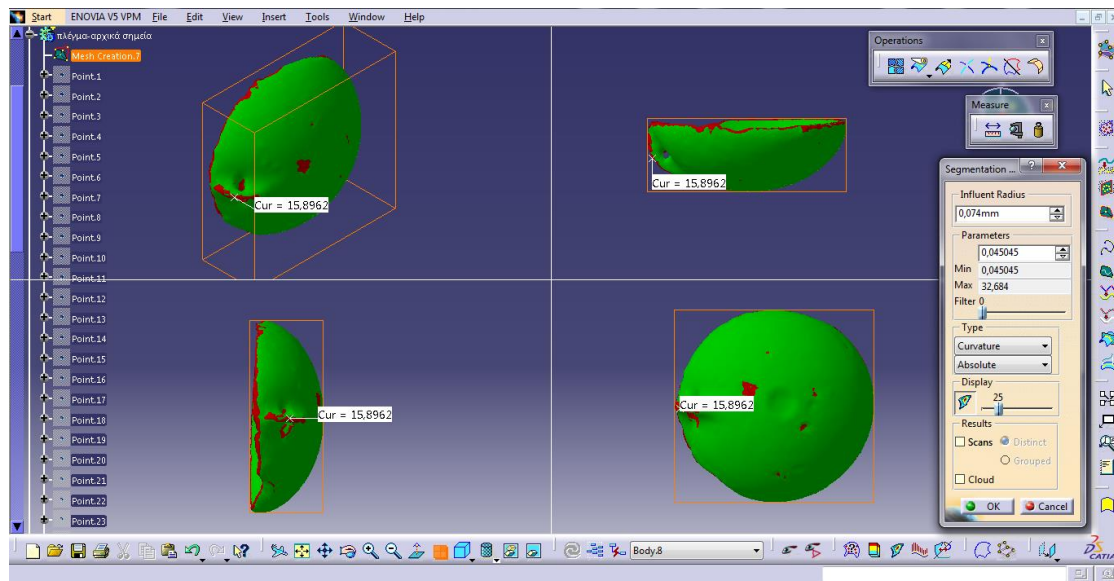
Ενεργοποίηση φύλλου εργασίας (workbench) **Quick Surface Reconstruction**.

10. Segmentation by slope: Χρησιμοποιώντας αυτή την εντολή μας παρουσιάζονται γραφικά στο πλέγμα καμπύλες ανάλογα με την καμπυλότητα του αντικειμένου. Στη περίπτωση της μαρμάρινης φιάλης η συγκεκριμένη εντολή δεν φάνηκε ιδιαίτερα βοηθητική γεγονός που μετέτρεψε την κατασκευή των καμπυλών σε πολύ δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία.



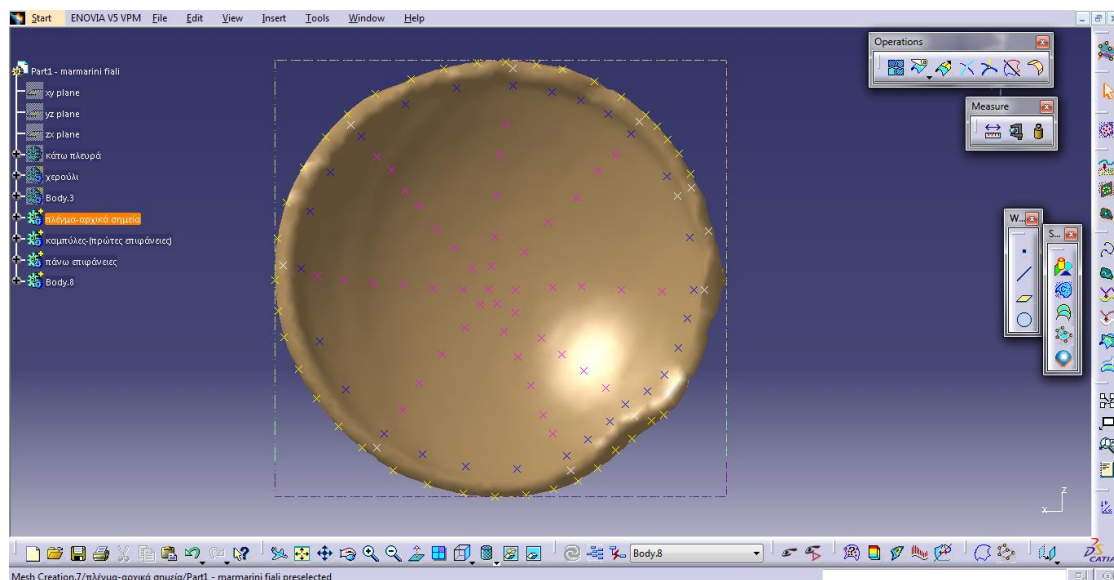
Εικόνα 8.2.8: Segmentation by slope με κλίση 30 και 70 μοιρών

