



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ & ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΠΛΟΙΩΝ”

ΓΙΑΝΝΙΣΗ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΤΖΑΜΠΙΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ,
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2018

Αθήνα, Ιούλιος 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους συνέβαλλαν στη δημιουργία αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα ξεκινήσω με τον επιβλέποντα Καθηγητή Γεώργιο Δ. Τζαμπίρα, τον οποίο ευχαριστώ για την ευκαιρία που μου προσέφερε να ασχοληθώ με την υλοποίηση προτύπων σκαφών, όπως και να συνεργαστώ με τα μέλη του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ).

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, για την ηθική και όχι μόνο συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Το σημερινό αποτέλεσμα δεν θα ήταν το ίδιο χωρίς τη συνεισφορά τους.

Τέλος, οφείλω πολλά «ευχαριστώ» στον κο Δημήτριο Ε. Λιαροκάπη, Γεώργιο Π. Μυλωνά, Ιωάννη Π. Τραχανά, Φώτη Ε. Κασάπη, όπως και τα υπόλοιπα μέλη του ΕΝΘΥ, γιατί η συνεργασία μαζί τους μου υπόδειξε την ουσία της παρακάτω ρήσης:

*να εύχεσαι να ναι μακρύς ο δρόμος,
γεμάτος περιπέτειες, γεμάτος γνώσεις.*

Ιθάκη, Κ.Π. Καβάφης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ & ΠΙΝΑΚΩΝ	7
1. ΣΤΟΧΟΣ.....	8
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
2.1. Παραγωγή προτύπων πλοίων	11
2.2. Παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής.....	14
2.3. Σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής	24
3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CAD-CAM.....	31
3.1. Χρήση συστημάτων CAD-CAM στην παραγωγή προτύπων πλοίων.....	31
3.2. Rhinoceros 3D	32
3.3. Μαθηματικό υπόβαθρο	33
4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ	39
4.1. Διαχείριση κατασκευαστικών σχεδίων.....	39
4.2. Επεξεργασία καμπυλών στο περιβάλλον CAD	42
4.3. Παρεμβολή επιφάνειας.....	55
5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ.....	59
5.1. Από τη σχεδίαση (CAD) στην κατασκευή (CAM).....	59
5.2. Προσομοίωση κοπής.....	61
5.3. Παραγωγή ιστιοπλοϊκού μοντέλου	63
5.4. Εναλλακτικός τρόπος κατασκευής προτύπων πλοίων.....	65
6. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (ΛΕΙΑΝΣΗ-ΒΑΦΗ)	70
7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	72
7.1. Πρότυπο ιστιοπλοϊκού σκάφους.....	72
7.2. Πρότυπο φορτηγού πλοίου χύδην (bulk carrier).....	74
7.3. Εναλλακτικός τρόπος κατασκευής ιστιοπλοϊκού σκάφους	76
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	78
9. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	80
9.1. Τριγωνοποίηση.....	80
9.2. Αυτοματοποίηση - Παραμετροποίηση.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Τοποθέτηση νομέων	15
Εικόνα 2.2: Πέτσωμα	16
Εικόνα 2.3: Στρώση υαλονήματος στο εσωτερικό της γάστρας.....	17
Εικόνα 2.4: Συνδέσεις επιπέδων με ξύλινους πύρους	18
Εικόνα 2.5: Ένωση σανίδων για τη δημιουργία οριζόντιων επιπέδων	19
Εικόνα 2.6: Συναρμολόγηση επιπέδων	19
Εικόνα 2.7: Επιφάνεια μοντέλου μετά τη βαφή.....	21
Εικόνα 2.8: Πατρόν νομέων	22
Εικόνα 2.9: Χάραξη ισάλων και νομέων.....	23
Εικόνα 2.10: Σχεδίαση τρισδιάστατου μοντέλου σ CAD.....	24
Εικόνα 2.11: Παραγωγή διαδρομής σε CAM για την κατεργασία κοπής	25
Εικόνα 2.12: Εφαρμογή G-Code για την εύρεση του κέντρου κοπής	26
Εικόνα 2.13: Κοπτικά εργαλεία	27
Εικόνα 2.14: Χρήση ρομποτικού βραχίονα.....	28
Εικόνα 2.15: Χειροκίνητη κοπή βάσει του σχεδίου ισάλων	28
Εικόνα 2.16: Χάραξη ισάλων στο μοντέλο μέσω μηχανής CNC.	29
Εικόνα 2.17: CNC μηχανή για την παραγωγή μοντέλων στο ENΘΥ.....	30
Εικόνα 3.1: Περιβάλλον εργασίας Rhinoceros 3D 5 (CAD).....	32
Εικόνα 3.2: Τετραγωνική (a) και κυβική (b) spline με διπλό κόμβο στο κυκλωμένο σημείο.	37
Εικόνα 3.3: B-Spline διγραμμική (a), διτετραγωνική (b) και διτετραγωνική με τρεις κόμβους σε μια διεύθυνση	38
Εικόνα 4.1: Στάδια ψηφιοποίησης σχεδίων.....	40
Εικόνα 4.2: Αλλαγή κορεσμού (Adobe Photoshop).....	40
Εικόνα 4.3: Χρήση Image Trace (Adobe Illustrator).....	41
Εικόνα 4.4: Γραμμή αναφοράς (Baseline).....	42
Εικόνα 4.5: Εισαγωγή αρχείου νομέα	43
Εικόνα 4.6: Μετακίνηση στη Γραμμή Αναφοράς	44
Εικόνα 4.7: Αντιγραφή σε δεύτερο layer.....	45
Εικόνα 4.8: Απόκλιση των δύο πλευρών.....	45
Εικόνα 4.9: Αφαίρεση τμήματος πάνω από το κοίλο.....	46
Εικόνα 4.10: Ανακατασκευή καμπύλης νομέα.....	47

Εικόνα 4.11: Χειροκίνητη εξομάλυνση καμπύλης.....	48
Εικόνα 4.12: Σύνδεση τμημάτων με συνέχεια κλίσης	49
Εικόνα 4.13: Έλεγχος απόκλισης εξομαλυμένης (πράσινη) από το πρωτότυπο (μαύρη)	50
Εικόνα 4.14: Περιστροφή νομέα κατά 90°	51
Εικόνα 4.15: Μτακίνηση νομέα στη γραμμή αναφοράς.....	51
Εικόνα 4.16: Τομή επιπέδου z=0 με τους νομείς και το προφίλ	52
Εικόνα 4.17: Παρεμβολή ισάλων από τα δεδομένα σημεία των νομέων	53
Εικόνα 4.18: Διασφάλιση επαφής νομέα και ισάλου	54
Εικόνα 4.19: Διαίρεση ακμής πυθμένα.....	56
Εικόνα 4.20: Δημιουργία της επιφάνειας, μεταξύ των ακμών του νομέα 9 και του παράλληλου τμήματος.....	57
Εικόνα 4.21: Ανάλυση καμπυλότητας της επιφάνειας (ZEBRA).....	58
Εικόνα 4.22: Ανάλυση καμπυλότητας της επιφάνειας (CURVATURE ANALYSIS)	58
Εικόνα 5.1: Δημιουργία stock (bounding - box) στο περιβάλλον CAM.....	59
Εικόνα 5.2: Κατεργασία roughing στο CAM.....	60
Εικόνα 5.3: Κατεργασία finishing στο CAM	61
Εικόνα 5.4: Προσομοίωση κατεργασίας roughing στην περιοχή του βολβού της πλώρης και στην πλήμνη της πρύμνης.....	61
Εικόνα 5.5: Εργαλεία μηχανής CNC (ENΘΥ).....	62
Εικόνα 5.6: Περιβάλλον εργασίας ελεγκτή Mach 3	63
Εικόνα 5.7: Δυνατότητα παρέμβασης στη διαδικασία κοπής από το μενού του ελεγκτή	65
Εικόνα 5.8: Συναρμολόγηση οριζόντιων επιπέδων	66
Εικόνα 5.9: Χρήση βάσης κατά την κοπή οριζόντιου επιπέδου της γάστρας.....	67
Εικόνα 5.10: Συγκράτηση τεμαχίου στη βάση μέσω βιδών	67
Εικόνα 5.11: Διεργασία φινιρίσματος στο εσωτερικό οριζόντιου επιπέδου	68
Εικόνα 5.12: Διεργασία φινιρίσματος στο περίβλημα της γάστρας.....	69
Εικόνα 6.1: Εφαρμογή υποστρώματος στο εξωτερικό της γάστρας.....	70
Εικόνα 6.2: Ολοκλήρωση κατασκευής	71
Εικόνα 7.1: Μοντέλο ιστιοπλοϊκού σκάφους μετά την κοπή.....	72
Εικόνα 7.2: Τελική επιφάνεια προτύπου για το ιστιοπλοϊκό BOC-50	74
Εικόνα 7.3: Τελική επιφάνεια προτύπου για το φορτηγό “Olympic Peace”	75
Εικόνα 7.4 : Επίστρωση υαλονήματος και ρητίνης στην επιφάνεια του μοντέλου	77

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ & ΠΙΝΑΚΩΝ

Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής εργασίας	10
Πίνακας 1: Κύριες διαστάσεις ιστιοπλοϊκού σκάφους.....	73
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά πλοίου τύπου bulk-carrier	75

1. ΣΤΟΧΟΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εφαρμογή λογισμικού για τη σχεδίαση και κατασκευή προτύπων πλοίων. Τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για πειραματικούς σκοπούς και οι διαστάσεις τους οφείλουν να βρίσκονται εντός των τιθέμενων ορίων από την ITTC. Ειδικότερα, στόχο αποτελεί η επίτευξη απόκλισης μικρότερης του ενός χιλιοστού σε κάθε διάσταση του μοντέλου, αναφορικά με το σχέδιο γραμμών του πλοίου. Η παρούσα σχεδιαστική μέθοδος προτείνεται σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ), το οποίο διαθέτει μηχανή αυτόματης κοπής μοντέλων (CNC), προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της πειραματικής διαδικασίας. Στην περίπτωση μας, έγινε χρήση του λογισμικού CAD-CAM Rhinoceros 5, καθώς και του ελεγκτή MACH 3 mill για τη μηχανή CNC.

Η προτεινόμενη μέθοδος σχεδίασης και κατασκευής μοντέλων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- I. Εισαγωγή των σχεδιαστικών γραμμών από τα κατασκευαστικά σχέδια στο περιβάλλον CAD.
- II. Μοντελοποίηση στο περιβάλλον CAD. Εξομάλυνση των σχεδιαστικών γραμμών και δημιουργία της γεωμετρίας της γάστρας.
- III. Χρήση λογισμικού CAM για την μετατροπή του 3D μοντέλου σε κώδικα μηχανής G-code.
- IV. Κατασκευή προτύπου με χρήση CNC μηχανής.
- V. Επιφανειακή κατεργασία λείανσης και βαφής προτύπου

Κατά την εκτέλεση των παραπάνω σταδίων, γίνεται αντιληπτό πως η ακρίβεια στην κατασκευή των μοντέλων εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων. Λόγω αυτών προκύπτει η δυσκολία στην τήρηση των προδιαγραφών της ITTC, η οποία εμφανίζεται ήδη από το στάδιο σχεδίασης. Ωστόσο, το πόρισμα από την εφαρμογή της διαδικασίας σε δύο τύπους πλοίων, επιβεβαιώνει πως είναι δυνατή η κατασκευή ενός μοντέλου εντός των επιτρεπτών ορίων και σε σχετικά μικρό χρόνο. Επιπροσθέτως, οι διαφορετικές προσεγγίσεις και τα σύγχρονα υλικά διευρύνουν τις δυνατότητες στη δημιουργία μη συμβατικών κατασκευών.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει μια συνοπτική παρουσίαση της διαδικασίας παραγωγής προτύπων πλοίων για πειραματικούς σκοπούς. Πιο συγκεκριμένα, επισημαίνονται οι δυσκολίες που συναντώνται κατά τη διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής, όπως προβλέπεται βάσει των δεδομένων προδιαγραφών της ITTC (1). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια αναφορά στις παραδοσιακές τεχνικές παραγωγής προτύπων πλοίων και αναλύονται διεξοδικότερα οι επικρατέστερες. Ακολουθεί η παράθεση των σύγχρονων μεθόδων που εφαρμόζονται σήμερα στην κατασκευή προτύπων πλοίων.

Έχοντας αναφέρει τις πιο διαδεδομένες τεχνικές παραγωγής, στο επόμενο κεφάλαιο επικεντρωνόμαστε στην εφαρμογή των συστημάτων CAD-CAM στη διαδικασία σχεδίασης. Ειδικότερα, εστιάζουμε στη λειτουργία του προγράμματος Rhinoceros 5, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Παράλληλα, παραθέτουμε εν συντομία το μαθηματικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίζεται, μεταξύ άλλων, το εν λόγω λογισμικό.

Έπειτα, στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρόποι σχεδίασης. Πιο συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στη διαδικασία εύρεσης των γραμμών τους σκάφους, τους τρόπους εισαγωγής τους και επεξεργασίας τους σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD και, τελικά, τη δημιουργία επιφανείας, κατάλληλης για χρήση από λογισμικό CAM.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί μια περιγραφή της διαδικασίας κοπής. Ξεκινούμε από την εισαγωγή της επιφάνειας στο πρόγραμμα CAM, το οποίο χρησιμοποιείται για την αυτοματοποιημένη κοπή διαφόρων γεωμετριών μέσω μηχανών CNC. Οι πρώτες μηχανές NC φτιάχτηκαν στα τέλη του 50 και βασίστηκαν σε υπάρχουσες μηχανές, στις οποίες προστεθήκαν κινητήρες που κινούνταν μέσω ελεγκτών σε συγκεκριμένα σημεία. Σύντομα, αυτοί οι πρόωροι σερβομηχανισμοί συνδεθήκαν με ψηφιακούς υπολογιστές δημιουργώντας τις σύγχρονες CNC μηχανές (2).

Αναλόγως το υλικό επεξεργασίας και τα διαθέσιμα κοπτικά εργαλεία, τα λογισμικά CAM δημιουργούν την ορθότερη διαδρομή κατεργασίας για το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα κοπής, στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Αναλυτικότερα, δημιουργείται κώδικας μηχανής, ο οποίος καθοδηγεί τους σερβοκινητήρες στις διάφορες θέσεις της διαδρομής κοπής. Η πορεία των κοπτικών κατευθύνεται με γνώμονα τον συγκεκριμένο κώδικα μέσω του ελεγκτή. Ο ελεγκτής με τη μηχανή επικοινωνούν σε σύστημα κλειστού βρόγχου (ανάδρασης), όπου ο ελεγκτής λαμβάνει ανά πάσα στιγμή πληροφορίες για τη θέση της μηχανής. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί μέσω ενός κωδικοποιητή (encoder) να παρέμβει στη διαδικασία της κοπής και να διορθώσει τυχόν σφάλματα στη θέση, ταχύτητα και επιτάχυνση, τα οποία πιθανόν εμφανιστούν λόγω διακυμάνσεων στη θερμοκρασία ή τη φόρτιση. Σε τέτοιου είδους συστήματα, ενδείκνυται η χρήση σερβοκινητήρων για τη μετάδοση υψηλής ακρίβειας κινήσεων στα κοπτικά εργαλεία (2).

Μετά την κοπή, το μοντέλο υφίσταται κάποια επιφανειακή κατεργασία, η οποία παρουσιάζεται στο έκτο κεφάλαιο της εργασίας. Περιλαμβάνει τη λείανση, βαφή, χάραξη των νομέων καθώς και τον έλεγχο της απόκλισης από την πραγματική γεωμετρία.

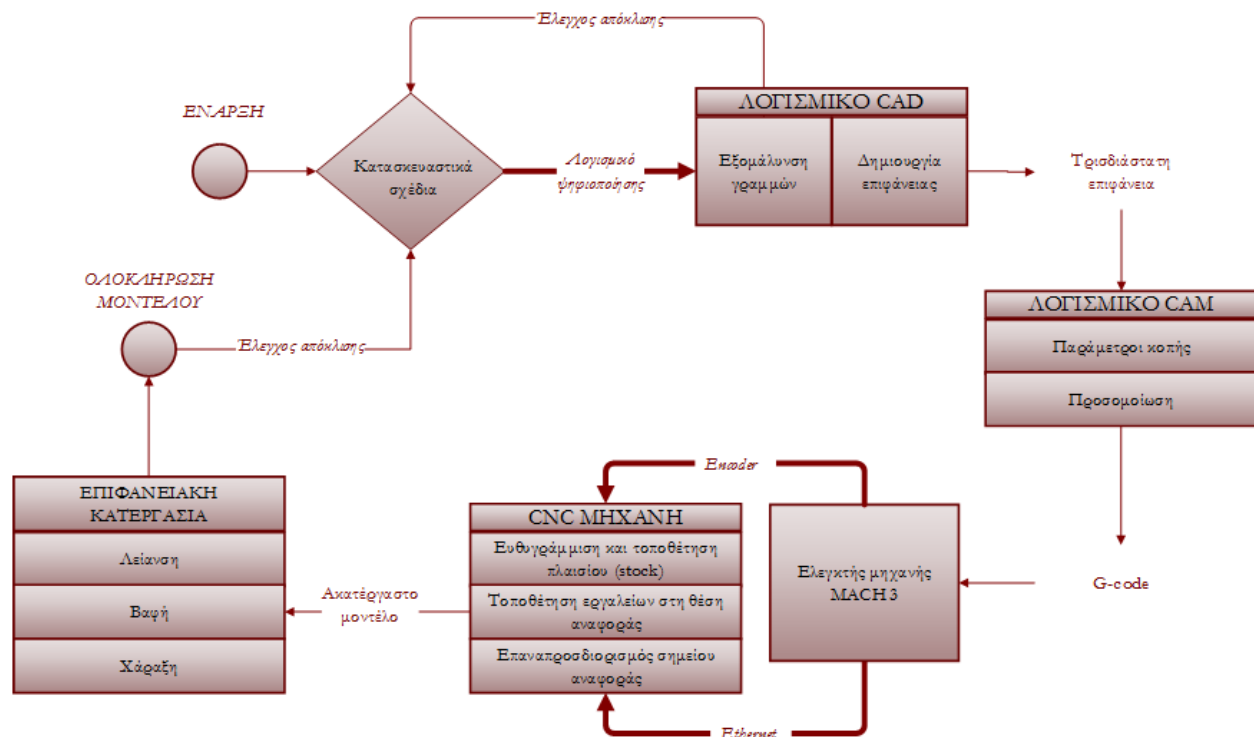
Η παραπάνω διαδικασία, από τη διαχείριση των γραμμών μέχρι και την μοντελοποίηση στο λογισμικό CAM, εφαρμόζεται σε δύο τύπους πλοίων, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας: ένα ιστιοπλοϊκό σκάφος και ένα φορτηγό πλοίο χύδην φορτίου (bulk carrier). Μάλιστα, στην πρώτη περίπτωση, προχωρήσαμε και στα τελευταία στάδια παραγωγής, την κοπή και επιφανειακή

κατεργασία του μοντέλου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στις δύο εφαρμογές περικλείονται στο έβδομο κεφάλαιο.

Ακολουθως, καταλήγουμε σε κάποια συμπεράσματα, όσον αφορά τη διαδικασία κατασκευής προτύπων πλοίων. Πιο αναλυτικά, τίθενται προς διερεύνηση ζητήματα όπως ο βαθμός δυσκολίας στην προσπάθεια τήρησης των καθορισμένων προδιαγραφών, η διαχείριση πολύπλοκων γεωμετριών, η επιλογή των κατάλληλων υλικών, καθώς και η αναγκαιότητα και ακρίβεια στη μέτρηση των παραγόμενων μοντέλων.

Τέλος, η εργασία μας ολοκληρώνεται με αναφορά σε κάποιες προτάσεις για μελλοντική εφαρμογή, πάνω στην κατασκευή μοντέλων. Αυτές σχετίζονται με την παραμετροποίηση και αλλαγή στο τρόπο απεικόνισης της γεωμετρίας στο λογισμικό CAD, όπως και με τη γενικότερη αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής.

Ακολουθεί ένα ενδεικτικό σχεδιάγραμμα, στο οποίο απεικονίζονται τα στάδια της διαδικασίας σχεδίασης και κατασκευής προτύπων πλοίων, όπως εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής εργασίας

2.1. Παραγωγή προτύπων πλοίων

Παραδοσιακά, η απόδοση των πλοίων εκτιμάται μέσω δοκιμών μοντέλων υπό κλίμακα σε πειραματικές δεξαμενές. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η κατασκευή προτύπων πλοίων, ικανά να ανταπεξέλθουν στις συνθήκες των πειραμάτων. Αυτές περιλαμβάνουν τον ερματισμό των προτύπων σε συνθήκες όμοιες με του πλοίου, καθώς και την αντοχή τους στις υδροδυναμικές πιέσεις, όπως και τις δυνάμεις ρυμούλκησης. Αξίζει να αναφερθεί ότι το μέγιστο μήκος στην πειραματική δεξαμενή του ΕΝΘΥ ενδείκνυται στα 5.5 μέτρα, ενώ το μέγιστο βάρος αγγίζει τον 1.5 τόνο. Επιπροσθέτως, τα πρότυπα πρέπει να φέρουν χάραξη ακριβείας, ώστε τα πειράματα να πραγματοποιούνται σε όμοιες γεωμετρικά συνθήκες. Τέλος, η επιφάνεια τους πρέπει να είναι υδροδυναμικά λεία και οι διαστάσεις τους υπό κλίμακα όμοιες με του πραγματικού πλοίου.

2.1.1 Προδιαγραφές ITTC

Η διαδικασία παραγωγής μοντέλων εξαρτάται άμεσα από τα στάδια σχεδιασμού και κατασκευής. Λόγω αυτού, η ακρίβεια των πειραματικών δοκιμών είναι ένα θέμα προς διερεύνηση. Σε μια προσπάθεια να διασφαλιστεί η ζητούμενη ακρίβεια, η ITTC (International Towing Tank Conference) θέσπισε κάποιες προδιαγραφές για τη διεξαγωγή πειραμάτων, οι οποίες περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τον ερματισμό, τη χάραξη, τα μετρητικά όργανα, καθώς και την κατασκευή της γάστρας. Η τελευταία, η οποία αποτελεί και την κύρια ενασχόληση της παρούσας διατριβής, παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Πιο συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στις οδηγίες της ITTC όσον αφορά πειράματα μέτρησης αντίστασης, πρόωσης και ελέγχου έλικας σε ανοιχτή θάλασσα. Σε γενικές γραμμές, πρωταρχικό στόχο αποτελεί η όσο το δυνατόν πιστότερη αναπαράσταση των περιοχών της γάστρας που έρχονται σε επαφή με το νερό. Κάτι τέτοιο μπορεί να μην πάντα είναι εφικτό, λόγω των διαφορετικών συστημάτων και υλικών κατασκευής σε κλίμακα προτύπου και πλοίου. Σε κάθε περίπτωση, οποιαδήποτε παρέκκλιση από την πραγματική γεωμετρία οφείλει να επισημανθεί. Ακολουθώντας, παρατίθενται αναλυτικά οι επισημάνσεις της ITTC επί των παραμέτρων σχεδίασης και κατασκευής προτύπων γαστρών (1).

➤ Υλικά και Κατασκευή

Τα βασικότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μοντέλων γάστρας είναι το κερί, το ξύλο, οι αφρώδεις πυρήνες υψηλής πυκνότητας (cell foam) και τα ενισχυμένα με ίνες πλαστικά (FRP). Τα μοντέλα συνήθως παράγονται από πλέγματα γραμμών, τα οποία ανασχεδιάζονται βάσει του σχεδίου γραμμών του πλοίου. Η εφαρμογή συστημάτων CAD-CAM επιτρέπει την αριθμητική αναπαράσταση της γάστρας από το σχεδιασμό έως την κοπή του μοντέλου. Μετά το πέρας της κοπής, η τελική επιφάνεια των μοντέλων διαμορφώνεται χειροκίνητα. Σε περίπτωση χρήσης υλικού FRP, κατασκευάζεται με παρόμοιο τρόπο ένα αφρώδες ή ξύλινο καλούπι του προτύπου.

➤ Διαμόρφωση τελικής επιφάνειας

Η ποιότητα στην τελική επιφάνεια του μοντέλου πρέπει να είναι αντίστοιχη του αποτελέσματος, όπως θα προέκυπτε με θεωρητική χρήση γυαλόχαρτων 300 έως 400 grit.

➤ Νομείς και ίσαλοι

Η ισαπόσταση και αρίθμηση των νομέων και ισάλων πρέπει σαφώς να οριστεί. Για τους νομείς, προτείνεται το εξής σύστημα αρίθμησης:

- Το σύστημα αρίθμησης περιλαμβάνει 11 συνολικά νομείς, με τον μηδενικό να συμπίπτει με την πρυμναία κάθετο. Εναλλακτικά, μπορούν να είναι 21 (με 20 ίσα διαστήματα). Η αρίθμηση τους ξεκινά από την πρύμνη.
- Είναι ακόμη δυνατή η εισαγωγή νομέων υπό δεκαδική σήμανση (9.5, 9.6, κ.ο.κ.) στα άκρα της γάστρας.
- Οι νομείς πρύμνηθεν της πρυμναίας καθέτου λαμβάνουν αρνητική αρίθμηση.
- Οι νομείς πρώραθεν της πρωραίας καθέτου λαμβάνουν με λογική σειρά θετική αρίθμηση. (10.1, 10.2 κ.ο.κ.)

Πρέπει εδώ να σημειωθεί πως εναλλακτικές μέθοδοι αρίθμησης των νομέων μπορούν να είναι επίσης αποδεκτές. Όσον αφορά τις ισάλους, αυτές προσδιορίζονται ως εξής:

- Η ισαπόσταση τους διαμορφώνεται μέσω της απαιτούμενης απόστασης από τη γραμμή αναφοράς (baseline)
- Η γραμμή αναφοράς πρέπει να ταυτίζεται με την άνω πλευρά της τρόπιδας. Σε περίπτωση κεκλιμένης τρόπιδας, η γραμμή αναφοράς είναι παράλληλη στην ίσαλο σχεδίασης στο μέσο του ύψους από τη βάση, στους νομείς της πρωραίας και πρυμναίας καθέτου.

➤ Διαστάσεις

Οι τελικές γραμμές αναφέρονται σε διαστάσεις χωρίς το συνυπολογισμό του πάχους ελασμάτων, όπως συμβαίνει και στα κατασκευαστικά σχέδια.