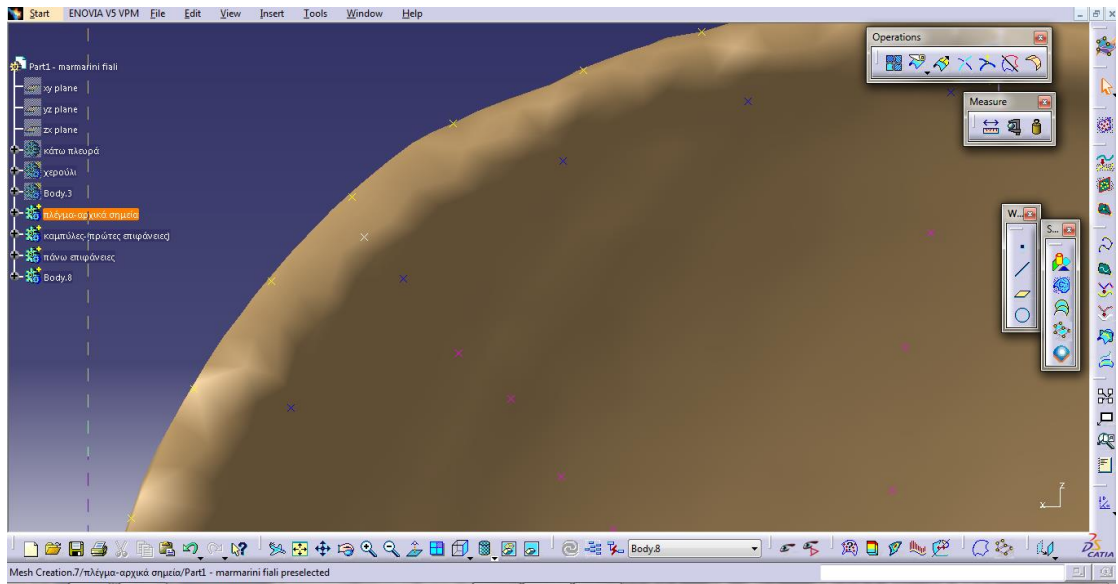
11. Segmentation by curvature:



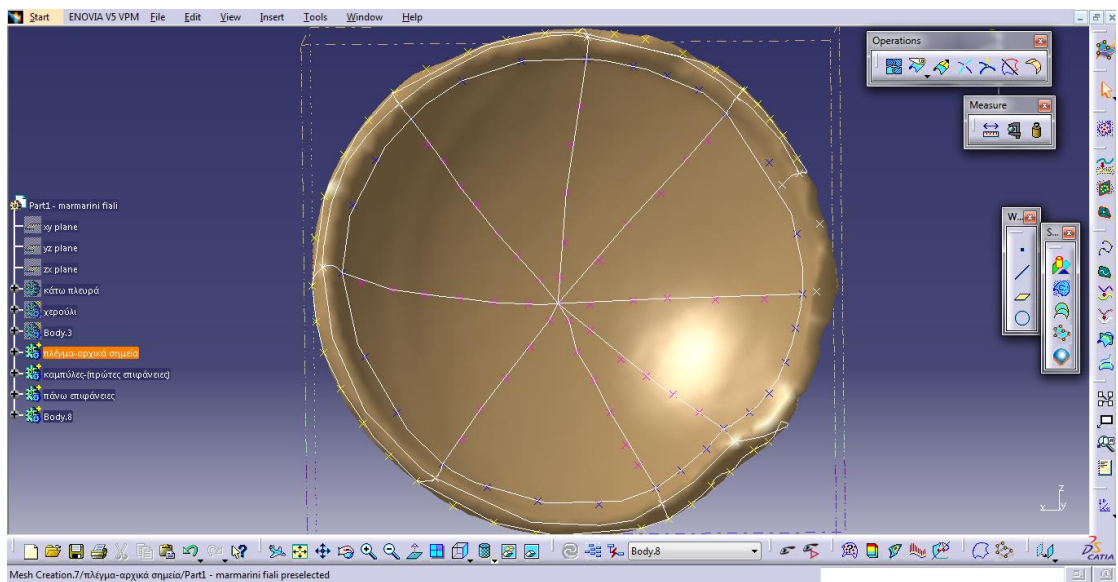
Εικόνα 8.2.9: Εμφάνιση αποτελεσμάτων από Segmentation by curvature