➤ Κατασκευαστικές ανοχές

Οι ανοχές στις διαστάσεις των μοντέλων βρίσκονται εντός του ± 1.0 χιλιοστού στη διεύθυνση του πλάτους (y) και του κοίλου (z). Η ανοχή στο μήκος(x) είναι ίση με ποσοστό $\pm 0.05\%$ του συνολικού μήκους, εάν αυτό προκύπτει μεγαλύτερο από ± 1.0 χιλιοστό.

➤ Ανοίγματα

Τα ανοίγματα στη γάστρα δεν πρέπει να ξεπερνούν τα ± 1.0 χιλιοστό. Τα στοιχεία πλευρικής πρόωσης οφείλουν να μοντελοποιούνται είτε με χρήση κατάλληλου προτύπου της βοηθητικής προπέλας, είτε με δισδιάστατη αναπαράσταση, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο συντελεστή στιβαρότητας.

➤ Διατήρηση διαστάσεων

Οι διαστάσεις του μοντέλου πρέπει να μην ξεπερνούν τις προτεινόμενες κατασκευαστικές ανοχές. Πρέπει να σημειωθεί πως οι διαστάσεις των κέρινων προτύπων μπορούν να τροποποιηθούν σε περίπτωση θερμοκρασιακών μεταβολών. Για παράδειγμα, μεταβολή 5°C μπορεί να επιφέρει έως και 0.15% αλλαγή στο μήκος του μοντέλου (10 χιλιοστά για πρότυπο 7 μέτρων). Οι όποιες αλλαγές που μπορεί να εμφανιστούν γι' αυτό το λόγο στις διαστάσεις, οφείλουν να επισημαίνονται στα έγγραφα που συνοδεύουν το μοντέλο.

2.1.2 Περιορισμοί στην κατασκευή προτύπων πλοίων

Ο πρωταρχικός στόχος στην κατασκευή προτύπων είναι η ακριβής αποτύπωση της γεωμετρίας του πλοίου. Βασικούς περιορισμούς στην κατασκευή των μοντέλων αποτελούν η εύρεση των γραμμών του πλοίου, η απόκλιση της επιφάνειας λόγω εξομάλυνσης των γραμμών, τα χαρακτηριστικά της φρεζομηχανής, καθώς και η διαδικασία φινιρίσματος. Πιο αναλυτικά, ένα πρωταρχικό ζήτημα είναι η ταύτιση του σχεδίου γραμμών που θα χρησιμοποιηθεί με τις πραγματικές γραμμές του πλοίου. Είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να τροποποιήσει το σχέδιο γραμμών με τέτοιο τρόπο, ώστε η επιφάνεια που θα προκύψει να μην παρεκκλίνει από την πραγματική γεωμετρία, πέραν των επιτρεπόμενων ορίων.

Ακόμη έναν περιορισμό αποτελεί η προέλευση των σχεδιαστικών γραμμών, οι οποίες συνήθως λαμβάνονται από τα κατασκευαστικά του πλοίου. Σε πολλές περιπτώσεις, τα σχέδια δεν διατίθενται σε ψηφιακή μορφή, γεγονός που δυσκολεύει τη διαχείρισή τους σε κάποιο πρόγραμμα CAD. Όλα τα παραπάνω καθιστούν την επίτευξη των ανοχών της ITTC δύσκολα εφικτή η οποία, χωρίς τη χρήση CNC μηχανών, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπειρία του εκάστοτε τεχνίτη. Η επίτευξη των παραπάνω προδιαγραφών κρίνεται ιδιαίτερα δύσκολη, ακόμη και με χρήση σύγχρονου εξοπλισμού.

Ειδικότερα στο στάδιο της εξομάλυνσης των γραμμών, η δημιουργία μιας ομαλής επιφάνειας προϋποθέτει έντονη παρέμβαση στο αρχικό σχέδιο. Οι πιο απαιτητικές περιοχές βρίσκονται κοντά στην πλώρη και την πρύμνη. Σε αυτές οι σχεδιαστικές γραμμές παρουσιάζουν έντονες καμπυλότητες και απότομες ακμές. Για την αποφυγή ανεπιθύμητων διακυμάνσεων στην τελική επιφάνεια, ο χρήστης εξομαλύνει τις γραμμές σε τέτοιο βαθμό που, κάποιες φορές, η απόκλιση από το αρχικό σχέδιο ξεπερνά τα προτεινόμενα όρια.

Παράλληλα, οι διαστάσεις της φρεζομηχανής, οι άξονες κοπής, τα κοπτικά εργαλεία, το υλικό κατεργασίας κ.α., αποτελούν εάν φυσικό περιορισμό κατά την κατασκευή προτύπων. Στην περίπτωση μας, το τραπέζι κοπής έχει μήκος 5 μέτρα και πλάτος 90 εκατοστά. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη την τμηματική κατεργασία, για τις ανάγκες κατασκευής μοντέλων μεγαλύτερων διαστάσεων.

Τέλος, η διαδικασία του φινιρίσματος δημιουργεί επιπλέον αποκλίσεις από την πραγματική γεωμετρία. Η λείανση συνεπάγεται την αφαίρεση υλικού, ενώ η βαφή την πρόσθεση στρώσεων στην επιφάνεια του προτύπου. Το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στο προηγούμενο στάδιο της κοπής, ώστε να διασφαλίσουμε πως η τελική γεωμετρία θα συγκλίνει με την πραγματική, εντός των προδιαγραφόμενων ορίων.

2.2. Παραδοσιακές μέθοδοι κατασκευής

Παλαιότερα, η κατασκευή μοντέλων για δοκιμές σε πειραματικές δεξαμενές περιλάμβανε σε μεγάλο βαθμό χειρωνακτική εργασία. Οι δύο τεχνικές που κυριαρχούσαν στην παραγωγή προτύπων πλοίων είναι ανάλογες των παραδοσιακών μεθόδων ανέγερσης ξύλινων σκαριών (3). Η πρώτη καλείται “carvel planking” σύμφωνα με την αγγλική ορολογία, και αντιστοιχεί στο «πέτσωμα» των παραδοσιακών σκαφών, ενώ η δεύτερη τεχνική είναι η «μέθοδος των ισάλων» (“bread & butter”).

2.2.1 Πέτσωμα

Ο σκελετός της γάστρας συντίθεται από την *καρίνα*¹, τους νομείς, το *ποδόστημα* της πλώρης και το *ποδόστημα* ή καθρέφτη της πρύμνης. Πάνω σε αυτά, εναποτίθενται λεπτές λωρίδες ξύλου από άκρη σε άκρη, δημιουργώντας τελικά την εξωτερική επιφάνεια της γάστρας. Η μέθοδος παρουσιάζεται παρακάτω, μέσα από τη συνοπτική παράθεση των βασικότερων σταδίων της (4). Το σημαντικότερο της πλεονέκτημα είναι η παραγωγή ελαφριών κατασκευών.

➤ Καρίνα, πρυμνιό και πλωριό ποδόστημα

Για μήκος καρίνας έως και 5 μέτρα, γίνεται χρήση ενός δοκαριού για τη διαμόρφωσή της καρίνας. Για μεγαλύτερο μήκος, γίνεται χρήση δύο ή περισσότερων τμημάτων. Επί της διαμορφωμένης καρίνας, σηματοδούνται και κόβονται τα σημεία εφαρμογής των νομέων (*χαραξιάς*), σε ισάποσταση που καθορίζεται από το μήκος του σκάφους.

Το πρυμνιό ποδόστημα, το πρώτο κομμάτι που προσαρμόζεται στην καρίνα, είναι συνήθως μονοκόμματο και σφηνώνεται από τη μία πλευρά της παρέλας, ώστε να εξασφαλίζεται η πάκτωση του πάνω στην καρίνα. Για τη διαμόρφωση καθρέφτη στην πρύμνη, δημιουργείται αρχικά μια εγκοπή στην εξωτερική επιφάνεια του καθρέφτη, ώστε να «θηλυκώσει» κατά τη συναρμολόγηση.

➤ Τοποθέτηση νομέων

Στα κομμάτια που αποτελούν τους νομείς χρησιμοποιούνται σημάδια (*στιβες*), τα οποία αντιγράφονται από τα χνάρια ή το σχέδιο της σάλας, ώστε να επαληθευτεί η σωστή τους θέση κατά τη συναρμολόγησή τους. Το μεσαίο ζεύγος νομέων είναι το πρώτο που τοποθετείται στο διαμήκη άξονα καρίνας – ποδοστημάτων. Η προσαρμογή τους πραγματοποιείται στη θέση που έχει προκαθοριστεί πάνω στην καρίνα, όπου συχνά υπάρχει μια εγκοπή για να «θηλυκώσει» με τον νομέα. Η κατακόρυφη θέση του νομέα επιβεβαιώνεται μέσω του νήματος της στάθμης. Ακολουθεί η σταθεροποίηση των νομέων με τα *μπουντέλια*² και, έπειτα, στις δύο εξωτερικές πλευρές τους καρφώνονται οι *φούρμες*³ (5). Τέλος, λαμβάνει χώρα η τοποθέτηση διαμηκών ενισχυτικών στο σκελετό της γάστρας.

¹ Αποτελεί το κατώτερο μέρος των υφάλων του πλοίου που είναι βυθισμένο στο νερό.

² Βασικά σημεία στήριξης μεταξύ των καταστρωμάτων και, κατ' επέκταση, το εσωτερικό ύψος τους πλοίου.

³ Σανίδες στα πλαϊνά του σκάφους, στις ίδιες θέσεις που θα τοποθετηθούν μετά τα σανίδια του πετσώματος.



Εικόνα 2.1: Τοποθέτηση νομέων

➤ Πέτσωμα

Εάν το σκάφος επρόκειτο να έχει εσωτερικό πέτσωμα, αυτό τοποθετείται πρώτο. Διαφορετικά, προχωρούμε κατευθείαν στην τοποθέτηση των σανιδιών της γάστρας. Τα πρώτα σανίδια του πετσώματος της γάστρας τοποθετούνται κάτω από την τσάπα και διαμορφώνουν σειρές παράλληλες σε αυτή, τις λεγόμενες αράδες. Το πλάτος των σανιδιών αυξάνεται σταδιακά από τη μέση του σκάφους προς τα άκρα, ώστε οι αρμοί ανάμεσα στις αράδες να παραμείνουν σχεδόν παράλληλα κατά το μήκος. Πριν από την εφαρμογή του πετσώματος στους νομείς, σμιλεύουν ένα μέρος τη εξωτερικής τους επιφάνειας για να διαμορφώσουν το κατάλληλο φάλτσο, ώστε να προσαρμοστούν αργότερα τα αντίστοιχα σανίδια του πετσώματος.

Το πέτσωμα που είχε ξεκινήσει από τις τσάπες (ζωνάρια) σταματά στη μέση περίπου της πλευράς του σκάφους και προχωρά μετά πάνω από την καρίνα. Συνεχίζοντας το πέτσωμα παραπάνω, φτάνουμε στο τελευταίο σανίδι του επάνω τμήματος. Για τη στερέωσή τους σε κάθε νομέα χρησιμοποιείται ένα συνδυασμός από καρφιά και καβίλιες. Μετά το πέτσωμα, ακολουθεί το ζουμπάρισμα των καρφιών με καλέμια ίδιου μεγέθους με το κεφάλι των καρφιών και, στη συνέχεια, το πλάνισμα της γάστρας κατά μήκος των ινών των σανίδων.



Εικόνα 2.2: Πέτσωμα

Για την επίτευξη μιας στιβαρής κατασκευής, ιδιαίτερα στην περίπτωση μικρών σκαφών, τοποθετούνται στρώσεις υαλονήματος και πολυεστερική ρητίνη στο εσωτερικό της γάστρας. Με αυτόν τρόπο διασφαλίζεται η συγκράτηση μεταξύ σκελετού και πετσώματος, ενώ συγχρόνως επιτυγχάνεται η αδιαβροχοποίησή του.



Εικόνα 2.3: Στρώση υαλονήματος στο εσωτερικό της γάστρας

2.2.2 Μέθοδος ισάλων

Η δεύτερη τεχνική είναι η “μέθοδος των ισάλων” (bread & butter), όπου ο χρήστης καλείται να δημιουργήσει το πρότυπο με δύο τρόπους: είτε διαμορφώνοντας κάθε σανίδα ξεχωριστά οι οποίες στη συνέχεια συναρμολογούνται, είτε αρχίζοντας από ένα κοίλο ξύλινο μπλοκ και διαμορφώνοντας ισοϋψείς ισάλους. Σε κάθε περίπτωση, στόχος είναι η ακριβής δημιουργία της βρεχόμενης επιφάνειας, καθώς και ο σαφής καθορισμός των θέσεων των νομέων επί της κατασκευής.

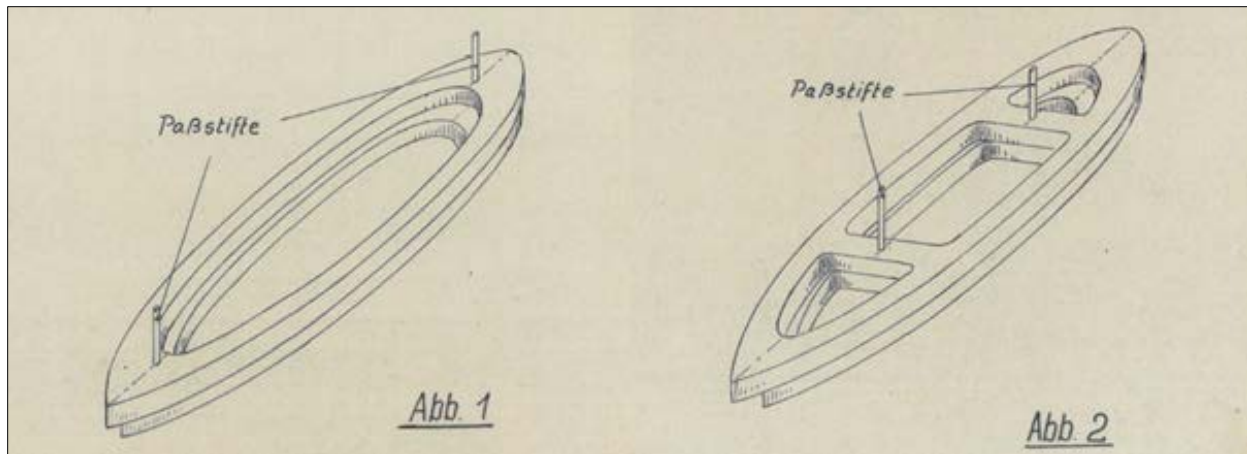
Η διαδικασία για την εκτέλεσή της πρώτης τεχνικής αναλύεται στα εξής στάδια (6):

➤ Επιλογή Υλικών

Τα προτεινόμενα υλικά για την συγκεκριμένη κατεργασία είναι το ξηρό πεύκο, το λευκό ξύλο και το τικ, εφόσον, κατά την ξήρανσή του, έχει αποβάλλει την υγρασία. Τα ξύλα πρέπει να έχουν αναπτυχθεί ισότροπα, χωρίς σκληρούς αυξητικούς δακτυλίους στον κορμό τους, ευθύνα (με ίσια “νερά”) και με λίγους ρόζους. (7).

➤ Κόλληση

Για τις συνδέσεις δεν χρησιμοποιούνται καρφιά, παρά μόνο ξύλινοι πύροι (καβίλιες) και αδιάβροχη κόλλα ⁴ (Εικόνα 2.4). Αυτό προτείνεται για την αποφυγή ατυχήματος κατά τη διάρκεια της κοπής. Κάθε οριζόντιο επίπεδο δημιουργείται από 2 μέχρι 4 σανίδες πάχους 1” (κοντά στα 25 χιλιοστά). Το πάχος των σανίδων μπορεί να είναι μεγαλύτερο, σε περίπτωση που χρησιμοποιείται φρέζα για την παραγωγή του μοντέλου. Επιπλέον, οι σανίδες διασταυρώνονται με ψαλιδωτή σύνδεση σε μεγαλύτερα μοντέλα (Εικόνα 2.5). Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως η πυκνότητα των επιπέδων ενισχύει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια της μεθόδου. Με άλλα λόγια, όσο περισσότεροι είναι οι ίσαλοι, τόσο ακριβέστερη είναι η αποτύπωση της γεωμετρίας και η ποιότητα της τελικής επιφάνειας. Κατά την επιλογή του αριθμού των ισάλων, ο σχεδιαστής καλείται να βρει μια συμβιβαστική λύση, μεταξύ του χρόνου κατασκευής και της ποιότητας στο τελικό αποτέλεσμα.



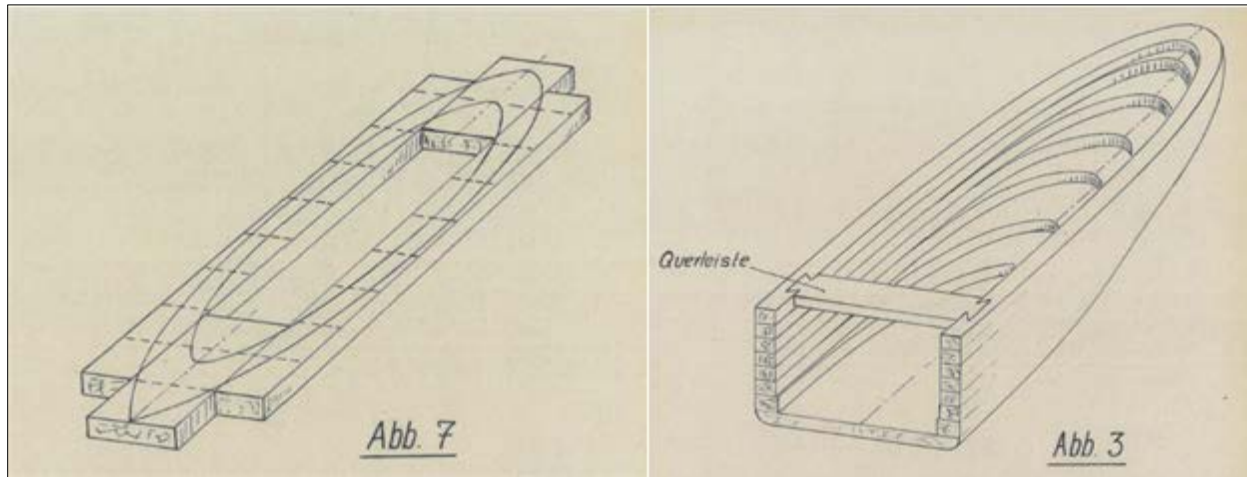
Εικόνα 2.4: Συνδέσεις επιπέδων με ξύλινους πύρους

➤ Χάραξη

Εφόσον τα τμήματα σε κάθε επίπεδο συγκολληθούν, χαράζεται σε κάθε πλευρά τους ο διαμήκης άξονα συμμετρίας (centerline) και η αντίστοιχη ίσαλος (waterline) βάσει του σχεδίου ισάλων. Επιπλέον, στην πάνω πλευρά χαράζονται οι νομείς (frames), όπως έχουν προκύψει από το σχέδιο γραμμών. Οι θέσεις των ισάλων προσδιορίζονται από τα πάχη των οριζόντιων επιπέδων, τα οποία πρέπει να μετρηθούν με την υψηλότερη ακρίβεια. Τα επίπεδα τοποθετούνται το ένα πάνω

⁴ Για τη συγκόλληση ξύλινου μοντέλου, ενδείκνυται η χρήση του υλικού Aerolite No.306 με σκληρυντή GBRX.

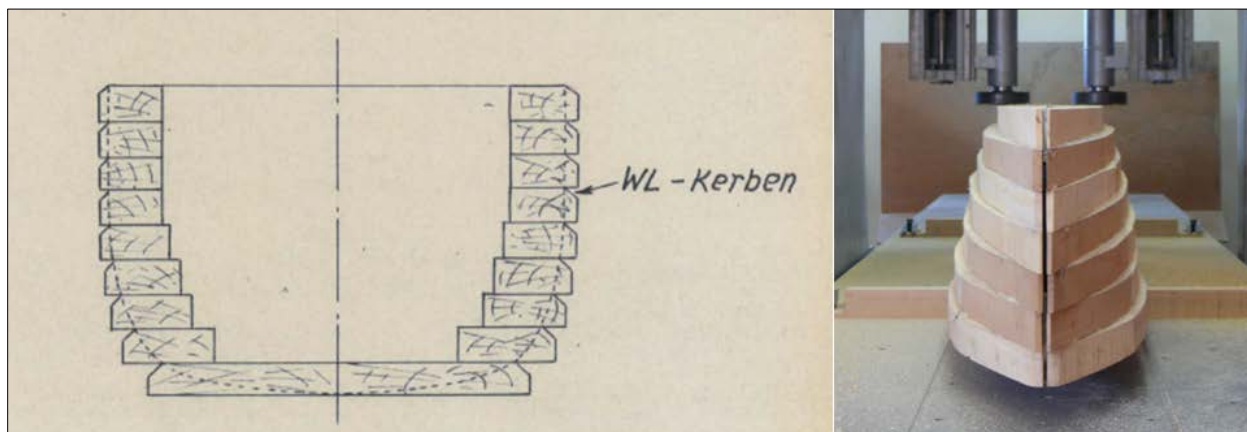
στο άλλο, έτσι ώστε οι γραμμές αναφοράς (άξονα συμμετρίας και νομείς) να συμπίπτουν. Έπειτα, στερεώνονται σε αυτήν τη θέση μέσω ξύλινων πύρων. Μετά την αποσυναρμολόγηση, ακολουθεί η διαμόρφωση των ισάλων σε κάθε επίπεδο μέσω πριονοκορδέλας. Με τη χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου, επιτυγχάνουμε τη μείωση τόσο της φύρας, όσο και του χρόνου κατεργασίας.



Εικόνα 2.5: Ένωση σανίδων για τη δημιουργία οριζόντιων επιπέδων

➤ Συναρμολόγηση

Στη συνέχεια, τα 3 πρώτα επίπεδα κολλιούνται μεταξύ τους, έχοντας στερεωμένους τους πύρους και πιέζονται, είτε με χρήση σφιγκτήρων είτε με την προσάρτηση βαρών. Αφού η κόλλα στεγνώσει, προστίθενται τα επόμενα επίπεδα (Εικόνα 2.6). Στο ανώτερο επίπεδο του μοντέλου εφαρμόζεται μια λοξότητα, ώστε οι ακμές των επιπέδων που συνορεύει να μην είναι στην ίδια θέση. Οι ακμές των ισάλων αυτών οριοθετούν την εξωτερική επιφάνεια της γάστρας. Βάσει αυτών, ο χρήστης αφαιρεί το περιττό υλικό με σκοπό τη δημιουργία μιας λείας επιφάνειας.



Εικόνα 2.6: Συναρμολόγηση επιπέδων

Στη δεύτερη διαδικασία, ενδείκνυται η χρήση κάθετης φρέζας ξύλου, η οποία κόβει την κοίλη κατασκευή στις ακμές των ισάλων, βάσει σχεδίου. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

➤ Δημιουργία μπλοκ και διαμόρφωση

Σε αυτή την περίπτωση, δημιουργείται ένα ξύλινο μπλοκ λίγο μεγαλύτερο από τις τελικές εξωτερικές διαστάσεις του μοντέλου. Τα στάδια της επιλογής των υλικών και της κόλλησης είναι τα ίδια με την προηγούμενη τεχνική. Μετά ακολουθεί η ευθυγράμμιση του μπλοκ με το τραπέζι της φρέζας. Ακολουθώντας τις ισάλους από το σχέδιο γραμμών, οδηγούμε τη μηχανή για την αποτύπωση τους επί του μπλοκ.

➤ Ξεχόνδρισμα

Σε επόμενη φάση, ο χειριστής πρέπει να αφαιρέσει χειροκίνητα το πλεονάζων ξύλο στην εξωτερική πλευρά του μοντέλου. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν στην εξωτερική επιφάνεια διακρίνονται μόνο τα όρια των ισάλων. Σημειώνεται εδώ πως η χρήση τριβείων και γωνιακού τροχού μειώνει το χρόνο λείανσης. Οι εναπομένουσες τραχύτητες απομακρύνονται με γυαλόχαρτα προσαρτημένα σε κομμάτι ξύλου ή φελλού, ξεκινώντας από τα σκληρότερα και συνεχίζοντας με τα πιο λεπτά.

Όταν ολοκληρωθεί η λείανση και με το λεπτότερο γυαλόχαρτο, πρέπει όλες οι εγκοπές να έχουν εξαλειφθεί και, επιπλέον, η μορφή των προτύπων να αποτυπώνεται με ακρίβεια στους νομείς και το περίγραμμα του προφίλ. Ωστόσο, το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να είναι περίπου 1/10 του χιλιοστού πιο παχύ από το επιθυμητό, καθώς οι εγκοπές δημιουργήθηκαν μόνο στην εξωτερικές πλευρές των ισάλων. Το λεπτό αυτό στρώμα του 1/10 του χιλιοστού λειτουργεί ως ανοχή για την διαδικασία της υγρής λείανσης που ακολουθεί. Εκεί, γίνεται χρήση ενός ελαφρώς υγρού σπόγγου για την επίτευξη μιας τραχιάς επιφάνειας η οποία, όταν στεγνώσει, λειαίνεται ξανά με λεπτό γυαλόχαρτο. Η εν λόγω διαδικασία επαναλαμβάνεται δύο ή 3 φορές εωσότου προκύψει λεία επιφάνεια, μετά την ύγρανσή της.

2.2.3 Διαμόρφωση τελικής επιφάνειας

Η διαμόρφωση της τελικής επιφάνειας είναι κοινή για τις δύο παραπάνω τεχνικές. Περιλαμβάνει την τελική λείανση, τη βαφή, τη χάραξη των νομέων καθώς και τον έλεγχο της επιφάνειας, όπως παρουσιάζονται ακολούθως.

➤ Τελική λείανση

Η τελική λείανση πραγματοποιείται με τη χρήση γυαλόχαρτων, τα οποία σταδιακά φτάνουν τα 400 grit. Το στάδιο αυτό κρίνεται αναγκαίο ώστε να επιτευχθεί αποδεκτή ποιότητα κατά το στάδιο της βαφής που ακολουθεί.

➤ Βαφή

Το εν λόγω στάδιο πρέπει να πραγματοποιηθεί σε ξεχωριστό δωμάτιο, απομονωμένο από σκόνη. Ξεκινούμε βάφοντας εσωτερικά και εξωτερικά με λινέλαιο, στο οποίο προστίθεται στεγνωτικό σε ποσοστό 1-2%. Έπειτα, ακολουθεί μια στρώση από βερνίκι τουρπεντίνης με στεγνωτικό. Η επιφάνεια χρειάζεται επιπλέον λείανση με λεπτό γυαλόχαρτο, όταν στεγνώσει, και πρέπει μετά να καλυφθεί με ένα πολύ λεπτό στρώμα στόκου.

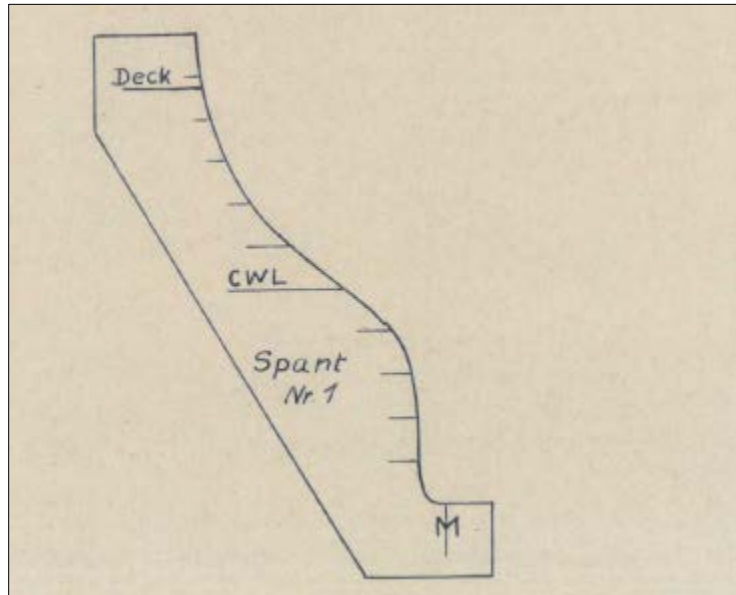
Στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η λείανση και η επιφάνεια βάφεται για δεύτερη φορά. Έπειτα, καλύπτουμε με στόκο και λειαίνουμε ξανά. Ακολουθεί τρίτο πέρασμα βαφής, πάντα με το ίδιο βερνίκι που, όταν στεγνώσει υφίσταται υγρή λείανση. Με αυτόν τον τρόπο η επιφάνεια αποκτά ένα πολύ λείο φινιρίσμα. Αφού στεγνώσει εντελώς, η εξωτερική επιφάνεια του μοντέλου βάφεται με μια λεπτή στρώση από βερνίκι σμάλτου. Για το εσωτερικό, ενδείκνυται η χρήση μιας δεύτερης στρώσης από λινέλαιο.



Εικόνα 2.7: Επιφάνεια μοντέλου μετά τη βαφή

➤ Έλεγχος τελικής επιφάνειας

Ο έλεγχος του επιπέδου λείανσης πραγματοποιείται με γνώμονα τα πατρόν των νομέων, οι οποίοι διαμορφώνονται βάσει του αρχικού σχεδίου (Εικόνα 2.8). Συνήθως κατασκευάζονται από χαρτόνι, φύλλο ψευδαργύρου ή κόντρα πλακέ και η εσωτερική τους πλευρά αλείφεται με κιμωλία. Με τον τρόπο αυτό αντιλαμβανόμαστε σε ποιά σημεία δεν εφάπτονται οι γεωμετρίες.

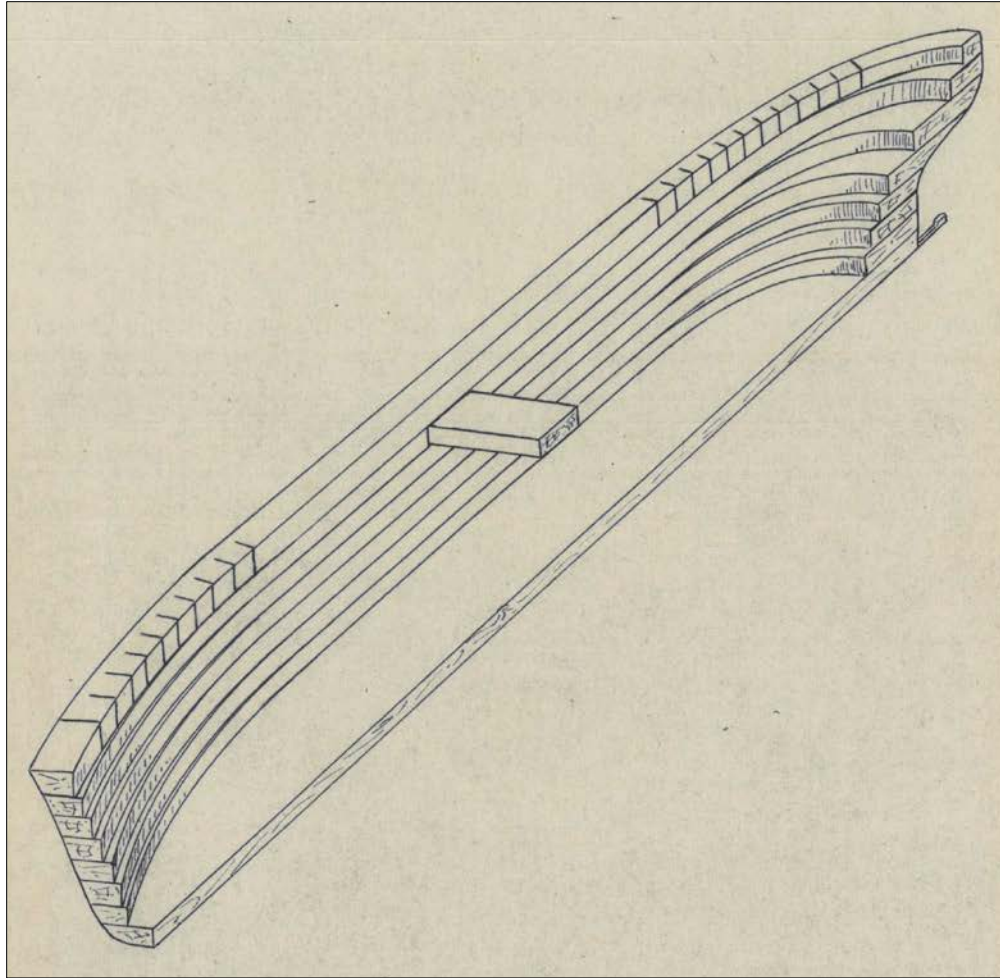


Εικόνα 2.8: Πατρόν νομέων

➤ Καθορισμός ισάλων και νομέων.

Οι ακριβείς θέσεις των νομέων σημειώνονται πάνω στο μοντέλο και τοποθετούνται στην επιφάνεια του μέσω των κάθετων πλάνων. Οι γραμμές των νομέων πρέπει να συμπίπτουν με τις ενδείξεις που αναγράφονται στη βάση των εγκοπών. Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιείται και ο έλεγχος στα περιγράμματα της πλώρης και της πρύμνης, με χρήση ξύλινων προτύπων. Σήμερα, για τη χάραξη των ισάλων συνήθως χρησιμοποιείται ισομετρικός χαρακτήρας ακριβείας.

Η εν λόγω διαδικασία πραγματοποιείται στο επίπεδο της επιφάνειας του μοντέλου, το οποίο αναποδογυρίζουμε και υποστηρίζουμε με μικρά ξύλινα κομμάτια. Στόχος μας είναι τα επίπεδα των ισάλων ή μια οριζόντια βάση της τρόπιδας να είναι εντελώς παράλληλα με το επίπεδο της επιφάνειας, ενώ το κεντρικό διάμηκες επίπεδο είναι κατακόρυφο. Στη συνέχεια, σχεδιάζονται στους δείκτες της επιφάνειας κάποιες ίσαλοι, στην εξωτερική και εσωτερική πλευρά, μέσω ενός απαλού μολυβιού, το οποίο έχει σμιλευμένη άκρη. Αντίστοιχα, οι γραμμές των νομέων σχεδιάζονται με το μολύβι, το οποίο προσαρτείται σε ένα συρόμενο πίσω επί του κατακόρυφου επιπέδου. Έτσι, για κάθε μοντέλο θα προκύψει ένα πλέγμα από ισάλους και νομείς, σχεδιασμένο και στις δύο πλευρές του.



Εικόνα 2.9: Χάραξη ισάλων και νομέων

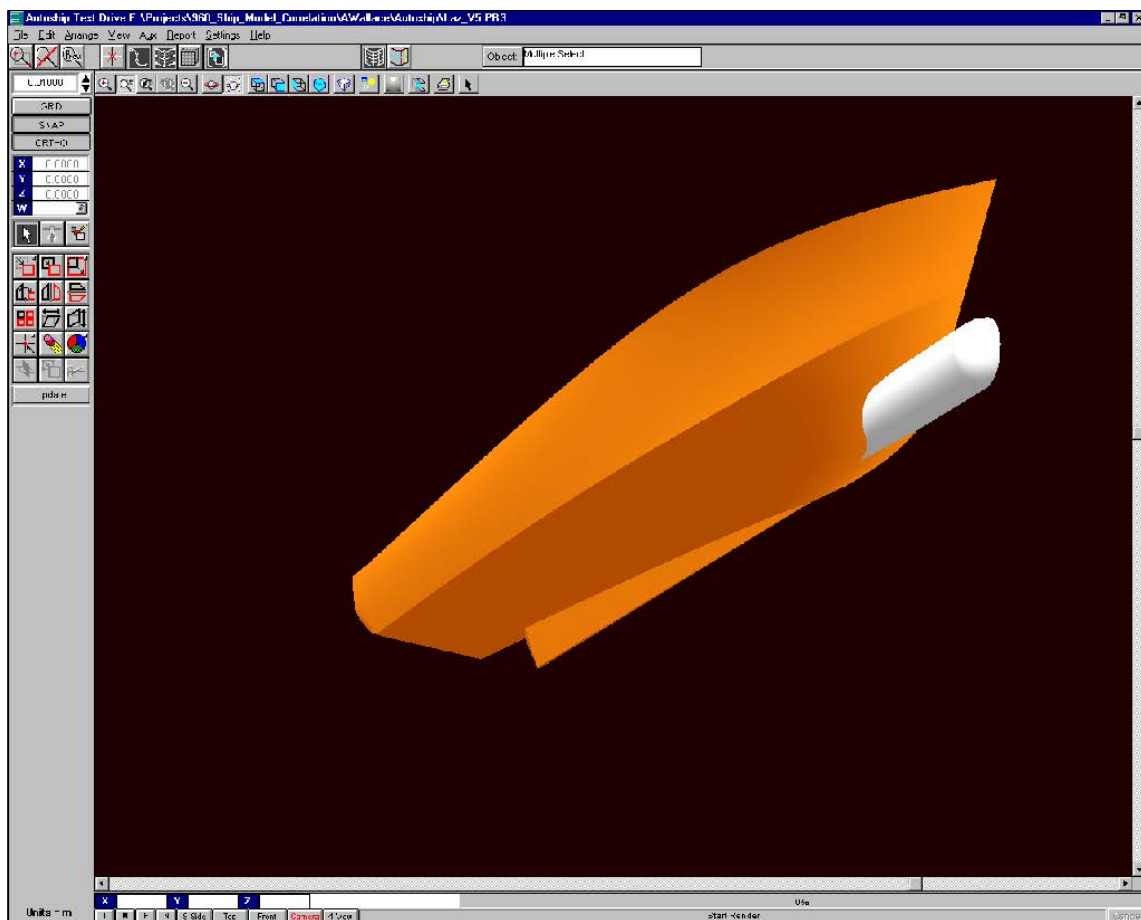
Ακολούθως, το μοντέλο περιστρέφεται κατά 90° και οι ισάλοι σχεδιάζονται με Ινδικό μελάνι. Οι γραμμές αυτές πρέπει να έχουν πάχος 2 χιλιοστών και τα κατώτερα άκρα τους να συμπίπτουν επακριβώς με τις ισάλους που σχεδιάστηκαν προηγουμένως με μολύβι. Με τον ίδιο τρόπο σχεδιάζονται και οι γραμμές των νομέων, με τη μόνη διαφορά πως εδώ η ήδη υπάρχουσα γραμμή από μολύβι πρέπει να συμπέσει στο μέσο της γραμμής από μελάνι.

Το ΕΝΘΥ, κατέχει μια μηχανή φρεζαρίσματος ξύλου για δημιουργία μοντέλων με τη μέθοδο των ισάλων. Η συγκεκριμένη μηχανή έχει ως χαρακτηριστικό τη χρήση δύο παράλληλων κοπτικών στον κατακόρυφο άξονα. Βάσει αυτού, ο χειριστής διαχειρίζεται μόνο τη μία πλευρά του σχεδίου (starboard), ενώ κατεργάζεται ολόκληρη την κοίλη κατασκευή. Συνεπάγεται ότι το εργαστήριο χρησιμοποιεί κατά κόρον τη μέθοδο των ισάλων για την παραγωγή προτύπων. Παρ' όλα αυτά, σε ειδικές περιπτώσεις όπως τα μηχανοκίνητα σκάφη, τα ταχύπλοα και άλλες ειδικές κατασκευές προτιμάται η μέθοδος του πετσώματος ("carvel planking").

2.3. Σύγχρονες μέθοδοι κατασκευής

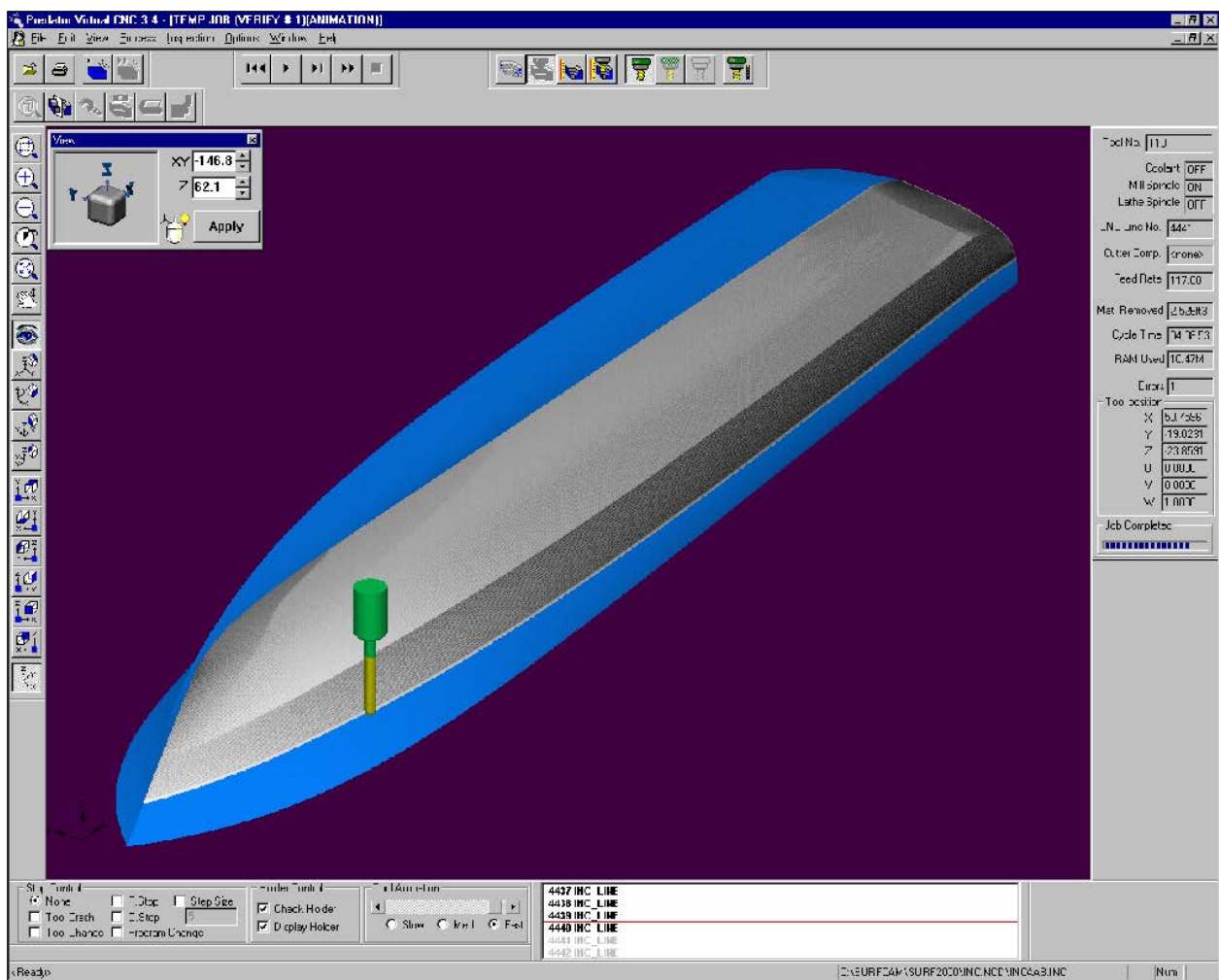
Οι παραδοσιακές τεχνικές που προαναφέρθηκαν απαιτούν άριστα εκπαιδευμένο προσωπικό, εξειδικευμένο σε ξυλουργικές εργασίες. Εντούτοις, χρειάζεται πολύ προσπάθεια και χρόνο για να παραχθεί υπό κλίμακα ένα ακριβές μοντέλο του πραγματικού πλοίου. Συγκεκριμένα, η διαδικασία παραγωγής απαιτεί χρονικά τουλάχιστον ένα μήνα, συμπεριλαμβανομένου τη σχεδίαση και κατασκευή. Επιπλέον, η ποιότητα του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιδεξιότητα του εκάστοτε τεχνίτη. Συνεπώς, η μέτρηση των διαστάσεων του μοντέλου πρέπει να είναι ακριβής, ώστε να επιβεβαιωθεί πως ικανοποιούνται οι οδηγίες της ITTC.

Το σημαντικότερο ωστόσο μειονέκτημα τους είναι η δυσκολία που παρουσιάζουν στη διαχείριση πολύπλοκων γεωμετριών. Αυτές απαιτούν ειδικό χειρισμό και εμφανίζονται συνήθως στην πρύμνη και την πλώρη, όπως η γεωμετρία του βολβού. Για αυτό το λόγο, οι παραδοσιακές τεχνικές εφαρμόζονται ως επί το πλείστον σε απλοποιημένες σχεδιάσεις. Καθώς όμως η διαδικασία σχεδίασης των μοντέλων γίνεται ολοένα και πιο απαιτητική, είναι σαφές πως μια νέα, αυτοματοποιημένη διαδικασία παραγωγής απαιτείται για την ελαχιστοποίηση τόσο των σφαλμάτων μέτρησης, όσο και του χρόνου εργασίας.



Εικόνα 2.10: Σχεδίαση τρισδιάστατου μοντέλου σ CAD

Σήμερα, η διαδικασία παραγωγής προτύπων πλοίων έχει εξ' ολοκλήρου αναβαθμιστεί. Ξεκινώντας από το στάδιο της σχεδίασης, τα δισδιάστατα σχέδια γραμμών έχουν πρακτικά αντικατασταθεί με τρισδιάστατα μοντέλα γεωμετρικής αναπαράστασης. Για το σκοπό αυτό, οι περισσότερες πειραματικές δεξαμενές χρησιμοποιούν σύγχρονα λογισμικά CAD-CAM, η τεχνολογία των οποίων αποτελείται από τρεις συνιστώσες: το υλικό μέρος (H/Y), το λογισμικό και τον χρήστη. (8) Το πρόγραμμα CAD αναλαμβάνει τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιεί το CAM για να ρυθμίσει τις παραμέτρους για τη διαδικασία κοπής. Τα εν λόγω συστήματα αποτελούν πολύ χρήσιμα εργαλεία για έναν ναυπηγό, καθώς έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν πληροφορίες για τη γεωμετρία της τελικής επιφάνειας, από την ομαλότητά της έως και τα υδροστατικά στοιχεία. Παράλληλα, η χρήση τους κρίνεται αναγκαία για τη δημιουργία του απαραίτητου κώδικα οδήγησης της κοπτικής μηχανής (G-code).



Εικόνα 2.11: Παραγωγή διαδρομής σε CAM για την κατεργασία κοπής

Ο κώδικας G αποτελεί την πιο διαδεδομένη γλώσσα προγραμματισμού αριθμητικού ελέγχου (NC). Χρησιμοποιείται κυρίως για την καθοδήγηση αυτοματοποιημένων εργαλειομηχανών, σε υποβοηθούμενη από Η/Υ κατασκευή προϊόντων (Computer-Aided Manufacturing). Μέσω αυτής πληροφορούμε μια ελεγχόμενη από έναν Η/Υ μηχανή πώς να λειτουργήσει. Το "πώς" καθορίζεται από εντολές σχετικά με το πού να κινηθεί, πόσο γρήγορα να κινηθεί, τι διαδρομή θα ακολουθήσει κ.λπ. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση είναι το εργαλείο κοπής να ακολουθεί μία διαδρομή και να αφαιρεί υλικό σύμφωνα με τις οδηγίες αυτές, ούτως ώστε να προκύψει το τελικό κομμάτι (9). Ένα παράδειγμα εφαρμογής του G-Code είναι το ακόλουθο τμήμα κώδικα, το οποίο χρησιμοποιείται για την εύρεση του κέντρου κοπής (Εικόνα 2.12).

```

N010 (probe to find center and diameter of circular hole)
N020 (This program will not run as given here. You have to)
N030 (insert numbers in place of <description of number>.)
N040 (Delete lines N020, N030, and N040 when you do that.)
N050 G0 Z <Z-value of retracted position> F <feed rate>
N060 #1001=<nominal X-value of hole center>
N070 #1002=<nominal Y-value of hole center>
N080 #1003=<some Z-value inside the hole>
N090 #1004=<probe tip radius>
N100 #1005=[<nominal hole diameter>/2.0 - #1004]
N110 G0 X#1001 Y#1002 (move above nominal hole center)
N120 G0 Z#1003 (move into hole - to be cautious, substitute G1 for G0 here)
N130 G31 X[#1001 + #1005] (probe +X side of hole)
N140 #1011=#2000 (save results)
N150 G0 X#1001 Y#1002 (back to center of hole)
N160 G31 X[#1001 - #1005] (probe -X side of hole)
N170 #1021=[[#1011 + #2000] / 2.0] (find pretty good X-value of hole center)
N180 G0 X#1021 Y#1002 (back to center of hole)
N190 G31 Y[#1002 + #1005] (probe +Y side of hole)
N200 #1012=#2001 (save results)
N210 G0 X#1021 Y#1002 (back to center of hole)
N220 G31 Y[#1002 - #1005] (probe -Y side of hole)
N230 #1022=[[#1012 + #2001] / 2.0] (find very good Y-value of hole center)
N240 #1014=[[#1012 - #2001 + [2 * #1004]]] (find hole diameter in Y-direction)
N250 G0 X#1021 Y#1022 (back to center of hole)
N260 G31 X[#1021 + #1005] (probe +X side of hole)
N270 #1031=#2000 (save results)
N280 G0 X#1021 Y#1022 (back to center of hole)
N290 G31 X[#1021 - #1005] (probe -X side of hole)
N300 #1041=[[#1031 + #2000] / 2.0] (find very good X-value of hole center)
N310 #1024=[[#1031 - #2000 + [2 * #1004]]] (find hole diameter in X-direction)
N320 #1034=[[#1014 + #1024] / 2.0] (find average hole diameter)
N330 #1035=[#1024 - #1014] (find difference in hole diameters)
N340 G0 X#1041 Y#1022 (back to center of hole)
N350 M2 (that's all, folks)

```

Εικόνα 2.12: Εφαρμογή G-Code για την εύρεση του κέντρου κοπής

Κάθε θέση του εργαλείου κοπής ορίζεται στον G-code βάσει του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, όπως διευρύνεται στις τρεις διαστάσεις. Το σύστημα αυτό κρίνεται απαραίτητο για τη χαρτογράφηση της διαδρομής των κοπτικών, όπως και για την εκτέλεση οποιουδήποτε τύπου εντολής που εφαρμόζεται σε μια συγκεκριμένη συντεταγμένη. Συνήθως χρησιμοποιούνται

απόλυτες συντεταγμένες για τον προσδιορισμό των θέσεων των κοπτικών, οι οποίες έχουν ως αναφορά την αρχή των αξόνων(0,0,0). Το σημείο αυτό επιλέγεται να οριστεί στο τεμάχιο κοπής, ώστε να δημιουργηθεί ένα είδους αφετηρίας (*Home Position*) πριν την έναρξη της κατεργασίας (2).



Εικόνα 2.13: Κοπτικά εργαλεία

Για την εφαρμογή όλων των παραπάνω στην παραγωγή προτύπων πλοίων ενδείκνυται η χρήση μηχανών αυτόματης κοπής (CNC). Αυτές διαθέτουν έως και 5 βαθμούς ελευθερίας (άξονες), ρομποτικούς βραχίονες, περιστρεφόμενα έδρανα στήριξης κ.α. Η πολυαξονική κατεργασία CNC αναφέρεται σε φρεζάρισμα αξόνων, που διεξάγεται σε κέντρα κατεργασίας. Όλο και περισσότερο, τα κατεργαζόμενα τμήματα αποτελούνται από επιφάνειες ελεύθερης μορφής, οπότε η παραγωγή τους συνεπάγεται πορεία εργαλείου ελεύθερας μορφής, ορισμό του προσανατολισμού και επιλογή της γεωμετρίας του εργαλείου (10). Η βελτιστοποίηση της πορείας του εργαλείου και η αποφυγή παρεμβολών βασίζεται σε κριτήρια ποιότητας, όπως το κινηματικό σφάλμα, σκαψίματα, πιθανή μηχανική εντομή ή υπερκοπή και συνέχεια της πορείας (11). Επιπλέον, είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση ρομποτικών βραχιόνων (*robotic arms*), η οποία καθιστά εφικτή τη διαμόρφωση περιοχών με αντίθετες καμπυλότητες, όπως η περίπτωση του βολβού στην πλώρη (Εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Χρήση ρομποτικού βραχίονα

Το φινίρισμα εξακολουθεί να εκτελείται χειρωνακτικά από έμπειρους τεχνίτες, με χρήση μετρητικών που προσαρμόζονται στην περιοχή του πρωραίου κα πρυμναίου άκρου του προτύπου. Για τα ξύλινα μοντέλα, χρησιμοποιούνται γυαλόχαρτα και αδιάβροχες βαφές. Όσον αφορά τον έλεγχο της τελικής επιφάνειας, αυτός συνήθως πραγματοποιείται μέσω τρισδιάστατων ψηφιοποιητών (digitizers). Αυτοί κατηγοριοποιούνται σε μετρητές επαφής ή εξ' αποστάσεως. Παράδειγμα των τελευταίων αποτελούν μετρητικά με χρήση δεσμών laser. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι ο μη επεμβατικός χαρακτήρας τους (non-intrusive). Ωστόσο, το κόστος κτήσης ενός τέτοιου αισθητήρα είναι αρκετά υψηλό. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες που λειτουργούν μέσω επαφής με το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Λόγω του επεμβατικού τους χαρακτήρα, αδυνατούν να μετρήσουν γεωμετρίες έντονης καμπυλότητας. Η ακρίβειά τους θεωρείται ικανοποιητική και το κόστος τους κυμαίνεται σε λογικά πλαίσια. Ένας τέτοιου τύπου αισθητήρας αναπτύχθηκε πρόσφατα στο εργαστήριο μας ο οποίος, όταν αγγίζει την επιφάνεια ενός μοντέλου, παράγει ηχητικό σήμα και η πληροφορία της μέτρησης καταγράφεται στον υπολογιστή. Αποτελέσματα αναμένονται στο επόμενο διάστημα.