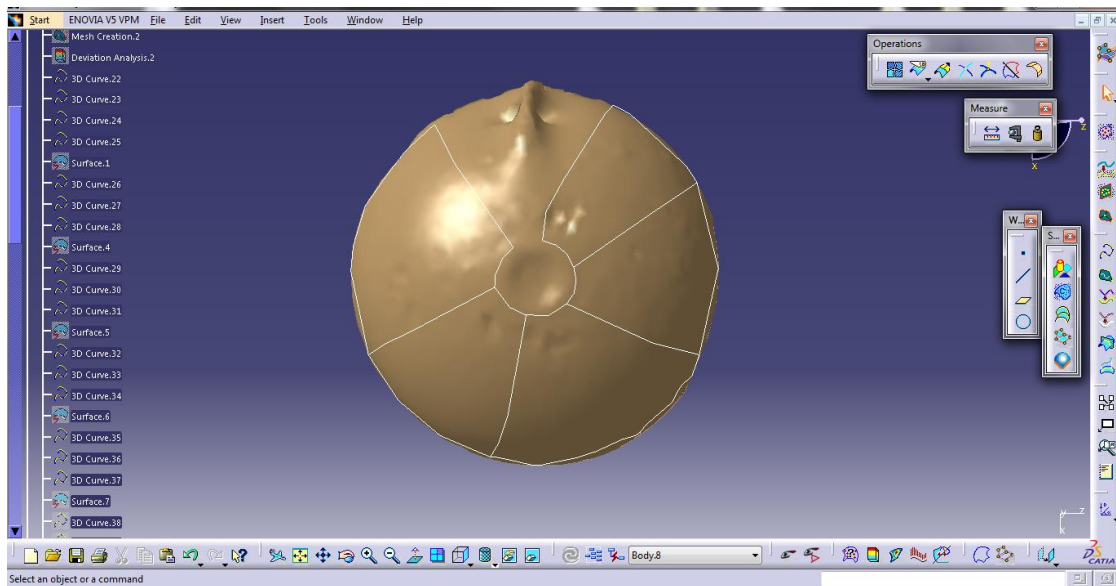
12. 3D curves/ Curves on mesh: Σχεδιάζουμε τις καμπύλες στο πλέγμα χωρίζοντας το σε τμήματα. Η ιδιαιτερότητα σε σχέση με την αντίστοιχη εντολή στην εφαρμογή του πλαστικού πλυντηρίου είναι ότι αρχικά σχηματίστηκαν τα τμήματα με την προσθήκη εξωτερικών σημείων στο πλέγμα.