Εικόνα 2.15: Χειροκίνητη κοπή βάσει του σχεδίου ισάλων

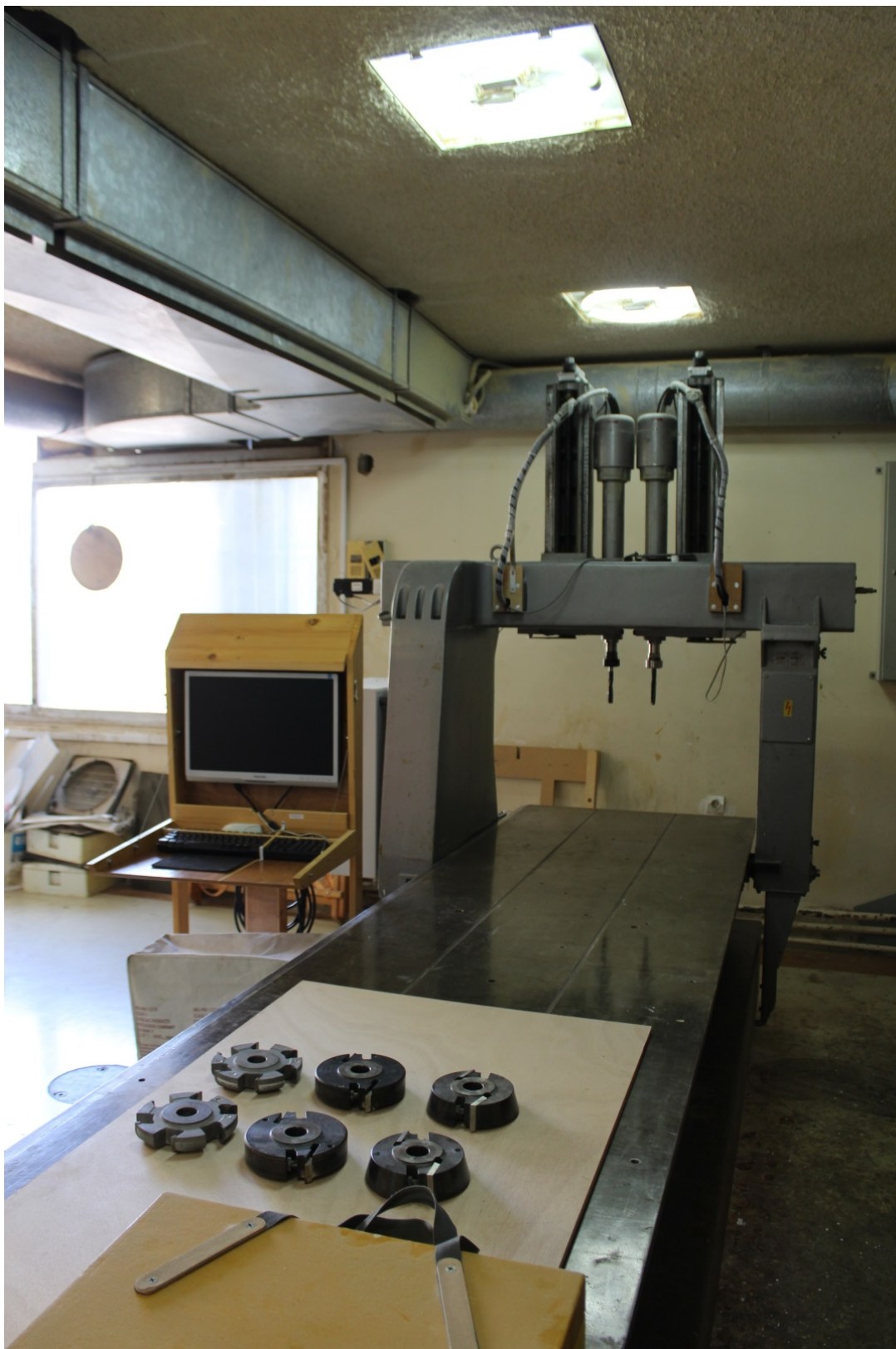
Σε μια προσπάθεια εκσυγχρονισμού της διαδικασίας παραγωγής προτύπων, το ΕΝΘΥ πρόσφατα αναβάθμισε μια παραδοσιακή συμμετρική χειροκίνητη φρέζα 2 ½ αξόνων σε CNC. Η παραδοσιακή μηχανή δεν καθοδηγούταν από κάποιον υπολογιστή, αλλά ο χειριστής χειροκίνητα ακολουθούσε κατά την κοπή τις διαστάσεις ισάλους του σχεδίου (Εικόνα 2.15).

Η αναβαθμισμένη μηχανή περιλαμβάνει τέσσερις σερβοκινητήρες σε σύζευξη με encoders θέσης, καθώς και τον κατάλληλο ελεγκτή (Mach 3). Επιπλέον, έχουν τοποθετηθεί διακόπτες θέσεως για την εύρεση της θέσης αναφοράς. Ο χρήστης επικοινωνεί με τον ελεγκτή μέσω Η/Υ. Το σύστημα συνεργάζεται με το λογισμικό CAD-CAM Rhinoceros 5, το οποίο αναλαμβάνει τη σχεδίαση του τρισδιάστατου μοντέλου, τη ρύθμιση των παραμέτρων και την παραγωγή της διαδρομής κοπής.



Εικόνα 2.16: Χάραξη ισάλων στο μοντέλο μέσω μηχανής CNC.

Παραπάνω, παρατηρούμε μια σύγχρονη μηχανή πέντε αξόνων κατά τη διάρκεια της χάραξης του μοντέλου (Εικόνα 2.16).



Εικόνα 2.17: CNC μηχανή για την παραγωγή μοντέλων στο ΕΝΘΥ

3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ CAD-CAM

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην εφαρμογή συστήματος CAD-CAM στην παραγωγή προτύπων πλοίων. Ειδικότερα, αναδεικνύεται η σημασία χρήσης των εν λόγω συστημάτων, με περισσότερη έμφαση στο Rhinoceros 3D, το οποίο και χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Τέλος, γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο μαθηματικό υπόβαθρο όπου βασίζεται η λειτουργία του προγράμματος, ώστε να υλοποιήσει τελικά τη ζητούμενη γεωμετρική αναπαράσταση.

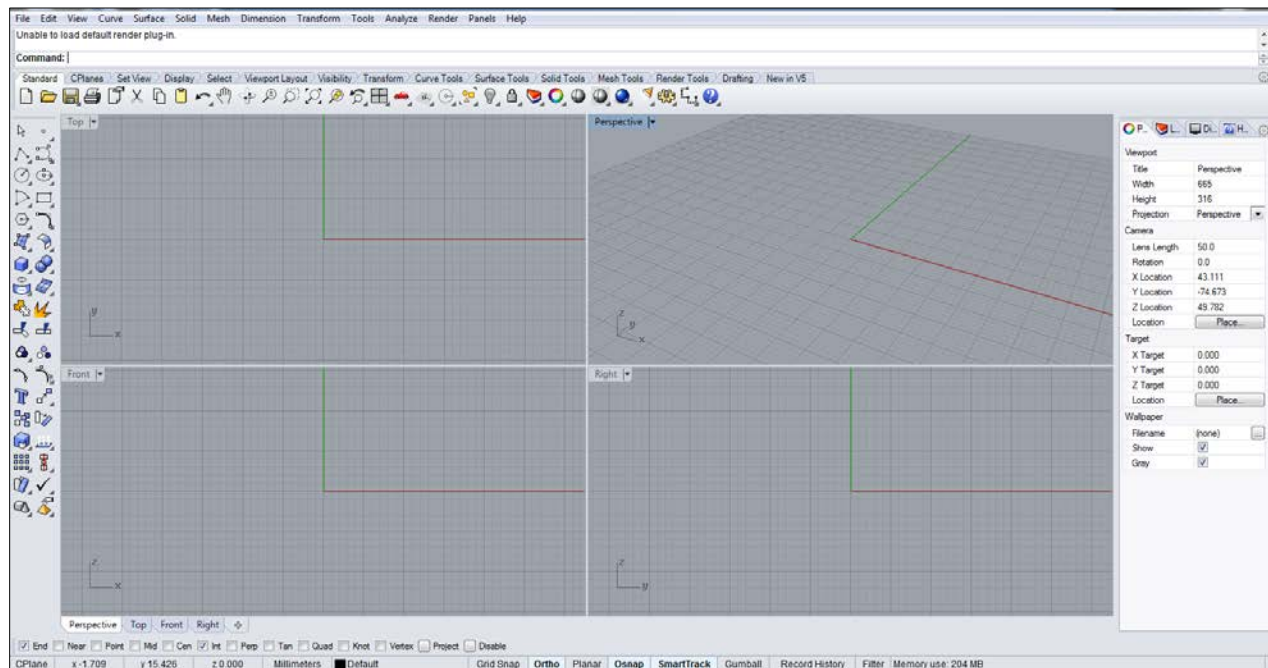
3.1. Χρήση συστημάτων CAD-CAM στην παραγωγή προτύπων πλοίων

Για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, είναι απαραίτητη η χρήση ενός λογισμικού CAD. Παγκοσμίως υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά λογισμικά, κατάλληλα για τέτοιου είδους εφαρμογές. Τα πιο εύχρηστα προγράμματα είναι και τα πιο διαδεδομένα, όπως το BobCAD και SolidCAD. Η χρήση τους δεν απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και πολλές φορές επιτρέπει τη δημιουργία επιφάνειας με λιγότερο από τρεις παραμέτρους. Παρόλο που αποτελούν την ιδανική λύση σε απλές εφαρμογές, τέτοιου είδους λογισμικά δεν είναι κατάλληλα για πιο σύνθετες γεωμετρίες, όπως το μοντέλο ενός πλοίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται προγράμματα σχεδίασης όπου οι γεωμετρικές αναπαραστάσεις βασίζονται σε κάποιο πιο σύνθετο μαθηματικό μοντέλο. Τέτοιο παράδειγμα είναι και η περίπτωση του Rhinoceros, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Τα βασικότερα του πλεονεκτήματα είναι το ευρύ πεδίο εφαρμογών του, η σχετικά εύκολη καμπύλη εκμάθησής του και η υποστήριξη που προσφέρει για μια πληθώρα μορφών γραφής και ανάγνωσης αρχείων γεωμετρικών οντοτήτων. Μάλιστα, φημίζεται για το διαρκώς αναπτυσσόμενο σύστημα διαδικτυακής υποστήριξης, όπου οι χρήστες μπορούν να καταφεύγουν ανά πάσα στιγμή για όποια πληροφορία χρειαστούν, όσον αφορά τις διαθέσιμες λειτουργίες και τις εντολές (12).

Παράλληλα, η ανάγκη δημιουργίας κώδικα μηχανής καθιστά απαραίτητη τη χρήση λογισμικού CAM. Τα λογισμικά CAM συνεργάζονται άριστα με αρχεία CAD, αρκεί τα τελευταία να εμπεριέχουν την πληροφορία μιας ολοκληρωμένης επιφάνειας. Τυχόν ασυνέχειες εμποδίζουν το πρόγραμμα στον υπολογισμό της ορθής διαδρομής κοπής. Κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί λογισμικό CAM της ίδιας εταιρίας (Rhinoceros), για την αποφυγή σφαλμάτων στη συνεργασία των προγραμμάτων. Το Rhinoceros CAM αποτελεί μια γρήγορη και αξιόπιστη επιλογή στην παραγωγή της γεωμετρίας που έχει δημιουργηθεί στο CAD. Πιο συγκεκριμένα, αναλαμβάνει τη διαμόρφωση της διαδρομής κοπής και την προσομοίωση της, βάσει των δεδομένων εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του είναι η λειτουργία του εντός του περιβάλλοντος Rhino, πάνω στη δεδομένα της υπάρχουσας γεωμετρίας, η άμεση ενημέρωση του σε ενδεχόμενες αλλαγές στο σχέδιο και η αποθήκευση της πληροφορίας CAM στο αρχείο .3dm του CAD. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα εύχρηστο και μπορεί να συνεργαστεί με μηχανές κοπής από 2 ½ έως και 8 αξόνων (13).

3.2. Rhinoceros 3D

Κατά τη διάρκεια φοίτησης στη σχολή Ναυπηγών του ΕΜΠ, οι σπουδαστές έρχονται σε επαφή με ποικίλα σχεδιαστικά προγράμματα. Τα τελευταία χρόνια, έχει ενσωματωθεί στο πρόγραμμα σπουδών η διδασκαλία σχεδίασης του πλοίου μέσω του λογισμικού Rhinoceros. Λόγω αυτού, οι φοιτητές είναι εξοικειωμένοι με τη χρήση του και προτιμάται στις περισσότερες εφαρμογές, ακόμη και αν δεν είναι αμιγώς ναυπηγικό πρόγραμμα. Τα πιο δημοφιλή πεδία εφαρμογών του, πέραν της ναυπηγικής, είναι τομείς όπως ο αρχιτεκτονικός και βιομηχανικός σχεδιασμός, η αεροναυπηγική, ακόμη και η μοντελοποίηση κοσμημάτων. Επιπροσθέτως, οι δυνατότητες του επεκτείνονται συνεχώς μέσω της ανάπτυξης πρόσθετων εξειδικευμένων προγραμμάτων (plug-ins). Ενδεικτικά αναφέρουμε τα Maxwell Render και Vray για την παραγωγή φωτορεαλιστικών απεικονίσεων, το Orca 3D για την εκτέλεση ναυπηγικών υπολογισμών και το Grasshopper για παραμετρική σχεδίαση. Ειδικότερα το τελευταίο εργαλείο έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών σχεδιαστών, χάρις τις δυνατότητες που παρέχει στη δημιουργία σύνθετων αλγοριθμικών δομών (14).



Εικόνα 3.1: Περιβάλλον εργασίας Rhinoceros 3D 5 (CAD)

Το περιβάλλον εργασίας του Rhinoceros αποτελείται από το χώρο μοντελοποίησης, τη γραμμή εντολών, τις εργαλειοθήκες, τον κατάλογο και την μπάρα ενδείξεων επιλογών (Εικόνα 3.1). Ο χώρος μοντελοποίησης (Model space) χωρίζεται σε τέσσερα παράθυρα, στα οποία αναπαρίστανται δισδιάστατες ή τρισδιάστατες όψεις του σχεδίου. Επιπλέον, το σύνολο των εντολών και λειτουργιών του προγράμματος εμπεριέχεται στον κατάλογο επιλογών (Menu), στο ανώτερο σημείο της επιφάνειας εργασίας. Εκεί οι εντολές χωρίζονται σε κατηγορίες, ανάλογα με την εφαρμογή τους (Curve σε καμπύλες, Surface σε επιφάνειες κ.ο.κ.). Η εισαγωγή των εντολών από το χρήστη γίνεται είτε με επιλογή τους από την κατάλληλη ομάδα του καταλόγου, είτε με χρήση της

γραμμής εντολών (Command prompt). Αυτή βρίσκεται ακριβώς από κάτω και αποτελεί το σημείο εμφάνισης όλων των μηνυμάτων πληροφοριών από το σύστημα. Παρακάτω βρίσκονται τα εικονίδια των εργαλειοθηκών (Toolboxes). Τέλος, κάτω από το χώρο μοντελοποίησης διακρίνεται η μπάρα των ενδείξεων επιλογών (Status bar), όπου ο χρήστης μπορεί να επέμβει στις επιλογές και να λάβει πληροφορίες για τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος.

Επιπλέον, στην παραπάνω εικόνα είναι ευδιάκριτοι οι x και y άξονες (κόκκινη και πράσινη αντίστοιχα γραμμή) του συστήματος συντεταγμένων. Το πρόγραμμα υποστηρίζει διάφορα συστήματα συντεταγμένων και πολλούς εναλλακτικούς τρόπους εισαγωγής των τιμών τους. Ο πιο απλός τρόπος εισαγωγής σημείων και μηκών είναι στο παράθυρο της επιθυμητής όψης (αριστερό κουμπί στο ποντίκι). Ωστόσο, με αυτό τον τρόπο πολλές φορές δεν προσδιορίζεται με ακρίβεια η ζητούμενη θέση. Για το λόγο αυτό, κρίνεται προτιμότερη η εισαγωγή συντεταγμένων στη γραμμή εντολών. Το στάδιο αυτό της σχεδίασης είναι πολύ σημαντικό, γιατί αποτελεί τη βάση δημιουργίας των γεωμετρικών αντικειμένων που πρόκειται να δημιουργηθούν στη συνέχεια.

3.3. Μαθηματικό υπόβαθρο

Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθούμε στον μαθηματικό τρόπο αναπαράστασης και επεξεργασίας των γεωμετρικών αυτών οντοτήτων. Έστω και μια πρώτη επαφή με τα θεωρητικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στο Rhinoceros, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση της μεθοδολογίας σχεδίασης που ακολουθείται στο πρόγραμμα. Πιο συγκεκριμένα, το μαθηματικό μοντέλο όπου βασίζονται οι γεωμετρικές οντότητες στο Rhinoceros είναι η αναπαράσταση NURBS (12). Οι Non-Uniform Rational B-Splines, όπως μαρτυρά το ακρώνυμό τους, μοιάζουν με B-Splines μη ομοιόμορφης παραμετροποίησης.

Μια καμπύλη B-SPLINE (Basis Smooth Polynomial Line) ορίζεται ως:

$$b(u) = \sum_{i=0}^n b_i N_{i,k}(u), u_{k-1} \leq u \leq u_{n+1}$$

, όπου u_i : οι κόμβοι, οι οποίοι ορίζουν τα όρια των πεπερασμένων διαστημάτων όπου η συνάρτηση βάσης είναι μη μηδενική.

$n + 1$: ο συνολικός αριθμός των σημείων ελέγχου της καμπύλης και

k : η τάξη αυτής.

Οι γεωμετρικοί συντελεστές b_i καλούνται σημεία ελέγχου της καμπύλης και καθορίζουν την μορφή της. Η καμπύλη παρεμβάλλει τα ακραία σημεία ελέγχου και βρίσκεται πάντα εντός του κυρτού πολυγώνου (convex hull) που εκείνα ορίζουν. Επιπλέον, οι οριακές συνθήκες επηρεάζονται από τα σημεία ελέγχου. Η παράγωγος n -βαθμού, στα σημεία $u=0$ και $u=1$, εξαρτάται από τα πρώτα και τα τελευταία, αντίστοιχα, $n+1$ σημεία. Για παράδειγμα, το εφαπτομενικό διάνυσμα (πρώτη παράγωγος) έχει τις διευθύνσεις των τμημάτων $b_1 - b_0$ στην αρχή και $b_n - b_{n-1}$ στο τέλος της

καμπύλης. Συνεπώς, μπορούμε να μεταβάλλουμε την καμπύλη μετακινώντας μόνο τα σημεία ελέγχου.

Οι συναρτήσεις βάσης των B-splines ορίζονται αναδρομικά μέσω της σχέσης Cox-de Boor (15):

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k-1} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u)$$

$$, \text{ με } N_{i,1} = \begin{cases} 1, & \text{εάν } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{αλλιού} \end{cases}, i = 0, \dots, k.$$

Βάσει της παραπάνω σχέσης, αντιλαμβανόμαστε πως αν επιθυμούμε $n + 1$ συναρτήσεις βάσης ($N_{0,k}, \dots, N_{n,k}$), χρειαζόμαστε $n + k + 1$ κόμβους. Συνεπώς, το κομβοδιάγραμμα μιας καμπύλης B-spline πρέπει να έχει $n + k + 1$ στοιχεία. Η επιλογή των κόμβων επηρεάζει το πεδίο ορισμού των συναρτήσεων βάσης και, επομένως, διαφοροποιεί την καμπύλη που αναπαριστούν.

Σε επόμενο στάδιο, μια απλή καμπύλη εκφράζεται ως ρητό τμήμα, με σκοπό την αναπαράσταση κυκλικών τμημάτων και κωνικών τομών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ρητά πολυώνυμα, όπου οι συντεταγμένες της καμπύλης X , Y και Z αντικαθίστονται με τις ομογενείς συντεταγμένες X/W , Y/W και Z/W , αντίστοιχα. Οι ρητές B-Splines μας δίνουν τις Rational B-Splines, οι οποίες είναι ομοιόμορφες ή ανομοιόμορφες (NURBS). Στην πρώτη περίπτωση, συντελεστής W είναι ίδιος για όλες τις συντεταγμένες X , Y και Z , οπότε λαμβάνουμε την ίδια καμπύλη με τις καρτεσιανές συντεταγμένες. Στη δεύτερη, ο συντελεστής αυτός είναι διαφορετικός για κάθε συντεταγμένη, οπότε η τελική καμπύλη είναι διαφορετική. Συνεπώς, μπορούμε να μεταβάλλουμε τη μορφή της καμπύλης με ένα πρόσθετο τρόπο, μεταβάλλοντας την τέταρτη συντεταγμένη του (το βάρος του σημείου ελέγχου) W .

Η γενική εξίσωση μιας καμπύλης NURBS βαθμού d είναι:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n b_i R_{i,d}(u)$$

$$, \text{ όπου } R_{i,d}(u) = \frac{w_i N_{i,d}(u)}{\sum_{j=0}^n w_j N_{j,d}(u)}$$

$d = k - 1$: ο βαθμός της καμπύλης

w_i : τα βάρη των σημείων ελέγχου.

Ο παρανομαστής στην παραπάνω σχέση λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, όταν $\forall i, w_i = 1$ εφόσον ισχύει πάντα $\sum_{i=0}^n N_{i,d}(u) = 1$. Σε αυτήν την περίπτωση, η καμπύλη NURBS εκφυλίζεται σε B-Spline, καθώς δεν διαθέτει πια ρητές συναρτήσεις βάσης.

Γενικώς, οι ρητές βασικές συναρτήσεις $R_{i,d}(u)$ έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Είναι θετικές: $R_{i,d}(u) \geq 0, \forall i, p, 0 \leq u \leq 1$
2. Ισχύει $\sum_{i=0}^n R_{i,d}(u) = 1, 0 \leq u \leq 1$
3. Ισχύει ακόμη $R_{i,d}(0) = R_{i,d}(1) = 1$
4. Μεγιστοποιούνται μόνο μια φορά στο διάστημα $[0,1]$
5. Τοπικότητα, που συνεπάγεται ότι κάθε τμήμα της καμπύλης εξαρτάται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων ελέγχου, ο οποίος είναι γενικός μικρότερος ή το πολύ ίσος με το συνολικό αριθμό σημείων ελέγχου. Αυτό συμβαίνει γιατί, για κάθε διάστημα κόμβων, τουλάχιστον $d+1$ από τις συναρτήσεις $R_{i,p}(u)$ είναι μη μηδενικοί και είναι οι $R_{i-d,d}(u), \dots, R_{i,d}(u)$ για το διάστημα $[u_i, u_i + 1]$. Η συγκεκριμένη ιδιότητα εκφράζεται μαθηματικά από τη σχέση:

$$R_{i,d}(u) = 0, \text{ για } u \notin [u_i, u_i + d + 1]$$

6. Όλες οι παράγωγοι της $R_{i,d}(u)$ υπάρχουν στο εσωτερικό ενός διαστήματος όπου η βασική συνάρτηση είναι μη μηδενική. Σε έναν κόμβο η $R_{i,d}(u)$ είναι $d-k$, φορές παραγωγίσιμη, όπου k είναι η πολλαπλότητα του κόμβου.
7. Οι απλές βασικές συναρτήσεις είναι μια ειδική περίπτωση των ρητών συναρτήσεων, όπως αποδεικνύεται από τη σχέση:

$$w_i = a, a \neq 0, \forall i \rightarrow R_{i,d}(u) = N_{i,d}(u)$$

Βάσει των παραπάνω ιδιοτήτων, οι καμπύλες NURBS παρουσιάζουν τα ακόλουθα σημαντικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (16):

1. Εφόσον χρησιμοποιείται κομβοδιάνυσμα με μη περιοδικούς κόμβους, η καμπύλη παρεμβάλει τα ακραία σημεία, ή αλλιώς:

$$C(0) = b_0 \text{ και } C(1) = b_n$$

2. Η καμπύλη δεν μεταβάλλεται από τους γεωμετρικούς μετασχηματισμούς, οι οποίοι πραγματοποιούνται στα σημεία ελέγχου.
3. Τοπικότητα, όπως και προηγουμένως. Εάν μετακινήσουμε δηλαδή ένα σημείο ελέγχου b_i ή αλλάξουμε το βάρος του w_i , τότε η αλλαγή επηρεάζει μόνο το τμήμα της καμπύλης $[u_i, u_i + d + 1]$.
4. Η καμπύλη περιέχεται στο κυρτό πολύγωνο που ορίζουν τα σημεία ελέγχου της. Επιπλέον ισχύει και τοπικότητα στο κυρτό πολύγωνο. Το τμήμα της καμπύλης $C(u)$, που ορίζεται

μεταξύ των κόμβων $[u_i, u_i + 1]$, περιέχεται μέσα στο κυρτό πολύγωνο που ορίζεται από τα σημεία ελέγχου b_{i-d}, \dots, b_i .

5. Ο αριθμός τομών επιπέδου (ή ευθείας για την περίπτωση της δυσδιάστατης καμπύλης) με την καμπύλη είναι μικρότερος ή ίσος από τον αριθμό τομών του επίπεδου με το πολύγωνο ελέγχου.
6. Με μία μόνο αναπαράσταση NURBS μπορεί να περιγραφεί οποιαδήποτε καμπύλης. Οι πολυωνυμικές καμπύλες BSpline είναι μια ειδική περίπτωση των ρητών καμπυλών B-Spline.
7. Στα εσωτερικά σημεία της καμπύλης (εκτός των τιμών των κόμβων) υπάρχει η παράγωγος οποιουδήποτε βαθμού. Στις τιμές των κόμβων υπάρχει η παράγωγος $k-d$ βαθμού, όπου k η πολλαπλότητα του κόμβου.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν τις καμπύλες NURBS τις πλέον χρησιμοποιούμενες για την αναπαράσταση καμπυλών στην σχεδίαση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το μεγαλύτερο πρακτικά ενδιαφέρον αποτελεί η δυνατότητα σύνδεσης των γειτονικών τμημάτων των καμπυλών με την επιθυμητή λειότητα. Το πόρισμα αυτό γίνεται αντιληπτό μέσω του τελευταίου από τα παραπάνω χαρακτηριστικά και εκφράζεται μέσω του θεωρήματος (16):

“Εστω ο εμφανίζεται m φορές μεταξύ των κόμβων $(t_j)_{j=i-d}^{m+d}$, όπου m : ακέραιος που ανήκει στο διάστημα: $1 \leq m \leq d + 1$, δηλαδή”:

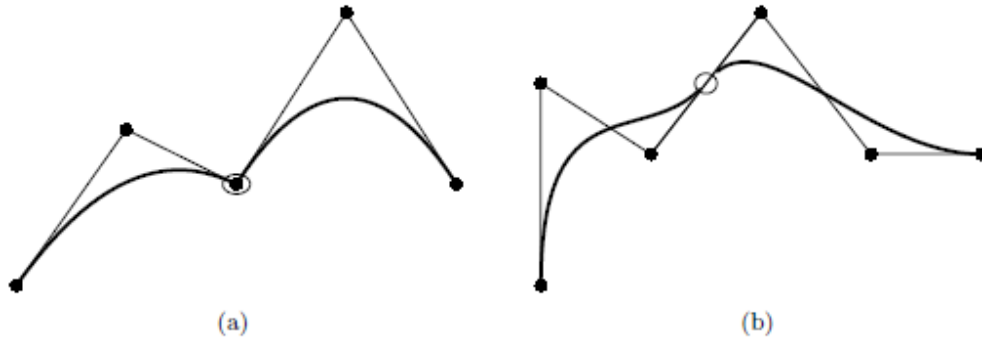
$$t_i < t_{i+1} = \dots = t_{i+m} < t_{i+m+1}$$

Τότε η καμπύλη spline:

$$f(t) = b_{i,d,1}(t)B_{i,0}(t) + b_{i+m,d,1}(t)B_{i+m,0}(t)$$

έχει συνεχείς παραγώγους τάξης έως και $d - m$ στο σημείο t_{i+1} .”

Βάσει του παραπάνω θεωρήματος, εάν όλοι οι κόμβοι είναι διακριτοί, τότε μια γραμμική spline θα είναι συνεχής, μια δευτεροβάθμια θα έχει επιπλέον συνεχή πρώτη παράγωγο, μια κυβική θα έχει συνεχή δεύτερη παράγωγο κ.ο.κ. Σε περίπτωση που $m > 1$, κάθε φορά που προστίθενται ένας κόμβος στο t_{i+1} ο αριθμός των συνεχώς παραγώγων μειώνεται κατά 1. Συνεπώς, μια δευτεροβάθμια spline θα είναι γενικά συνεχής σε διπλό κόμβο, ενώ μια κυβική θα έχει επιπλέον συνεχή πρώτη παράγωγο (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Τετραγωνική (a) και κυβική (b) spline με διπλό κόμβο στο κυκλωμένο σημείο.

Σε δεύτερο επίπεδο, το τανυστικό γινόμενο δύο καμπυλών B-Spline διαμορφώνει τις επιφάνειες B-Spline. Γενικά, η παραμετρική μορφή επιφανειών ορίζει μια απεικόνιση του παραμετρικού χώρου $E2$ (που ορίζεται από το ορθογώνιο $u_{min} \leq u \leq u_{max}$ και $v_{min} \leq v \leq v_{max}$ σε μια επιφάνεια $s(u, v)$ στον καρτεσιανό χώρο $E3$.

Για τον ορισμό μιας γενικής επιφάνειας B-Spline, χρειαζόμαστε:

- ο Ένα διδιάστατο πίνακα σημείων ελέγχου $\{b_{i,j}\}$ με $n+1$ και $m+1$ στοιχεία στις δύο διαστάσεις. Ας υποθέσουμε εδώ ότι $i=0, \dots, n$ και $j=0, \dots, m$.
- ο Το βαθμό της επιφάνειας στη u διεύθυνση, έστω $d1$ και κατά συνέπεια η τάξη $k1$ θα είναι $k1=d1+1$
- ο Το βαθμό της επιφάνειας στη v διεύθυνση, έστω $d2$ και κατά συνέπεια η τάξη $k2$ θα είναι $k2=d2+1$

- ένα κομβοδιάγραμμα στην u διεύθυνση, έστω $u=\{u_0, u_1, \dots, u_{n+k1}\}$ και

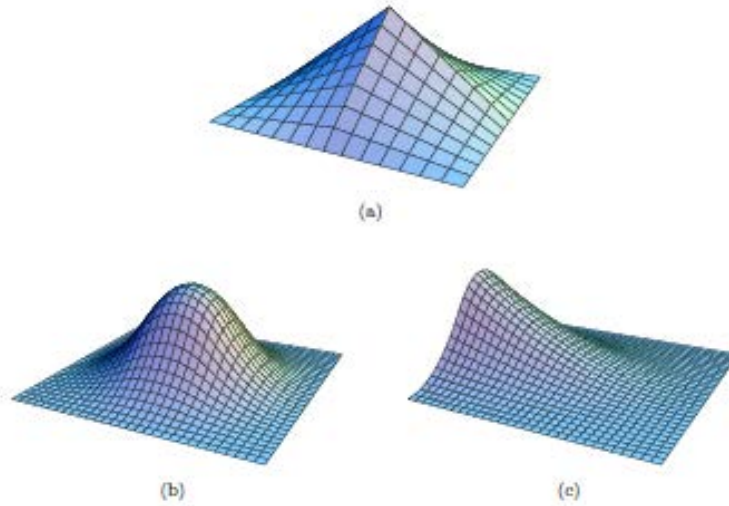
- ένα κομβοδιάγραμμα στην v διεύθυνση, έστω $v=\{v_0, v_1, \dots, v_{n+k2}\}$.

Δεδομένων των παραπάνω, η σχέση αναπαράστασης μιας καμπύλης B-Spline είναι:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{i,j} N_{i,k1}(u) N_{j,k2}(v)$$

, όπου $N_{i,k1}(u)N_{j,k2}(v)$: οι ίδιες συναρτήσεις βάσης (τάξης $k1$ και $k2$ αντιστοίχως) που ορίστηκαν και στην περίπτωση των καμπυλών B-Spline.

Ας φανταστούμε τις συναρτήσεις βάσης των B-Spline ως τις επιφάνειες που προκύπτουν από το γινόμενο των απλών συναρτήσεων βάσης στις δύο κατευθύνσεις. Επιπλέον μπορούμε να υπολογίσουμε μια ισοπαραμετρική στη διεύθυνση u ή v και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Cox-de Boor για την εναπομένουσα παράμετρο, να υπολογίσουμε το σημείο της επιφάνειας. (Εικόνα 3.3).



Εικόνα 3.3: B-Spline διγραμμική (a), διτετραγωνική (b) και διτετραγωνική με τρεις κόμβους σε μια διεύθυνση

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη επιφάνεια είναι η δικυβική B-Spline $S(u, v)$ με $(u, v) \in [0,1] \times [0,1]$, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{i,j} N_{i,4}(u) N_{j,4}(v)$$

, όπου $n+1, m+1$: τα σημεία ελέγχου στις δύο κατευθύνσεις. Επομένως, η επιφάνεια διαθέτει συνολικά $(n+1) \times (m+1)$ σημεία ελέγχου, τα οποία σχηματίζουν το λεγόμενο πολυέδρο ελέγχου (control net) της επιφάνειας.

Κατ' αναλογία με τις καμπύλες, θέτουμε:

$$R_{i,j}(u) = \frac{w_{i,j} N_{i,d_1}(u) N_{i,d_1}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{k_1,k_2} N_{k_1,d_1}(u) N_{k_2,d_2}(v)}$$

, οπότε η εξίσωση της επιφάνειας NURBS διαμορφώνεται ως εξής:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m b_{i,j} R_{i,j}(u, v)$$

4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΠΡΟΤΥΠΟΥ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η σχεδίαση της γάστρας των μοντέλων, όπως υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στη διαχείριση των κατασκευαστικών σχεδίων, η οποία προηγείται της εισαγωγής τους στο πρόγραμμα CAD και στη μεθοδολογία ανασχεδιασμού της γεωμετρίας που αυτά αναπαριστούν. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η παραγωγή μιας ομαλής, ενιαίας επιφάνειας, η οποία σε επόμενο στάδιο εισάγεται στο λογισμικό CAM.

4.1. Διαχείριση κατασκευαστικών σχεδίων

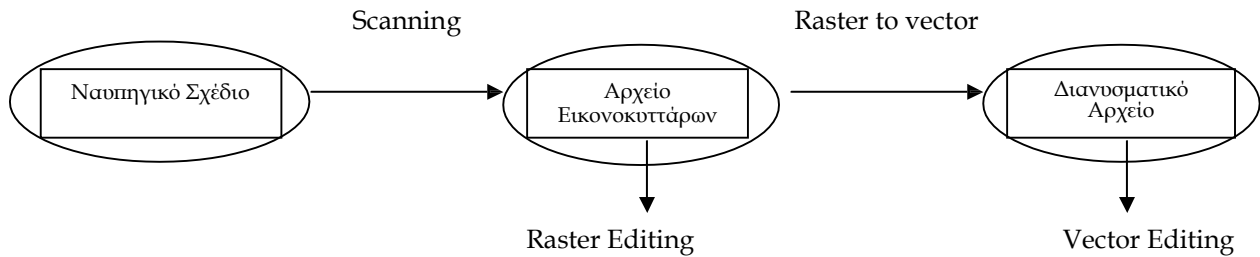
Όπως προαναφέρθηκε, βασικό περιορισμό στην κατασκευή υπαρκτών πλοίων αποτελεί η προέλευση των σχεδιαστικών γραμμών, η διαθεσιμότητα των οποίων είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό, οι ναυτιλιακές εταιρίες παρέχουν συνήθως στον μελετητή τα κατασκευαστικά σχέδια που, σε περιπτώσεις σύγκρισης μεταξύ του πραγματικού πλοίου και του προτύπου αποτελούν την πιο ορθή επιλογή ως αναφορά. Πρέπει ωστόσο να επισημανθεί ότι τα κατασκευαστικά σχέδια διαφέρουν από τα ναυπηγικά (σχέδιο γραμμών).

Παράλληλα, αν και η γενικότερη παραγωγή των τεχνικών σχεδίων γίνεται κατά βάσει μέσω συστημάτων CAD, τα περισσότερα ναυπηγικά σχέδια συναντώνται στην παραδοσιακή χειροποίητη μορφή. Το γεγονός αυτό αφενός δυσκολεύει τη διαχείρισή τους σε κάποιο πρόγραμμα CAD και αφετέρου θέτει ερωτήματα όσον αφορά την ακρίβεια των διαστάσεων που μετριοούνται στο σχέδιο, αλλά και την ορθή αναπαράσταση των γεωμετρικών οντοτήτων. Συνεπώς, η δουλειά του σχεδιαστή γίνεται πιο απαιτητική, καθώς στην ουσία προσπαθεί να αναλύσει τη σχεδιαστική πληροφορία που εμπεριέχεται στα κατασκευαστικά σχέδια για να παράξει ένα καινούργιο σχέδιο γραμμών (Body Plan).

Ως αποτέλεσμα, η γεωμετρία που απεικονίζουν δεν μπορεί να εισαχθεί απευθείας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Για το πρόβλημα αυτό, υπάρχουν τρεις μέθοδοι αντιμετώπισης. Η πρώτη αφορά την περιγραφή και καταγραφή των βασικών γραμμών που συνθέτουν την γεωμετρία ενός πλοίου από σημεία (offsets), τα οποία στη συνέχεια εισάγονται στο πρόγραμμα. Στη δεύτερη, τα σχέδια σαρώνονται και εισάγονται ως εικόνες, οι οποίες λειτουργούν ως βάση για την αποτύπωση της γεωμετρίας των γραμμών. Ωστόσο, περιορίζεται σε μια ηλεκτρονική “φωτογράφιση” του ναυπηγικού σχεδίου, οπότε το προκύπτον αρχείο δεν εμπεριέχει γεωμετρικές οντότητες, όπως ευθύγραμμα τμήματα ή κυκλικά τόξα. Η απουσία αυτών είναι κρίσιμη για την περαιτέρω επεξεργασία του σχεδίου σε λογισμικό CAD.

Συνεπώς, την πιο αποδοτική λύση αποτελεί μια μέθοδος μετατροπής των σχεδίων από το χαρτί (hardcopies) σε διανυσματικά αρχεία (vector files). Η τελευταία πρόταση, η οποία και υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία, αποτελεί τον καλύτερο συνδυασμό μεταξύ χρόνου και ποιότητας. Η μετατροπή των εικονοκυττάρων σε διανυσματικές οντότητες προϋποθέτει τη χρήση ενός προγράμματος ψηφιοποίησης, το οποίο θα εξασφαλίσει την άμεση εισαγωγή των γραμμών σε ψηφιακή μορφή. Η ακρίβεια των διανυσμάτων στο ψηφιακό αρχείο εξαρτάται από την ποιότητα

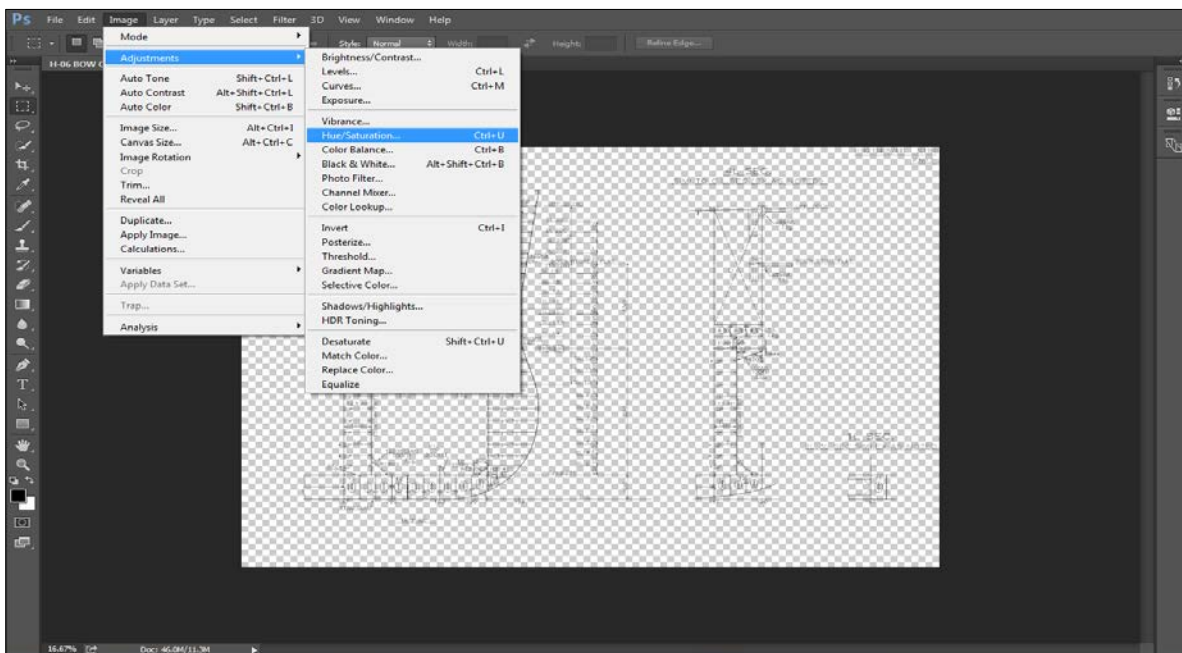
του αρχικού σχεδίου. Σε κάθε περίπτωση, ο σχεδιαστής καλείται να διορθώσει τις όποιες ανακρίβειες προκύπτουν από τη μεταφορά δεδομένων.



Εικόνα 4.1: Στάδια ψηφιοποίησης σχεδίων

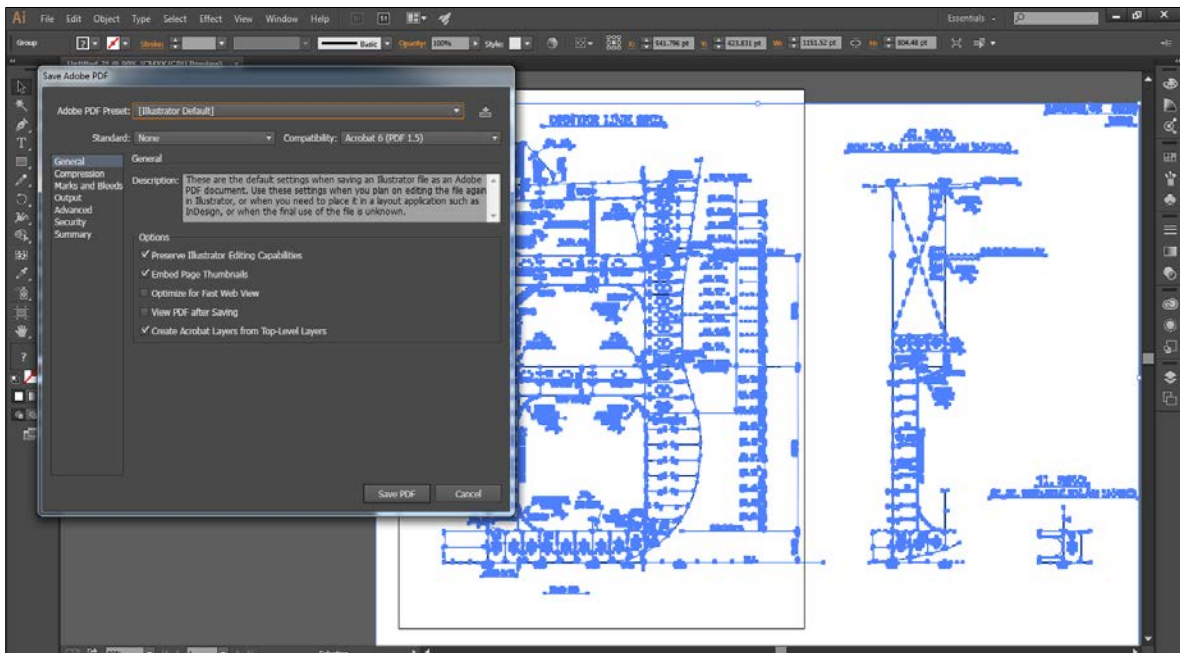
Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, δοκιμάστηκαν αρχικά οι δύο πρώτες μέθοδοι, χωρίς όμως να αποφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επομένως, καταλήξαμε στην τρίτη διαδικασία, η οποία πραγματοποιήθηκε μέσω των προγραμμάτων Adobe Photoshop και Illustrator. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθήσαμε τα εξής βήματα:

- Εισαγωγή του αρχείου στο Photoshop.
- Αλλαγή του κορεσμού στην επιλογή *Image\Adjustments\Hue/Saturation* σε *Saturation=-100%*.



Εικόνα 4.2: Αλλαγή κορεσμού (Adobe Photoshop)

- Αποθήκευση σε μορφή .psd
- Εκκίνηση του Illustrator και δημιουργία νέου αρχείου (*File/New*)
- Εκλογή του αρχείου .psd στο *File/ Place*
- Επιλογή *Window/ Image Trace*
- Χρήση των προεπιλεγμένων ρυθμίσεων μέσω του *Trace* στο αναδυόμενο παράθυρο του *Image Trace*
- Δυνατότητα εκλογής επιθυμητού αποτελέσματος μέσω δοκιμών στο *Preset*
- Επιλογή *Object/ Image Trace/Expand*
- Αποθήκευση σε αρχείο .pdf



Εικόνα 4.3: Χρήση Image Trace (Adobe Illustrator)

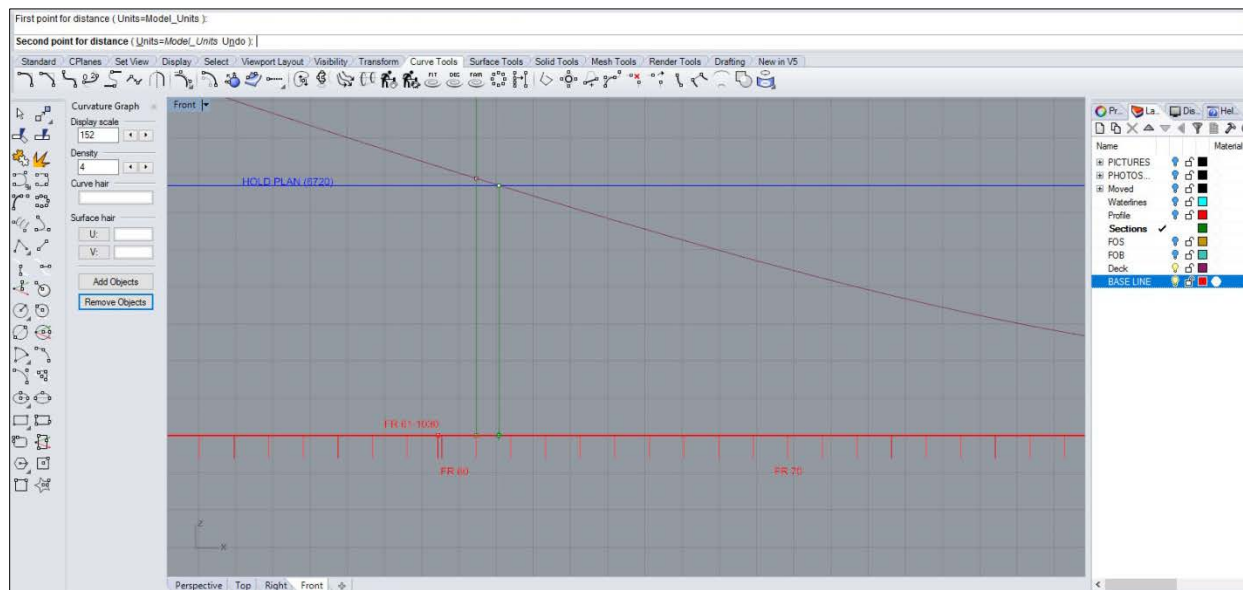
Τα παραπάνω βήματα εφαρμόστηκαν στα κατασκευαστικά σχέδια που διατέθηκαν σε hardcopy από τη ναυτιλιακή εταιρία. Αυτά ήταν το σχέδιο της πλώρης (“Bow Construction”), της πρύμνης (“Stern Construction”) και του μέσου νομέα (“Midship Section”), απ’ όπου αντλήθηκαν το προφίλ της πλώρης, οι πρωραίοι νομείς, οι νομείς στις φράκτες των κυτών και κάποιοι πρυμναίοι νομείς. Το προφίλ της πρύμνης και οι περισσότεροι πρυμναίοι νομείς προέκυψαν από το σχέδιο του μηχανοστασίου (“Engine Room Construction”). Το σχέδιο αυτό διατέθηκε σε διανυσματικό αρχείο, οπότε ήταν εφικτή η απευθείας εισαγωγή του στο πρόγραμμα CAD.

4.2. Επεξεργασία καμπυλών στο περιβάλλον CAD

Όπως έχει προαναφερθεί στην εισαγωγή, ζητούμενο στη φάση της σχεδίασης είναι η δημιουργία μιας ομαλής επιφάνειας πριν την εισαγωγή στο λογισμικό CAM. Το γεγονός αυτό προϋποθέτει την ένωση και ανακατασκευή των γραμμών που λήφθηκαν από τη ψηφιοποίηση του σχεδίου. Πρόκειται ουσιαστικά για μια παρεμβολή των τμημάτων που ο σχεδιαστής θεωρεί ότι ανήκουν στην ίδια γεωμετρική οντότητα (γραμμή) σε μια ενιαία καμπύλη (spline), όπως και την τελική της εξομάλυνση. Περιπτώσεις ασυνεχειών στο σχέδιο οδηγούν σε μέτριας ποιότητας επιφάνεια κατά τη διάρκεια της κοπής.

Σημειώνεται εδώ ότι το πλοίο σχεδιάζεται σε κλίμακα 1:1 του πραγματικού πλοίου και όχι του μοντέλου. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εύκολος ο έλεγχος των μετρήσεων και των διαστάσεων στα κατασκευαστικά σχέδια, εφόσον αυτά αφορούν διαστάσεις του πραγματικού πλοίου. Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τα βήματα που εκπονήθηκαν, ώστε να δημιουργήσουμε ένα εξομαλυμένο πλέγμα γραμμών με όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση από τις αρχικές γραμμές.

Το πρώτο μέλημα πριν από την εισαγωγή του σχεδίου γραμμών στο περιβάλλον σχεδίασης του προγράμματος είναι ο ορισμός μιας γραμμής αναφοράς (baseline), πάνω στην οποία εδράζεται το πλοίο, η οποία συμπίπτει με τη γραμμή της τρόπιδας (Centerline). Αυτή σχεδιάζεται βάσει των πραγματικών διαστάσεων του πλοίου και τμηματοποιείται σύμφωνα με την ισαπόσταση νομέων (frame spacing) των σχεδίων μας. Η γραμμή αυτή θα αποτελέσει τον οδηγό, πάνω στον οποίο θα τοποθετηθούν οι νομείς μετά την εισαγωγή και εξομάλυνσή τους. Έτσι, θα είμαστε σε θέση να ορίσουμε την ορθή θέση κάθε νομέα κατά τον άξονα x. Επιπλέον, με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η διόρθωση πιθανών σφαλμάτων στην ευθυγράμμιση, κατά την εισαγωγή των γραμμών. Παράλληλα, προτείνεται η δημιουργία ενός αντίγραφου των γραμμών πριν την επεξεργασία τους, η οποία μας παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της απόκλισης τους από τις τελικές γραμμές.