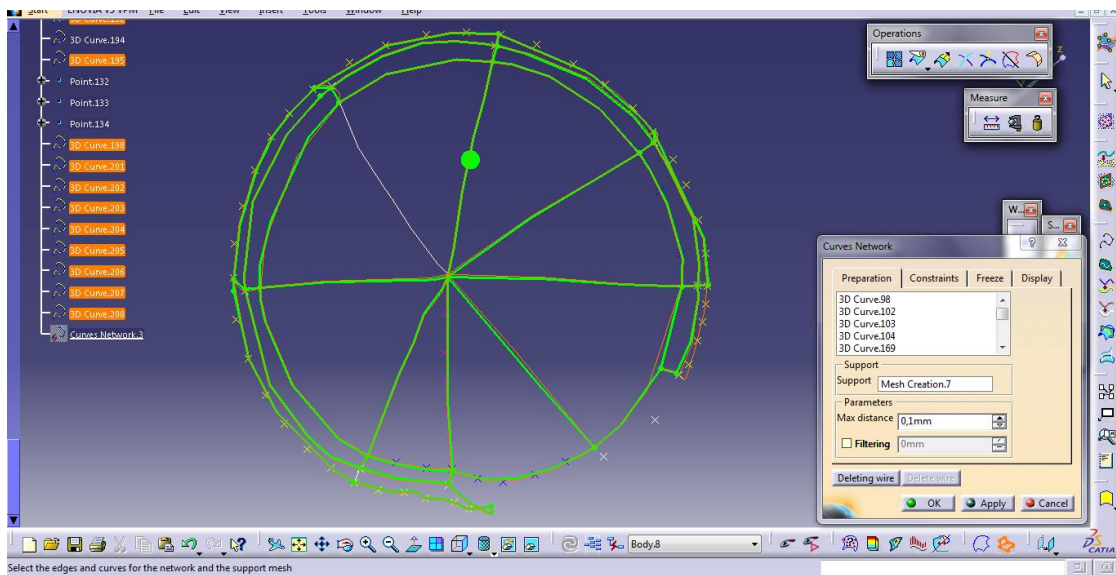
Εικόνα 8.2.10: Προσθήκη εξωτερικών σημείων στο πλέγμα





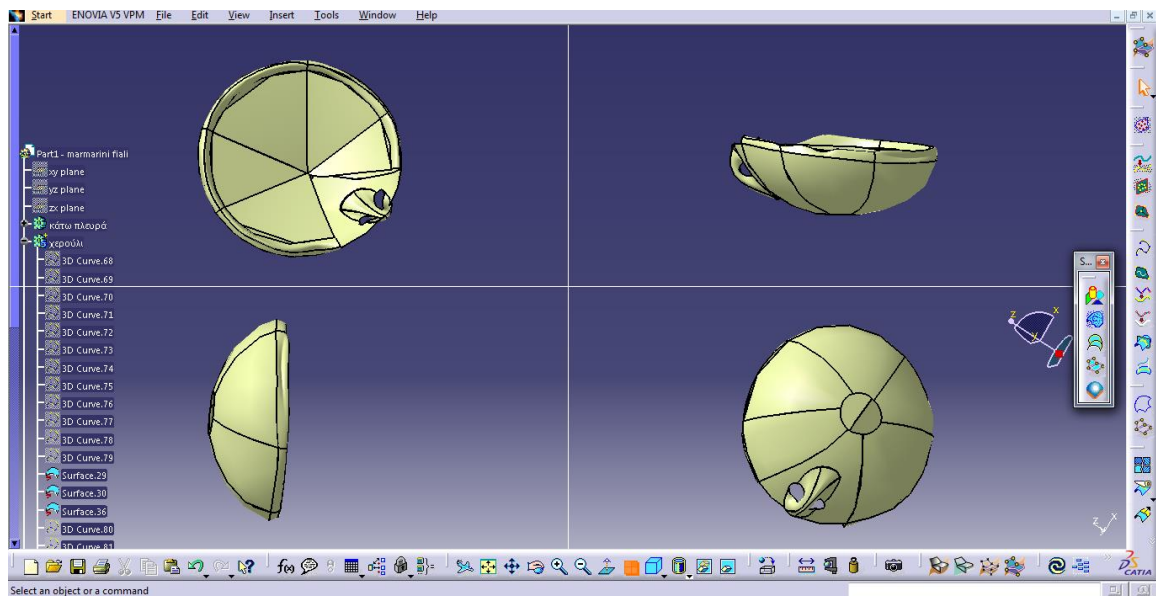
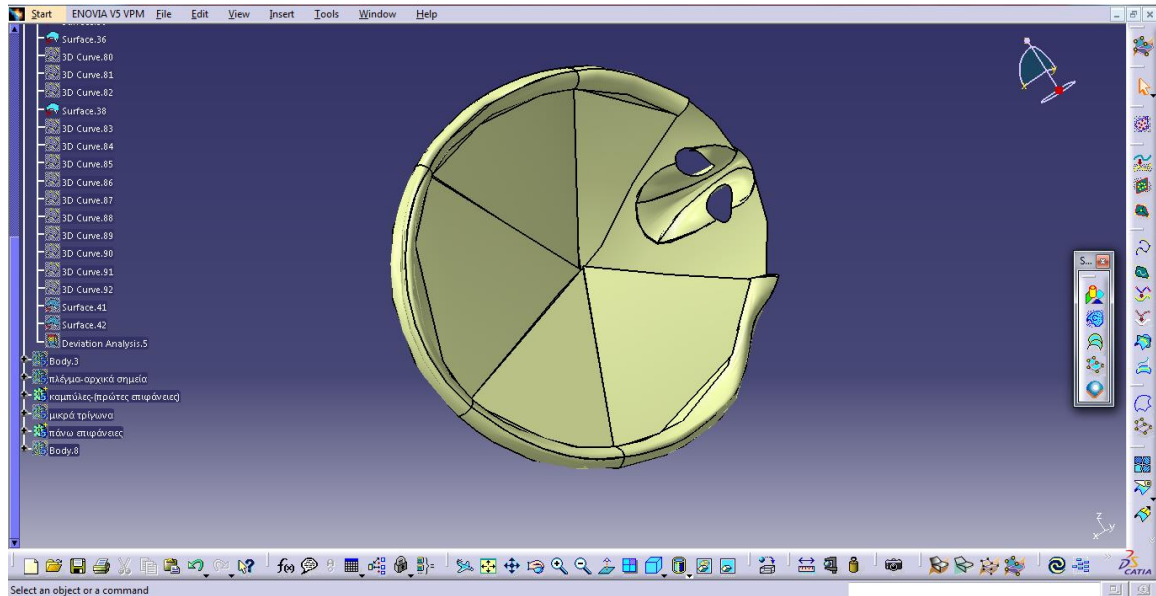
Εικόνα 8.2.11: Κατασκευή καμπυλών στο πλέγμα