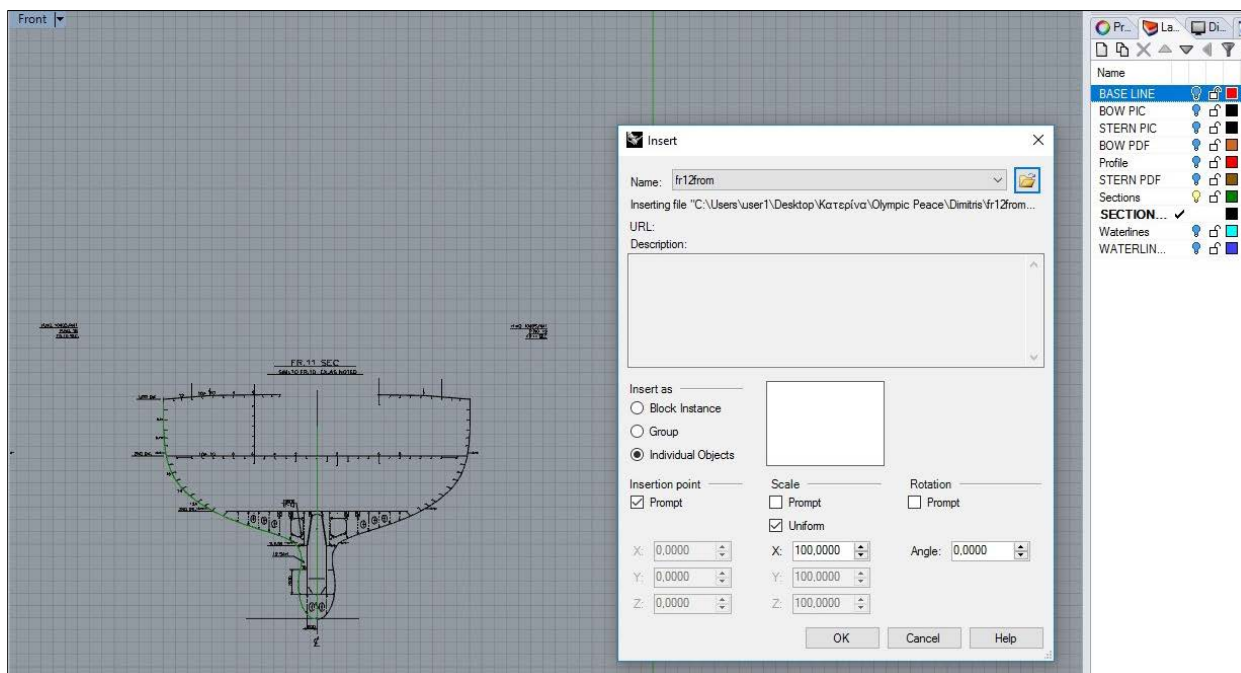
Εικόνα 4.4: Γραμμή αναφοράς (Baseline)

Το επόμενο βήμα είναι η εξομάλυνση, η οποία ακολουθώντας περιγράφεται αναλυτικά. Η διαδικασία εφαρμόστηκε πρώτα στο προφίλ της πλώρης και της πρύμνης και έπειτα στους νομείς. Ακολουθώντας, παρατίθενται τα στάδια που ακολουθήσαμε για την επεξεργασία ενός πρυμναίου νομέα από το σχέδιο του φορτηγού πλοίου, συμπεριλαμβανομένων και των εντολών που εφαρμόστηκαν (13). Τα παρακάτω βήματα είναι κοινά για όλους τους νομείς, όπως και την καμπύλη του προφίλ. Ακόμη, οι διαδικασίες και λεπτομέρειες κλήσης των εντολών αντιστοιχούν στην πέμπτη έκδοση του Rhinoceros 3D, η οποία χρησιμοποιείται στις εφαρμογές του ΕΝΘΥ.

Στις επόμενες παραγράφους, θα προσπαθήσουμε να δημιουργήσουμε έναν οδηγό της διαδικασίας εξομάλυνσης γραμμών για τους μελλοντικούς χρήστες. Σε αυτόν περιλαμβάνεται περιγραφή κάθε εντολής, μαζί με ένα στιγμιότυπο του προγράμματος. Ας σημειωθεί ότι οι χρησιμοποιούμενες τιμές αναφέρονται μόνο στην περίπτωση του πρυμναίου νομέα του φορτηγού πλοίου και μεταβάλλονται, βάσει του τιθέμενου προβλήματος και της κρίσης του σχεδιαστή.

➤ Εισαγωγή αρχείου

Με χρήση της εντολής *Insert*, είναι δυνατή η εισαγωγή του αρχείου ενός νομέα από τη βιβλιοθήκη, η μεγέθυνση και περιστροφή του. Καθώς η κλίμακα του συγκεκριμένου σχεδίου είναι 1:100, προχωρήσαμε σε ομοιόμορφη μεγέθυνση $X=100.000$, ενώ η γωνία περιστροφής στο συγκεκριμένο παράδειγμα παρέμεινε μηδενική ($Angle=0$). Μάλιστα, το κάθε στοιχείο που αποτελεί το νομέα μπορεί να παρουσιαστεί ως ξεχωριστό αντικείμενο, μέσω της επιλογής *Individual Objects*. Η εισαγωγή των νομέων της πρύμνης έγινε από το αρχείο του σχεδίου "Engine Room Construction".

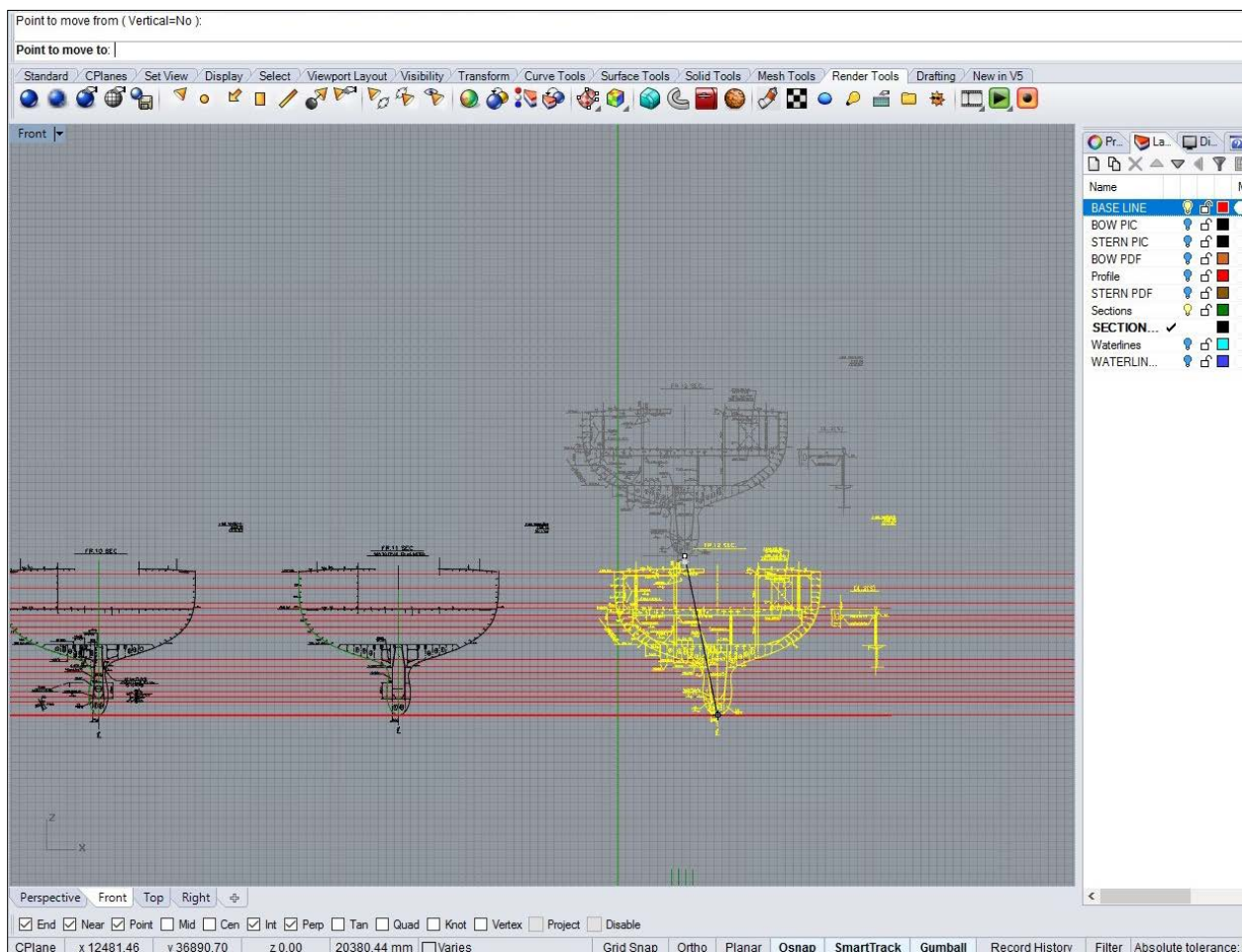


Εικόνα 4.5: Εισαγωγή αρχείου νομέα

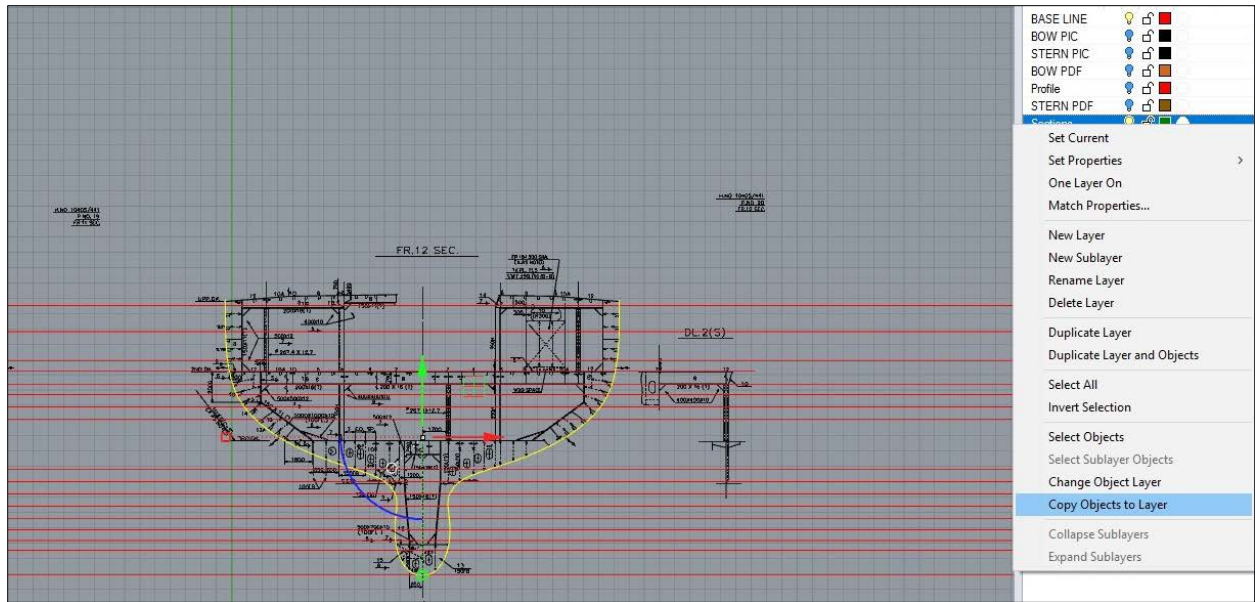
Μπορούμε να επαληθεύσουμε εάν η κλίμακα που επιλέχθηκε κατά την εισαγωγή είναι σωστή μετρώντας μια διάσταση που αναγράφεται στο ψηφιοποιημένο αρχείο. Εναλλακτικά, η επαλήθευση πραγματοποιείται με μέτρηση στα εκτυπωμένα σχέδια (hardcopy). Σε κάθε περίπτωση, πρέπει συνεχώς να επαληθεύουμε ότι το μέγεθος των γραμμών που εισάγονται από τα ψηφιοποιημένα σχέδια είναι σωστό. Όσο μικρότερη είναι η απόκλιση από τα πραγματικά σχέδια, τόσο καλύτερη θα είναι η προσέγγιση κατά τη σχεδίαση και εξομάλυνση των γραμμών.

➤ *Μετακίνηση στη Γραμμή Αναφοράς - Αντιγραφή σε διαφορετικό επίπεδο*

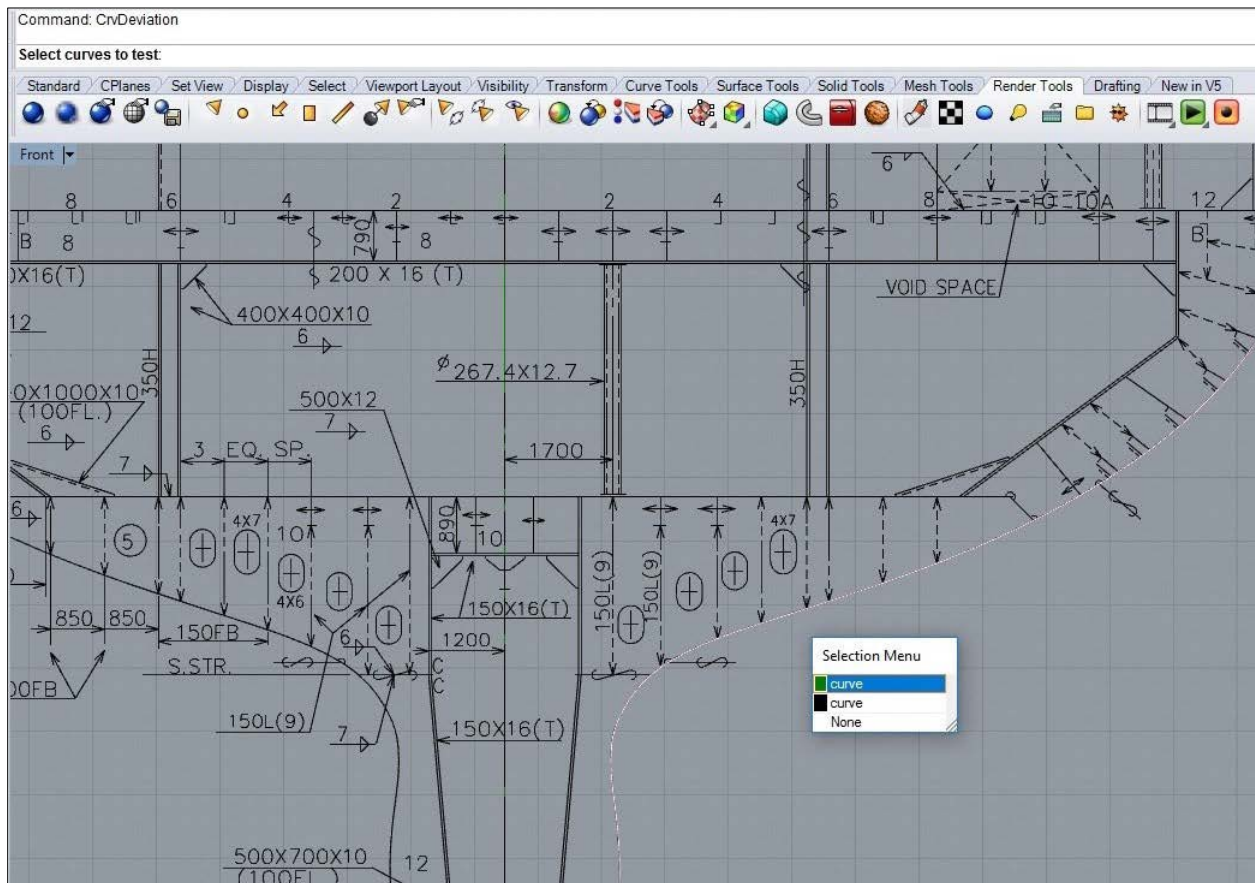
Έχοντας επιλέξει όλα τα στοιχεία του σχεδίου, τα μετακινούμε ώστε το σημείο τομής τους με την Centerline να έρθει σε επαφή με τη γραμμή αναφοράς. Η εντολή που χρησιμοποιείται σε αυτήν την περίπτωση είναι η *Move* (Εικόνα 4.6). Η αντιγραφή του σχεδίου σε δεύτερο επίπεδο (layer) πραγματοποιείται με επιλογή των αντικειμένων και χρήση της επιλογής *Copy Objects to Layers* στο επιθυμητό layer. Το βήμα αυτό κρίνεται απαραίτητο, ώστε να εκτιμηθεί η απόκλιση του νομέα πριν και μετά την εξομάλυνση (Εικόνα 4.7- 4.8).



Εικόνα 4.6: Μετακίνηση στη Γραμμή Αναφοράς



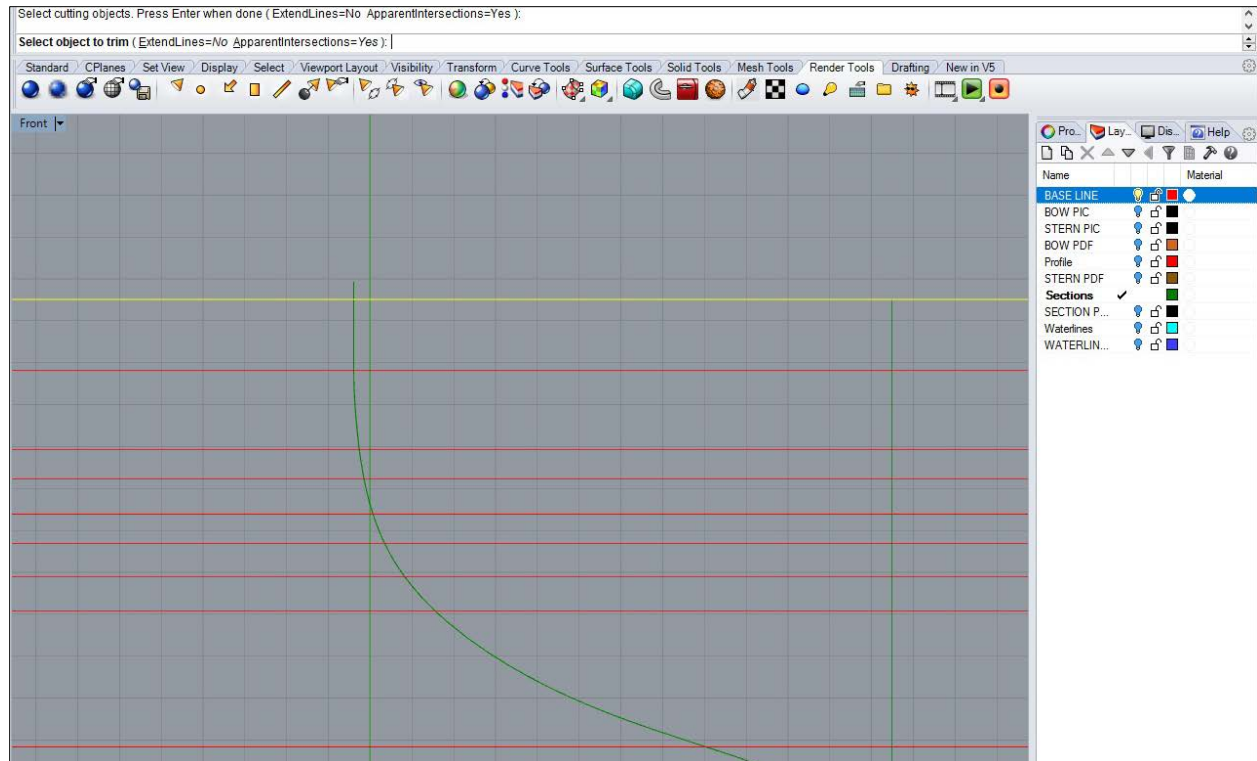
Εικόνα 4.7: Αντιγραφή σε δεύτερο layer



Εικόνα 4.8: Απόκλιση των δύο πλευρών

➤ Καθορισμός ύψους κυρίου καταστρώματος

Το πραγματικό πλοίο εμφανίζει τόσο κυρτότητα, όσο και σιμότητα στο ανώτερο κατάστρωμα. Καθώς όμως το στοιχείο αυτό δεν μας ενδιαφέρει σε ερευνητικό πλαίσιο, επιλέξαμε, χάριν ευκολίας, να σχεδιάσουμε το μοντέλο χωρίς σιμότητα και κυρτότητα. Για το λόγο αυτό, καθορίσαμε το ανώτατο ύψος των καμπυλών στο κοίλο του πλοίου, μέσω της εντολής *Trim*. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργώντας μια ευθεία στο ύψος του κοίλου αφαιρέσαμε το άνω τμήμα της καμπύλης (Εικόνα 4.9).

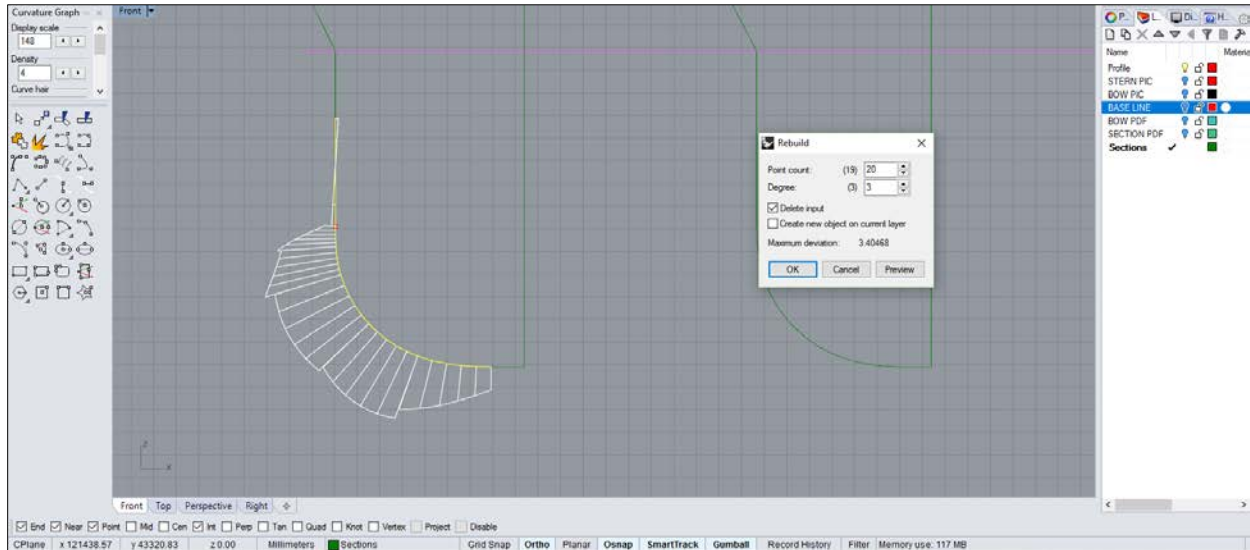


Εικόνα 4.9: Αφαίρεση τμήματος πάνω από το κοίλο

➤ Ανακατασκευή γραμμών

Παρ' όλο που στα κατασκευαστικά σχέδια οι καμπύλες θεωρούνται επαρκώς ομαλές, η διαδικασία μετατροπής τους σε ψηφιακό διανυσματικό αρχείο αλλοιώνει την εξομάλυνση των παραγόμενων B-splines. Ως εκ τούτου, οι γραμμές μετά την εισαγωγή στο CAD εμφανίζουν διανυσματικό θόρυβο και ασυνέχεια. Αν και ενωμένες, οι καμπύλες δεν είναι πρακτικά ενιαίες, αλλά αποτελούνται από μεμονωμένα τμήματα που εμφανίζουν μεταξύ τους ασυνέχεια κλίσης ή και θέσης. Χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία, έτσι ώστε κάθε καμπύλη να αναπαρίσταται από όσο το δυνατόν λιγότερες γεωμετρικές οντότητες, κατάλληλα συνδεδεμένες βάσει της εκάστοτε εφαρμογής.

Για το σκοπό αυτό, ξεκινούμε με το διαχωρισμό της καμπύλης (*Split*) στα σημεία που παρουσιάζουν ασυνέχεια θέσης και σε όσα προβλέπεται, βάσει σχεδίου, αλλαγή κλίσης (ακμές). Στη συνέχεια, ανακατασκευάζουμε το κάθε τμήμα ξεχωριστά με χρήση της εντολής *Rebuild* (Εικόνα 4.10). Επιλέγοντας τον βαθμό και τον αριθμό σημείων ελέγχου της, προκύπτει μια προσέγγιση του κάθε τμήματος υπό δεδομένη απόκλιση. Είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να επιλέξει τον κατάλληλο αριθμό σημείων, έτσι ώστε να προκύψει η όσο το δυνατόν πιστότερη περιγραφή της αυθεντικής καμπύλης με την ελάχιστη δυνατή απόκλιση.



Εικόνα 4.10: Ανακατασκευή καμπύλης νομέα

➤ **Εξομάλυνση τμημάτων καμπύλης**

Το συγκεκριμένο στάδιο μπορεί να παραβλεφθεί, εάν η εξομάλυνση πραγματοποιηθεί απευθείας στις επιφάνειες, όπως προκύπτουν από την παρεμβολή των μη ομαλών, ενοποιημένων τμημάτων των καμπυλών. Καθώς όμως η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερος δύσκολη, προτιμούμε να προχωρήσουμε σε έμμεση εξομάλυνση των τρισδιάστατων επιφανειών. Πιο συγκεκριμένα, αντί να εξομαλύνουμε τις ίδιες τις επιφάνειες, φροντίζουμε οι καμπύλες στις οποίες βασίζονται να είναι ομαλές.