- 1. Network of curves:** Δημιουργούμε ένα δίκτυο από καμπύλες συνδέοντας όλες τις πιο πάνω καμπύλες.



Εικόνα 8.2.12: Τελικό δίκτυο καμπυλών

- 13. Network of surfaces/Creating surfaces by Powerfit:** Δημιουργούμε ένα δίκτυο από επιφάνειες με βάση το δίκτυο καμπυλών και παράλληλα επιλέγεται η σύνδεση γειτονικών επιφανειακών χώρων σε σύνδεση σημείου ή εφαπτομενική σύνδεση.

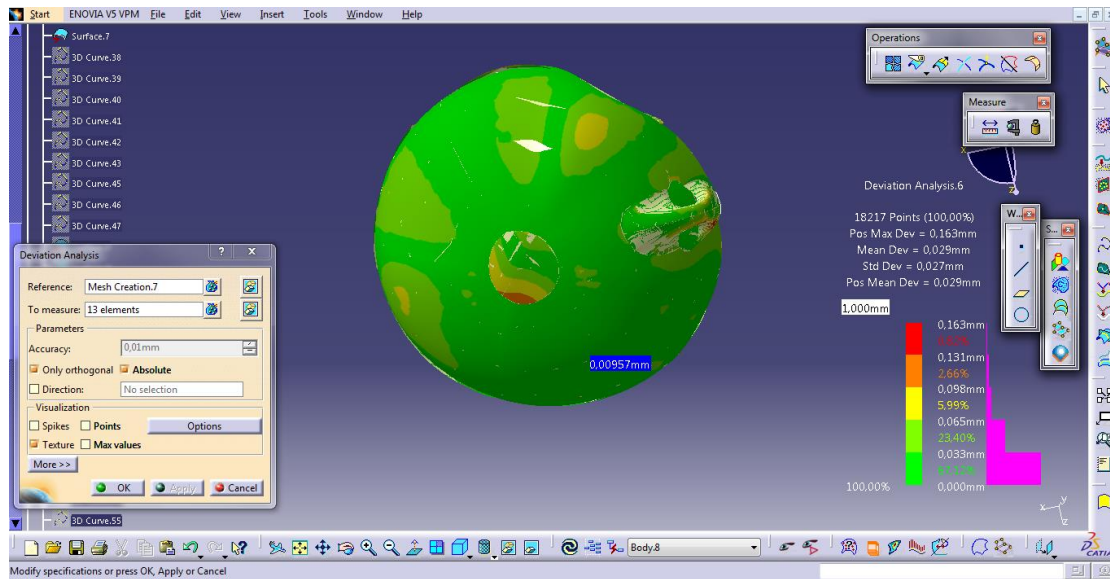


Εικόνα 8.2.13: Οι επιφάνειες που δημιουργήθηκαν από το δίκτυο καμπυλών

Deviation Analysis

Ποσοστό σημείων των επιφανειών που αποκλίνουν από το πλέγμα				
0-0,033mm	0,033-0,065mm	0,065-0,098mm	0,098-0,131mm	0,131-0,163mm
67,12%	23,40%	5,99%	2,66%	0,82%
Μέγιστη απόσταση απόκλισης = 0,163mm				
72,07% των σημείων είναι εντός ορίων ανοχής				

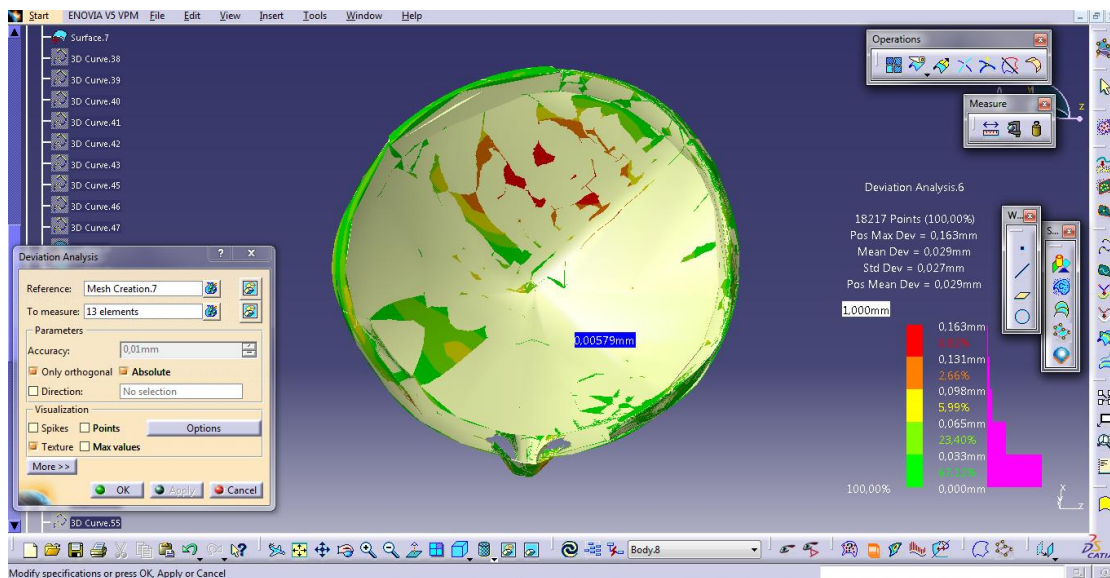
Πίνακας 8.5: Deviation analysis επιφάνειες - πλέγμα



Εικόνα 8.2.14: Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ επιφανειών και πλέγματος

Ποσοστό σημείων των επιφανειών που αποκλίνουν από το νέφος				
0-0,033mm	0,033-0,065mm	0,065-0,098mm	0,098-0,131mm	0,131-0,163mm
67,9%	23,40%	6,1%	2,4%	0,2%
Μέγιστη απόσταση απόκλισης = 0,163mm				
100% των σημείων είναι εντός ορίων ανοχής				

Πίνακας 8.6: Deviation analysis νέφος σημείων - επιφάνειες



Εικόνα 8.2.15: Σύγκριση αποκλίσεων μεταξύ νέφους και επιφανειών

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα & Προοπτικές Διπλωματικής Εργασίας

9.1 Συμπεράσματα Δ. Ε.

- Η πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε μέσω των εφαρμογών της ΔΕ σχετικά με το κατά πόσο είναι δυνατή και σε ποιο βαθμό, η 3D-CAD μοντελοποίηση ενός πραγματικού αντικειμένου με βάση τις αρχές του ΑΜΣ και με την αποκλειστική χρήση του λογισμικού πακέτου CATIA αξιολογείται καταρχήν θετικά.
- Τα εργαλεία και οι εντολές που διατίθενται στον χρήστη από τα δύο workbenches που εξετάστηκαν αξιολογούνται ως εύχρηστα, προσφέρουν υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και δυνατότητα εξαγωγής 3D-CAD μοντέλων με υψηλή πιστότητα/ ακρίβεια ως προς το αρχικό νέφος σημείων, που αποτελεί κατά κανόνα σε εφαρμογές ΑΜΣ τη μόνη διαθέσιμη βάση σύγκρισης.
- Η διαδικασία, παρόλο που είναι ήδη αρκετά αυτοματοποιημένη, απαιτεί σε κρίσιμα σημεία την ουσιαστική παρέμβαση και λήψη αποφάσεων από τον χρήστη. Ειδικά για την επιτυχή αντιμετώπιση περίπλοκων/ σύνθετων εφαρμογών, η εμπειρία του χρήστη εξακολουθεί να έχει καθοριστική σημασία για το τελικό αποτέλεσμα.

9.2 Κατευθύνσεις/ Προτάσεις για την συνέχεια της Δ.Ε

[Προτεινόμενο μέγεθος: 2-4 σελ.]

- 3D-CAD σχεδίαση των ίδιων αντικειμένων που αποτέλεσαν τις Εφαρμογές της ΔΕ με 2 ή και 3 διαφορετικά λογισμικά (π.χ. *Geomagic Studio, Polyworks, Rapidform*) και σύγκριση αποτελεσμάτων για αντιπαραβολή τους ως προς την καταλληλότητα για προβλήματα ΑΜΣ.
- Περαιτέρω μελέτη/έρευνα στο στάδιο της κατασκευής καμπυλών (καταλληλότερα σημεία, πυκνότητα εμφάνισης τους, τρόπος δημιουργίας).

Βιβλιογραφία

Yadong Li, Peihua Gu

Free-form surface inspection techniques state of the art review

Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary,
Calgary, Alberta, Canada T2N 1N4, 15 August 2003

Rocco Ascione and Wilma Polini

Measurement of non rigid freeform surfaces by coordinate measuring machine

1 May 2010

Charyar Mehdi-Souzani and Claire Lartigue

Part surfaces 3D Digitising (An approach to accurate characteristic lines
measurements)

Université Paris-Sud,

Kaisarlis, G.J., Diplaris, S.C. and Sfantsikopoulos, M.M.

Identifying and Quantifying accuracy requirements for cultural heritage digital 3D
object documentation, Proc. of ITECOM Conference

Athens, Greece, 16 – 17 Dec. 2003

Kaisarlis, G.J., Diplaris, S.C. and Sfantsikopoulos, M.M.

Size scale in 3D Digital Documentation of cultural heritage objects, Proc. of 6th
International Conference for MESOMECHANICS

Patras, Greece, May 31 – June 4, 2004

Θ. Βασιλόπουλος

Αντίστροφος Σχεδιασμός Αντικειμένων Πολύπλοκης

Γεωμετρίας σε περιβάλλον CMM – CAD

Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ 2003.

F. Bernardini, H. E. Rushmeier, I. M. Martin, J. Mittleman, G. Taubin,

Building a digital model of Michelangelo's Florentine Pieta, IEEE Computer
Graphics and Applications, 2002.

F. Berardini H. Rushmeier. The 3D Model acquisition pipeline,

Computer Graphics Forum, June 2002.

Tim Lemmon, Tank Inspection and Calibration with 3D Laser scanning

RMIT University, Melbourne, Australia, October 2011.

<http://www.3ds.com>

<http://www.3dcadforums.com>

<http://www.faro.com>

<http://www.iso.org>