Η ομαλότητα μιας καμπύλης μπορεί να αποτιμηθεί παρατηρώντας τη διακύμανση του διαγράμματος καμπυλότητάς της (12). Εξ' ορισμού, η προσημασμένη καμπυλότητα εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$\kappa(t) = \frac{\ddot{x}(t)\dot{y}(t) - \dot{y}(t)\ddot{x}(t)}{\left[(\dot{x}(t))^2 + (\dot{y}(t))^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

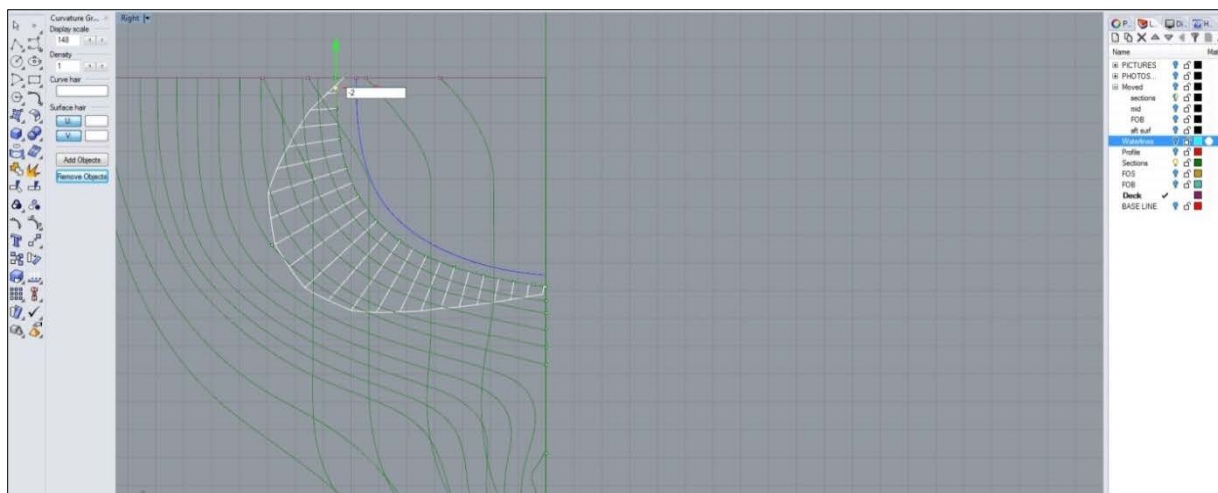
Τα διαγράμματα καμπυλότητας εμφανίζονται στο περιβάλλον του Rhino μέσω της εντολής *Curvature Graph On*, στο μενού *Analyse/Curve* αποτελούν ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία

σχεδιάζονται επί της καμπύλης για ένα πεπερασμένο σύνολο σημείων και είναι κάθετα στην καμπύλη στο σημείο όπου αντιστοιχούν. Το μήκος τους ισούται με το πολλαπλάσιο της πραγματικής τιμής της καμπυλότητας, στο εκάστοτε σημείο της καμπύλης.

Τα βασικά κριτήρια ομαλότητας ορίζουν πως μια καμπύλη θεωρείται εξομαλυμένη όταν:

- Το διάγραμμα καμπυλότητας της αποτελείται από σχετικά μικρό αριθμό μονότονων τμημάτων
- Το διάγραμμα καμπυλότητας της είναι συνεχές και διαθέτει το ορθό πρόσημο ανά περιοχή
- Ελαχιστοποιεί το ολοκλήρωμα του τετραγώνου της καμπυλότητας ως προς το μήκος τόξου (C^2 καμπύλη⁵)
- Το διάγραμμα καμπυλότητας της είναι ομαλό με την κατά το δυνατόν μικρότερη διακύμανση

Η εξομάλυνση των καμπυλών πραγματοποιείται αυτόματα μέσω της εντολής *Fair*, εφόσον οριστεί την κατάλληλη ανοχή ($0.1 \text{ mm} \leq \text{tolerance} \leq 10 \text{ mm}$). Παράλληλα, ο σχεδιαστής μπορεί να παρέμβει στη διαδικασία με χειροκίνητη μετακίνηση σημείων, επιλέγοντας *Gumball=On* και θέτοντας μικρές τιμές στην επιθυμητή κατεύθυνση μετακίνησης (*Gumball Transform*) (Εικόνα 4.11).



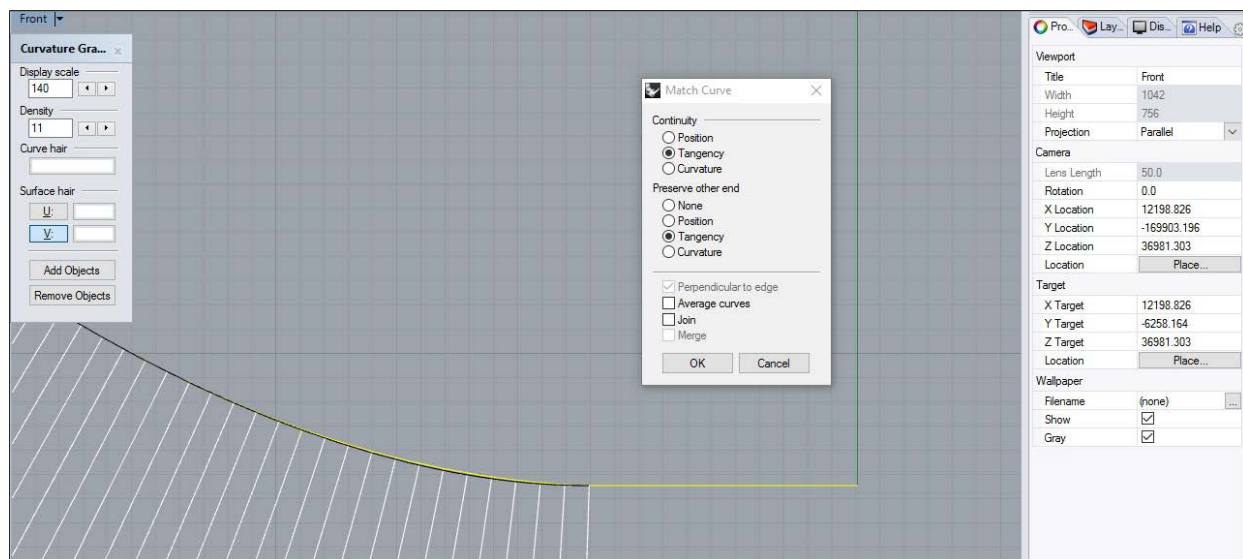
Εικόνα 4.11: Χειροκίνητη εξομάλυνση καμπύλης

➤ Ένωση τμημάτων καμπύλης

Όπως προαναφέρθηκε, για τη δημιουργία μιας ενιαίας καμπύλης πρέπει να εξασφαλίσουμε πως τα τμήματα της συνδέονται μεταξύ τους με την επιβαλλόμενη, από την εκάστοτε εφαρμογή, γεωμετρική λειότητα (συνέχεια θέσης, κλίσης ή καμπυλότητας). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής *Match*, μετακινώντας τα ακραία σημεία της μίας ή και των δύο καμπυλών. Μάλιστα, είναι εφικτή η ένωση με δημιουργία μιας ενδιάμεσης καμπύλης (*Average curves*). Η ενοποίηση μπορεί να

⁵ Η καμπυλότητα ενός σημείου καμπύλης (C) ορίζεται με χρήση ακτίνας κύκλου.

πραγματοποιηθεί είτε άμεσα, μέσω της επιλογής *Join* στο παράθυρο του *Match*, είτε αργότερα, εφαρμόζοντας την εντολή *Join* (Εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.12: Σύνδεση τμημάτων με συνέχεια κλίσης

➤ *1ος Έλεγχος – σύγκριση με κατασκευαστικά σχέδια*

Σε αυτό το σημείο, επιχειρούμε έναν πρώτο έλεγχο των καμπυλών, ώστε να διασφαλίσουμε πως το σχέδιο πλοίου που παράγουν κρίνεται εφικτό σε κατασκευή. Η εντολή που χρησιμοποιείται είναι η *List*, η οποία μας παρέχει τις συντεταγμένες των σημείων κάθε καμπύλης. Με αυτόν τον τρόπο, ελέγχουμε εάν εφαρμόζονται κάποιες βασικές σχεδιαστικές αρχές, όπως:

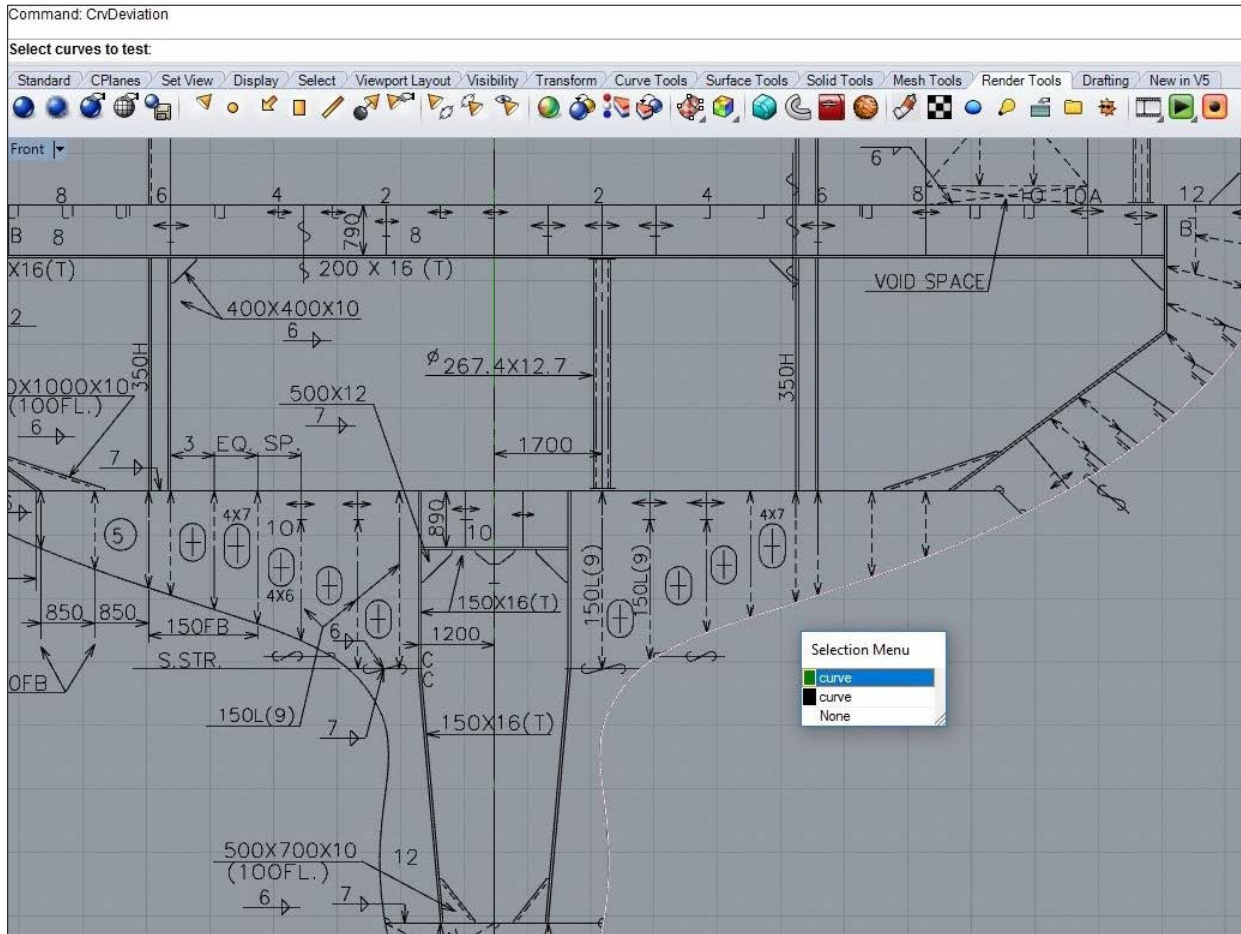
- Η x- συντεταγμένη είναι κοινή για όλα τα σημεία που αποτελούν το νομέα.
- Η y- συντεταγμένη σε κάθε σημείο του νομέα είναι μικρότερη ή ίση με το μέγιστο ημιπλάτος του πλοίου ($B/2$). Επιπλέον, πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός.
- Η z- συντεταγμένη σε κάθε σημείο του νομέα είναι μικρότερη ή ίση με το το κοίλο του πλοίου (D). Επιπλέον, πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός.

Παράλληλα, η μορφή του νομέα πρέπει να είναι συμβατή με εκείνη των σχεδίων.

➤ *2ος Έλεγχος – σύγκριση με αντίγραφο*

Σε αυτό το σημείο, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε τη συνολική απόκλιση από το πρωταρχικό σχέδιο. Για το σκοπό αυτό, συγκρίνουμε το νομέα με το αντίγραφο που είχαμε κρατήσει σε διαφορετικό layer, πριν ακόμη τον επεξεργαστούμε. Η εντολή που χρησιμοποιούμε είναι η *Crv Deviation* (Εικόνα 4.13).

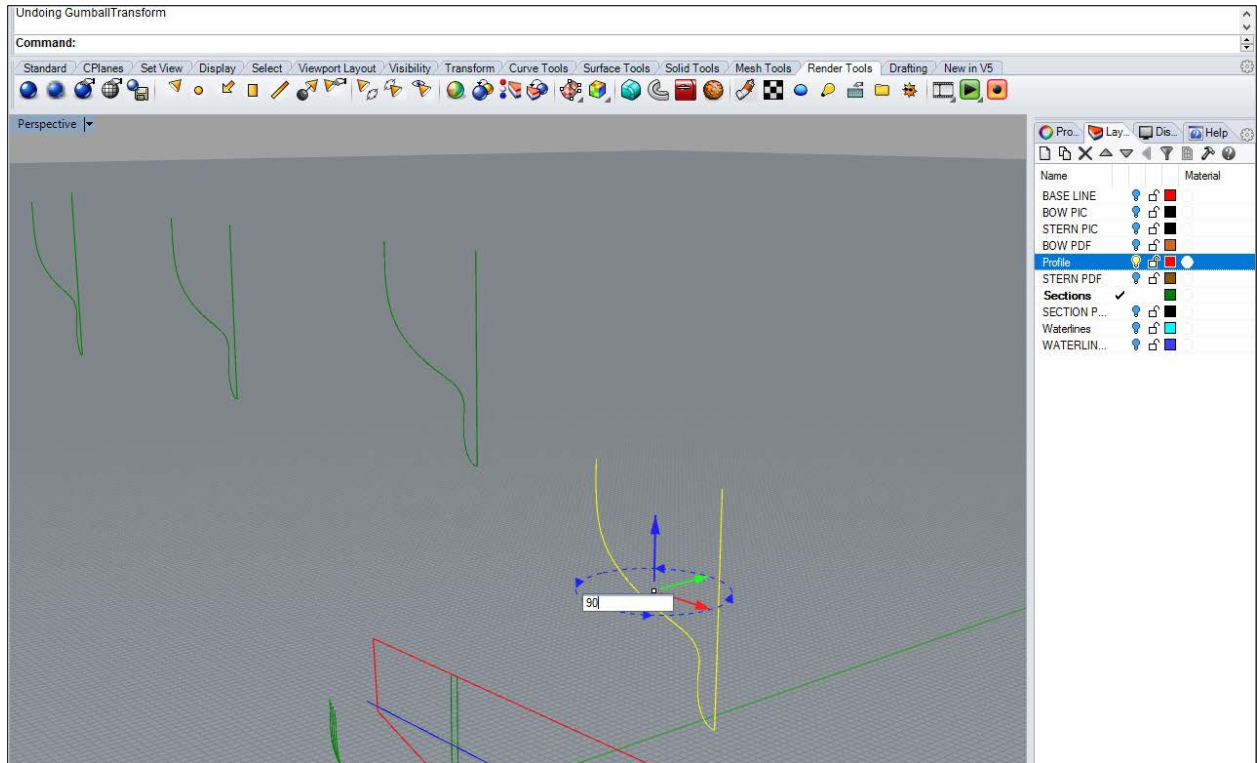
Στην περίπτωση του ιστιοπλοϊκού, η μέγιστη απόκλιση από τις αρχικές γραμμές εκτιμήθηκε 0.56 χιλιοστά στην περιοχή της πλώρης. Η μέτρηση αυτή αναφέρεται σε διαστάσεις του προτύπου (κλίμακα 1:13). Όσον αφορά την απόκλιση στο σχέδιο του φορτηγού, αυτή έλαβε τη μέγιστη τιμή της στα 101 χιλιοστά στην περιοχή του καταστρώματος, κοντά στην πλώρη. Σε ολόκληρη την περιοχή της βρεχόμενης επιφάνειας, η οποία πρακτικά μας ενδιαφέρει, η απόκλιση δεν ξεπέρασε τα 35 χιλιοστά. Οι ανωτέρω μετρήσεις αναφέρονται στις πραγματικές διαστάσεις του πλοίου (κλίμακα 1:1).



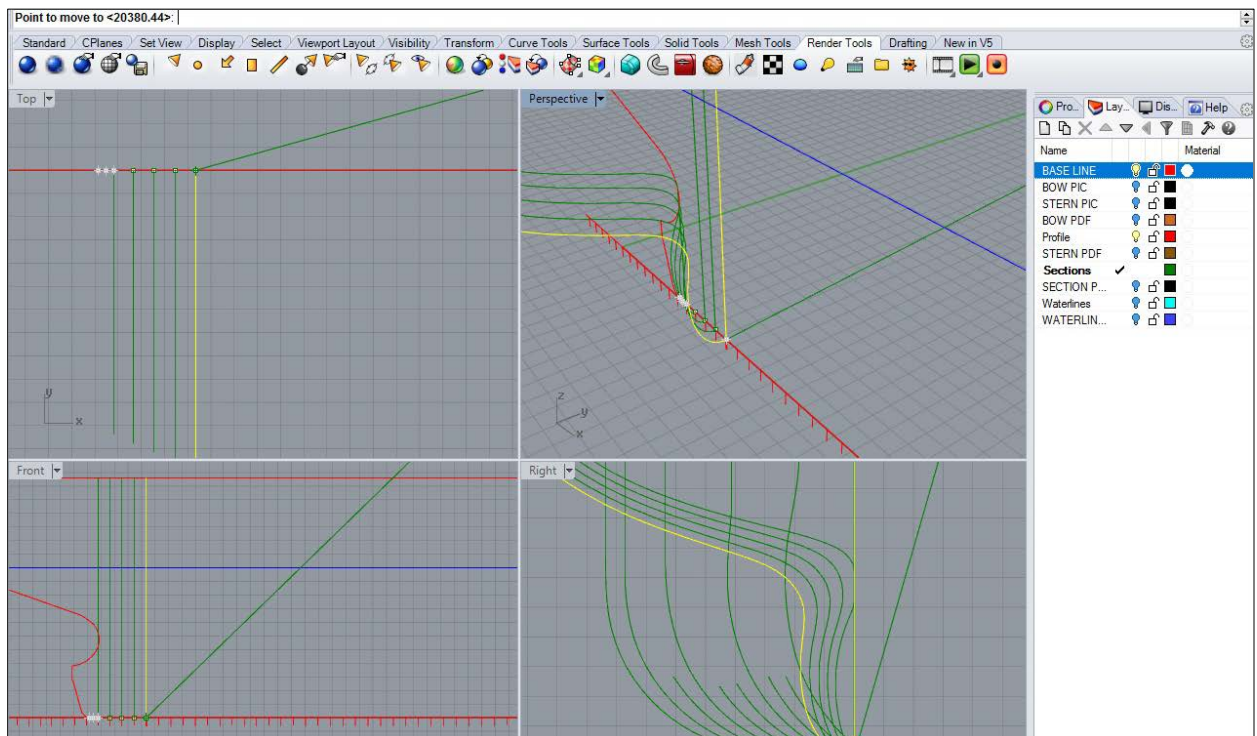
Εικόνα 4.13: Έλεγχος απόκλισης εξομαλυμένης (πράσινη) από το πρωτότυπο (μαύρη)

➤ *Μετακίνηση στη γραμμή αναφοράς*

Ο νομέας εισάγεται και επεξεργάζεται στο επίπεδο xz του περιβάλλοντος εργασίας. Για να στραφεί στο επίπεδο yz, γίνεται είτε χρήση της εντολής *Rotate*, είτε της εισαγωγής 90° στο εικονίδιο του *Gumball Transform* (Εικόνα 4.14-4.15). Προφανώς, το βήμα αυτό δεν εφαρμόζεται στην περίπτωση της καμπύλης του προφίλ, που εισάγεται και παραμένει στο επίπεδο xz. Στη συνέχεια, ο νομέας μετακινείται στην θέση που του αντιστοιχεί, στη γραμμή αναφοράς (*Move*). Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται σταδιακά ο «σκελετός» της γάστρας.

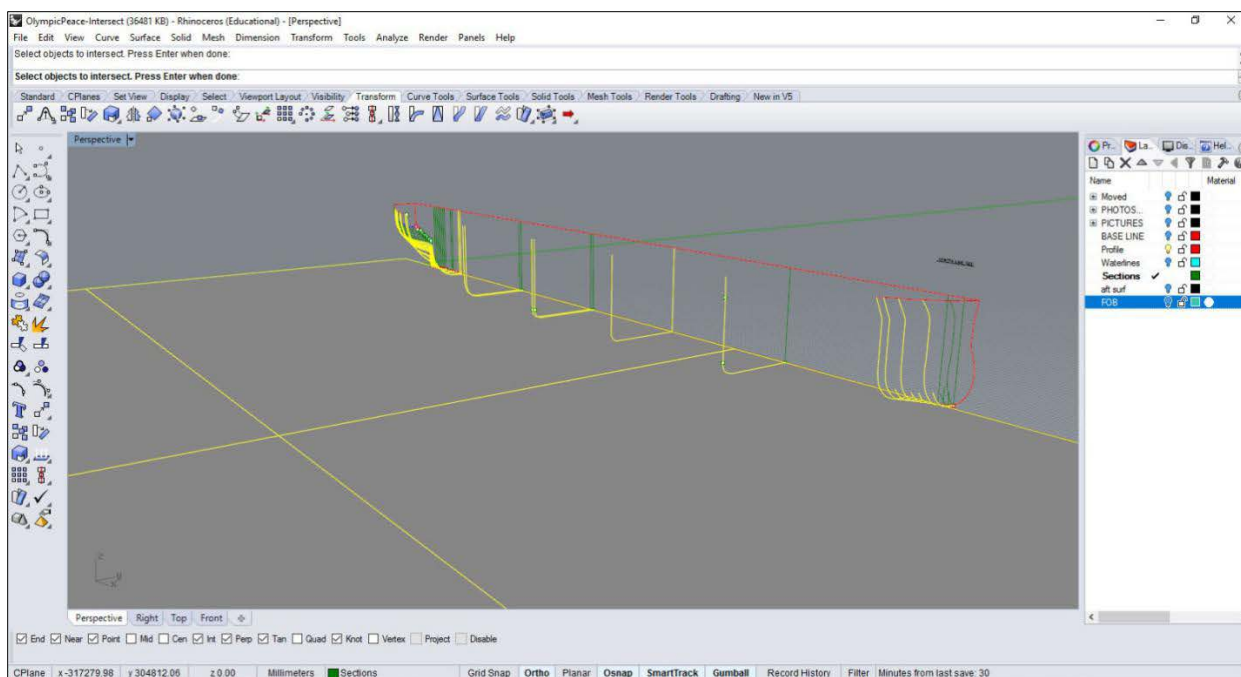


Εικόνα 4.14: Περιστροφή νομέα κατά 90°



Εικόνα 4.15: Μτακίνηση νομέα στη γραμμή αναφοράς

Το επόμενο στάδιο αποτελεί η δημιουργία των του παράλληλου τμήματος (Flat of Side), του πυθμένα (Flat of Bottom) και του καταστρώματος (Deck), βάσει των εξομαλυμένων νομέων και του προφίλ. Τα σημεία προς παρεμβολή αποτελούν την τομή των νομέων και του προφίλ με το επίπεδα $y=B/2$ (FOS), $z=0$ (FOB) και $z=D$ (Deck) (Εικόνα 4.16). Για την κατασκευή των επιπέδων, γίνεται χρήση της εντολής *Plane*, ενώ για την εύρεση της τομής τους με τις καμπύλες η *Intersect*. Όσον αφορά την παρεμβολή των σημείων, αυτή επιτυγχάνεται με ορισμό του επιθυμητού βαθμού της καμπύλης στην *CurveThroughPt* ή την *InterpCrn*. Η δεύτερη επιλογή μας δίνει επιπλέον τη δυνατότητα να ορίσουμε την κλίση (εφαπτομένη) σε κάθε άκρο της καμπύλης, ώστε να μην χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε την εντολή *Match*. Στις νέες γραμμές επαναλαμβάνεται η ανωτέρω διαδικασία εξομάλυνσης και ελέγχου. Η πιστότητα της μεθόδου επιβεβαιώνεται με επιπλέον μετρήσεις στα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου.



Εικόνα 4.16: Τομή επιπέδου $z=0$ με τους νομέις και το προφίλ

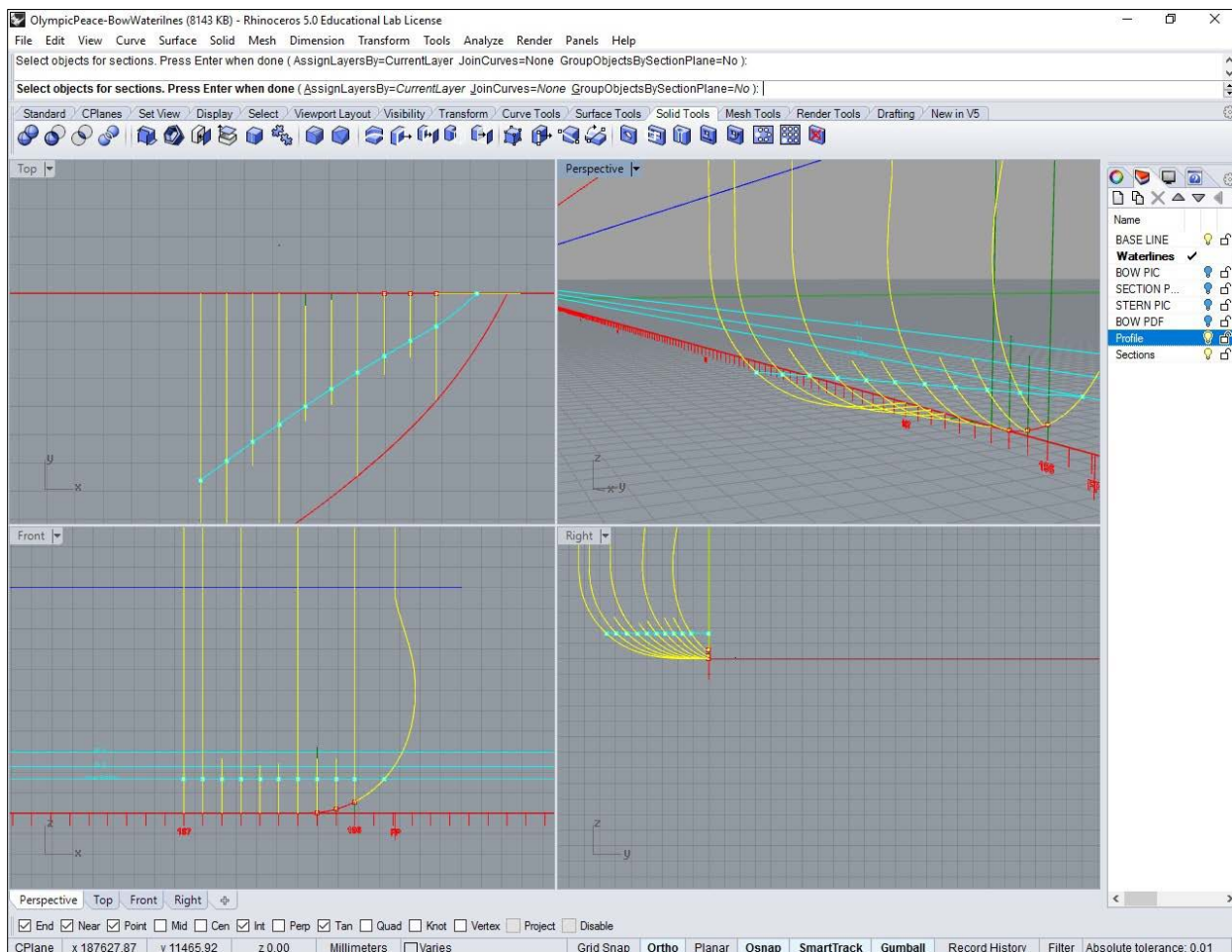
Στο σημείο αυτό, είναι απαραίτητο να ελέγξουμε εάν υπάρχει ταύτιση στα σημεία των νομέων που τέμνονται με τις βασικές γραμμές που φτιάξαμε προηγουμένως. Το βήμα αυτό κρίνεται απαραίτητο, καθώς η διασφάλιση της επαφής μεταξύ των γραμμών είναι αναγκαία προϋπόθεση για την παρεμβολή επιφανειών. Κάτι τέτοιο όμως δε θα συμβαίνει, στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων. Για το λόγο αυτό, οφείλουμε να μετακινήσουμε τα σημεία των νομέων στην κατάλληλη θέση, ώστε να υπάρξει κοινό σημείο με τις βασικές γραμμές. Ένα παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του πρώτου και τελευταίου σημείου του νομέα, το οποίο πρέπει να βρίσκεται στο FOB ή το FOS και τη γραμμή καταστρώματος.

Η δημιουργία των ισάλων γραμμών πραγματοποιείται καθ' όμοιο τρόπο, βάσει των νομέων και των βασικών γραμμών, στις καθορισμένες από το σχεδιαστή θέσεις κατά τον άξονα z . Είναι θεμιτό

οι θέσεις αυτές να συμβαδίζουν με εκείνες των σχεδίων, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση και η εκτίμηση του βαθμού της απόκλισης με τις πραγματικές ισάλους. Στην περίπτωσή μας, λόγω έλλειψης του σχεδίου των ισάλων γραμμών, οι θέσεις κατά των z επιλέχθηκαν σε ισαπόσταση D/20.

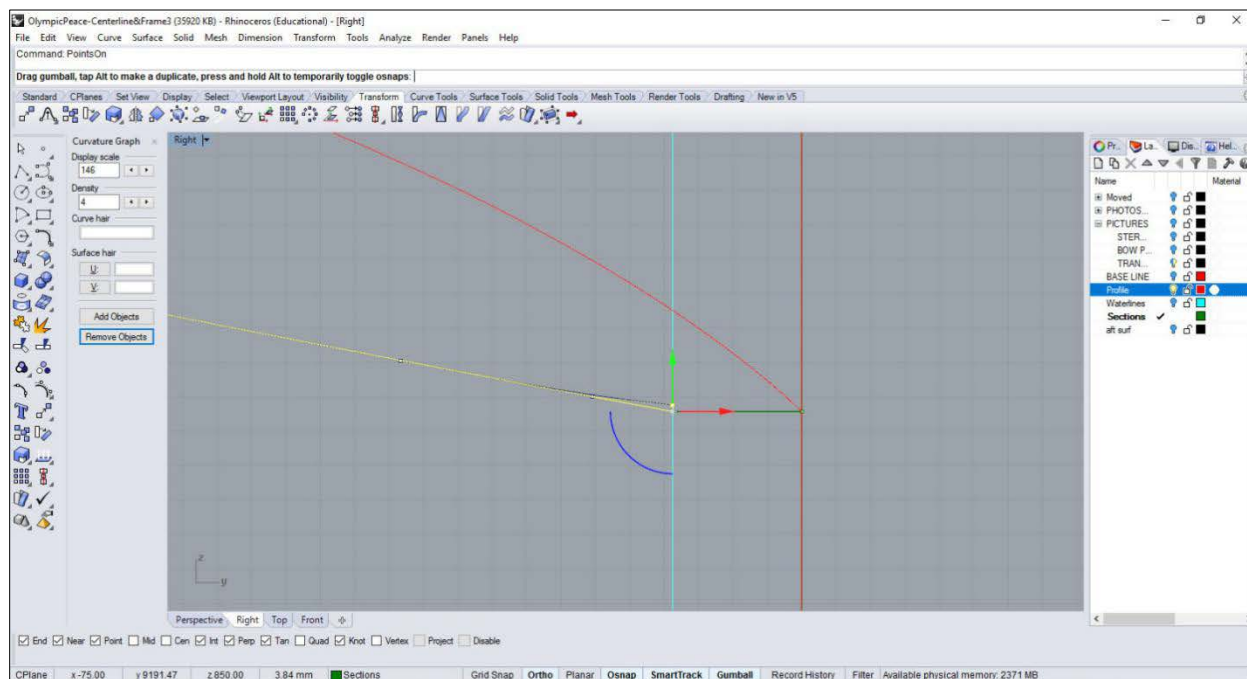
Τα σημεία στα οποία αυτές παρεμβάλλονται εντοπίζονται με δύο κυρίως τρόπους:

1. Μέσω της τομής των καμπυλών με επίπεδα κάθετα στον άξονα των z, στο ύψος των επιθυμητών ισάλων. Για την κατασκευή τους, εφαρμόζουμε την εντολή *Array* στο ήδη υπάρχον επίπεδο z=0 και δημιουργούμε παράλληλα σε αυτό επίπεδα, στην καθορισμένη από το σχεδιαστή ισαπόσταση των ισάλων (12).
2. Με χρήση της εντολής *Curve from objects/Section*, όπου ορίζουμε της καμπύλες προς παρεμβολή και την κατεύθυνση της παρεμβολής, στο ύψος της εκάστοτε ισάλου (Εικόνα 4.17).



Εικόνα 4.17: Παρεμβολή ισάλων από τα δεδομένα σημεία των νομέων

Στο στάδιο της εξομάλυνσης των ισάλων, η διασφάλιση της επαφής μεταξύ των γραμμών αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα. Αφού ελέγξουμε την ομαλότητα τους, προχωρούμε στην εξομάλυνση, προσπαθώντας να μετακινούμε μόνο τα σημεία τομής με τους ισάλους και όχι εκείνα με τις βασικές γραμμές (Εικόνα 4.18). Για αυτό το λόγο, ο σχεδιαστής πρέπει να δημιουργήσει ξανά τους νομείς, λαμβάνοντας αυτή τη φορά αναφορά και τις ισάλους στις βασικές γραμμές.



Εικόνα 4.18: Διασφάλιση επαφής νομέα και ισάλου

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αρκετές φορές, ωστόσο οι νομείς και οι ίσαλοι είναι άρρηκτα συνδεδεμένες και εξομαλυμένες, εντός της δεδομένης απόκλισης από τα κατασκευαστικά σχέδια. Για καλύτερο έλεγχο του αποτελέσματος, μπορούμε επιπλέον να παρεμβάλλουμε διαμήκεις κάθετες τομές (buttocks), βάσει των βασικών γραμμών, των νομέων και των ισάλων. Η ομαλότητα των συγκεκριμένων γραμμών θα μας επιβεβαιώσει πως η εξομάλυνση ολόκληρου του πλέγματος των καμπυλών έχει πραγματοποιηθεί σωστά.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται όπου η πληροφορία για τις γραμμές στο σχέδιο είναι ελλιπής ή υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις της γεωμετρίας. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν οι περιοχές της πρύμνης και της πλώρης, όπου οι γεωμετρίες είναι πολύπλοκες και παρουσιάζουν έντονες αλλαγές καμπυλότητας. Για την καλύτερη περιγραφή των περιοχών αυτών, είναι σκόπιμη η παρεμβολή επιπλέον ισάλων και νομέων, βάσει των προαναφερόμενων μεθόδων. Η προσθήκη αυτή δεν θα μεταβάλει την επιφάνεια της γάστρας, καθώς οι νέες γραμμές θα προκύψουν από τις βασικές γραμμές και τις ισάλους.

Σε αυτό το σημείο, η διαδικασία εξομάλυνσης, με παράλληλη εξασφάλιση της ζητούμενη συνέχειας, έχει ολοκληρωθεί. Στην επόμενη παράγραφο, ακολουθεί η αντίστοιχη διαδικασία στο επίπεδο των επιφανειών.

4.3. Παρεμβολή επιφάνειας

Οι εντολές κατασκευής επιφανειών βασίζονται στην παρεμβολή ή προσέγγιση γεωμετρικών οντοτήτων (καμπυλών). Ανάλογα με το πλήθος και το είδος των καμπυλών που έχουμε στη διάθεση μας, ενδέχεται να ακολουθήσουμε διαφορετική πορεία στην παραγωγή της επιφάνειας (12). Τόσο στο παράδειγμα του φορτηγού πλοίου, όσο και στο ιστιοπλοϊκό σκάφος, δεν μπορέσαμε να αποφύγουμε την τμηματική σχεδίαση της γάστρας, λόγω της απότομης αλλαγής της γεωμετρίας στο πρωαίο ή και πρυμναίο τμήμα.

Για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της τελικής επιφάνειας, τα μικρότερα τμήματα ενώνονται με G1 ή G0 συνέχεια, μέσω της αντίστοιχης επιλογής στην εντολή *MatchSrf*. Η απαίτηση για συνέχεια στην κλίση εφαρμόζεται κατά βάσει στη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας για υδροδυναμικούς λόγους, καθώς η ύπαρξη ακμών αυξάνει της αντίσταση και καθιστά τη λειτουργία του πλοίου αντικοινομική. Για κάποιες περιοχές της γάστρας εκτός νερού, όπως η περιοχή του transom στην πρύμνη, η συνέχεια θέσης μεταξύ των επιφανειών είναι επαρκής. Αξίζει επίσης να αναφέρουμε πως για να επιτευχθεί η επιθυμητή συνέχεια G1 μεταξύ των τμημάτων, δεν θα λάβουμε υπ' όψη τον νομέα άλλα το όριο (edge) των επιφανειών. Διαφορετικά, το πρόγραμμα κατά την κατασκευή της επιφάνειας δε μας επιτρέπει να επιλέξουμε την συνέχεια στα όριά της.

Η περίπτωση του ιστιοπλοϊκού σκάφους παρουσίαζε μια αρκετά απλή γεωμετρία. Επομένως, ήταν δυνατή η δημιουργία της επιφάνειας με απλή ένωση δύο τμημάτων, τα οποία διαχωρίζονταν από το δεύτερο νομέα της πλώρης. Στην περίπτωση όμως της πολύπλοκης γεωμετρίας του φορτηγού πλοίου, ακολουθήθηκε μια αρκετά πιο σύνθετη διαδικασία η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια, όπως πραγματοποιήθηκε σε κάθε περιοχή της γάστρας.

➤ Επίπεδα FOS, FOB και Transom

Καθώς τα συγκεκριμένα τμήματα είναι επίπεδα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εντολή *PlanarSrf*. Οι επιφάνειες οριοθετούνται από τις ομώνυμες καμπύλες (FOS, FOB και Transom) και το προφίλ.

➤ Επιφάνεια μεταξύ FOS και FOB (παράλληλο τμήμα)

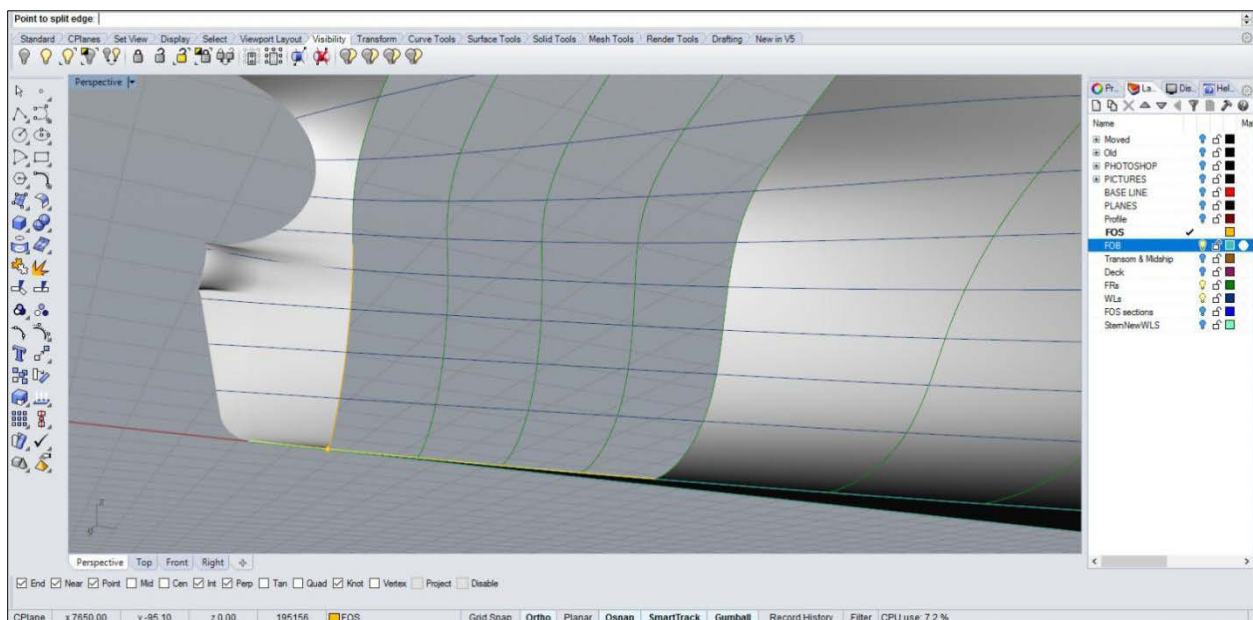
Για τη λωρίδα επιφάνειας ανάμεσα στα επίπεδα FOS και FOB, κρίθηκε καταλληλότερη η χρήση της *Sweep 2 rails* από το μενού του *Surface*. Ως οδηγοί επιλέγονται οι ακμές των επιπέδων, ενώ ως καμπύλες για μετακίνηση επιλέγονται οι νομείς που διέρχονται από το πρώτο και το τελευταίο σημείο του παράλληλου τμήματος.

➤ Επιφάνεια πρύμνης

Η συγκεκριμένη περιοχή απαιτεί ιδιαίτερο χειρισμό, τόσο λόγω των έντονων διακυμάνσεων στη γεωμετρία της, όσο και εξαιτίας της τοπολογίας των δεδομένων καμπύλων, η

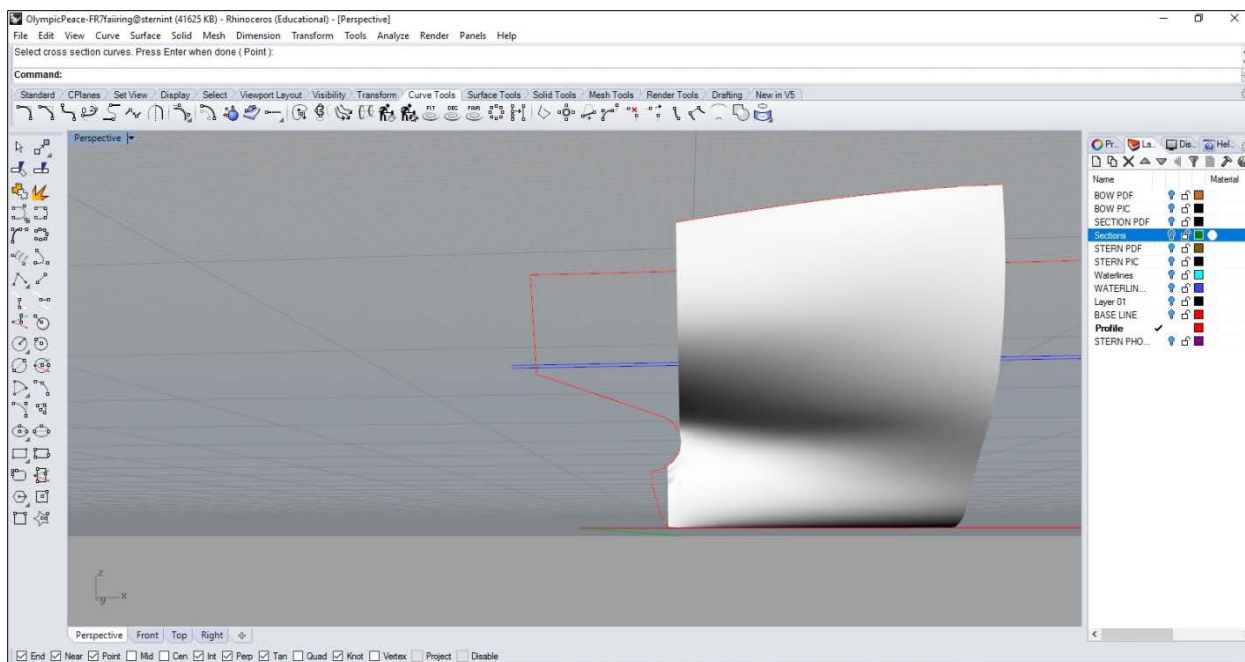
οποία δεν είναι εξολοκλήρου τετραπλευρική. Έτσι, προχωρούμε σε επιπλέον διαχωρισμό της περιοχής σε επιμέρους τμήματα και εφαρμόζουμε τα εξής βήματα:

- Δημιουργία του επιπέδου στο ημικύκλιο που ορίζει τον άξονα της πρύμνης, με χρήση της *PlanarSrf*
- Διαίρεση του νομέα 7 σε τρία τμήματα: την καμπύλη της πλήμνης και τα τμήματα πάνω και κάτω από αυτή (*Split*)
- Εφαρμογή της *Sweep 2 rails* στο άνω και κάτω τμήμα, μετακινώντας τις αντίστοιχες καμπύλες πάνω στα τμήματα των ισάλων μεταξύ του νομέα 7 και του προφίλ
- Χρήση της *Sweep 2 rails* στο τμήμα της πλήμνης, επιλέγοντας ως οδηγούς το αντίστοιχο τμήμα του νομέα 7 και την ακμή του ημικυκλικού επιπέδου. Η επιφάνεια προκύπτει με μετακίνηση των ακμών των επιφανειών πάνω και κάτω από την πλύμνη
- Δημιουργία της άνω πρυμναίας επιφάνειας, μεταξύ του Transom και της ακμής του νομέα 9, με κατάλληλο διαχωρισμό επιπλέον τμημάτων και χρήση της *Network Srf*. Όπως προαναφέρθηκε, η σύνδεση με την καμπύλη του transom πραγματοποιείται με συνέχεια θέσης (G0)
- Χρήση της *Network Srf* και στο κάτω πρυμναίο τμήμα, μεταξύ των ακμών στους νομείς 7 και 9, του πυθμένα και του καταστρώματος. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να διαιρεθεί η ακμή του πυθμένα στο σημείο επαφής της με την καμπύλη 9, μέσω της *Split Edge* (Εικόνα 4.19).



Εικόνα 4.19: Διαίρεση ακμής πυθμένα

- Δημιουργία της πρυμναίας επιφάνειας, μεταξύ των ακμών του νομέα 9 και της ακμής του παράλληλου τμήματος, με κατάλληλο διαχωρισμό επιπλέον τμημάτων και χρήση των *Network Srf* και *Sweep2*. Η εντολή που επιλέγεται κάθε φορά είναι εκείνη που παράγει καλύτερης ποιότητας επιφάνεια.



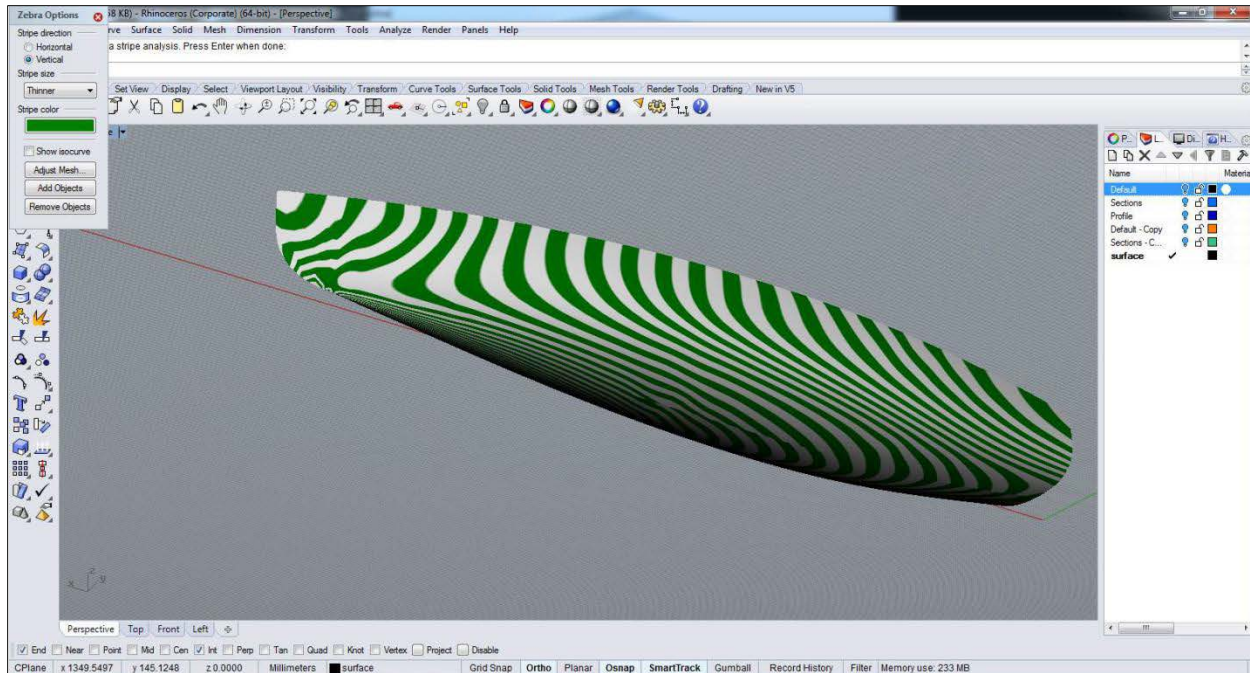
Εικόνα 4.20: Δημιουργία της επιφάνειας, μεταξύ των ακμών του νομέα 9 και του παράλληλου τμήματος

➤ **Επιφάνεια πλώρης**

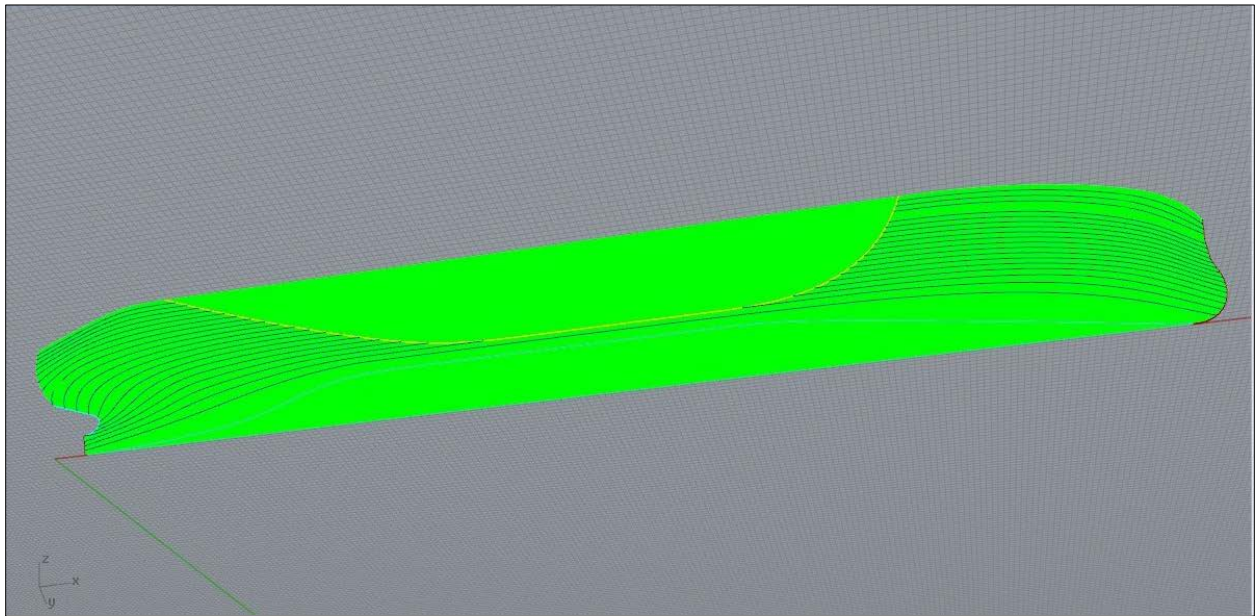
Όπως και στην περίπτωση της πρύμνης, η πολύπλοκη γεωμετρία και η τοπολογία των δεδομένων καμπύλων μας αναγκάζει να εργαστούμε τμηματικά. Η μέθοδος που προτείνεται περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Λόγω της απλής γεωμετρίας του βολβού, μπορεί να εφαρμοστεί η *Sweep 1 rail* μεταξύ του νομέα στην πωραία κάθετο και του προφίλ. Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάζεται και το άνω μπροστινό τμήμα της πλώρης, μεταξύ του προφίλ και της πωραίας καθέτου
- Ξεχωριστή παρεμβολή της επιφάνειας μεταξύ της άνω και κάτω ακμής της πωραίας καθέτου και του FOS με *Network Srf*. Οι επιφάνειες διαχωρίζονται στην ίσαλο των 13.627m, όπου εμφανίζεται ακμή βάσει των κατασκευαστικών σχεδίων. Επομένως, οι επιφάνειες στη συγκεκριμένη ακμή εμφανίζουν απλή συνέχεια θέσης. Σε αυτό το ύψος, είναι αναγκαία η διαίρεση της ακμής του FOS μέσω της *Split Edge*.

Η διαδικασία σχεδίασης ολοκληρώνεται με τον οπτικό έλεγχο και την ανάλυση της καμπυλότητας της επιφάνειας. Η τελευταία επιτυγχάνεται μέσω των εντολών *Zebra* και *Curvature Analysis*, η εφαρμογή των οποίων αναπαρίσταται παρακάτω (Εικόνα 4.21 - 4.22).



Εικόνα 4.21: Ανάλυση καμπυλότητας της επιφάνειας (ZEBRA)



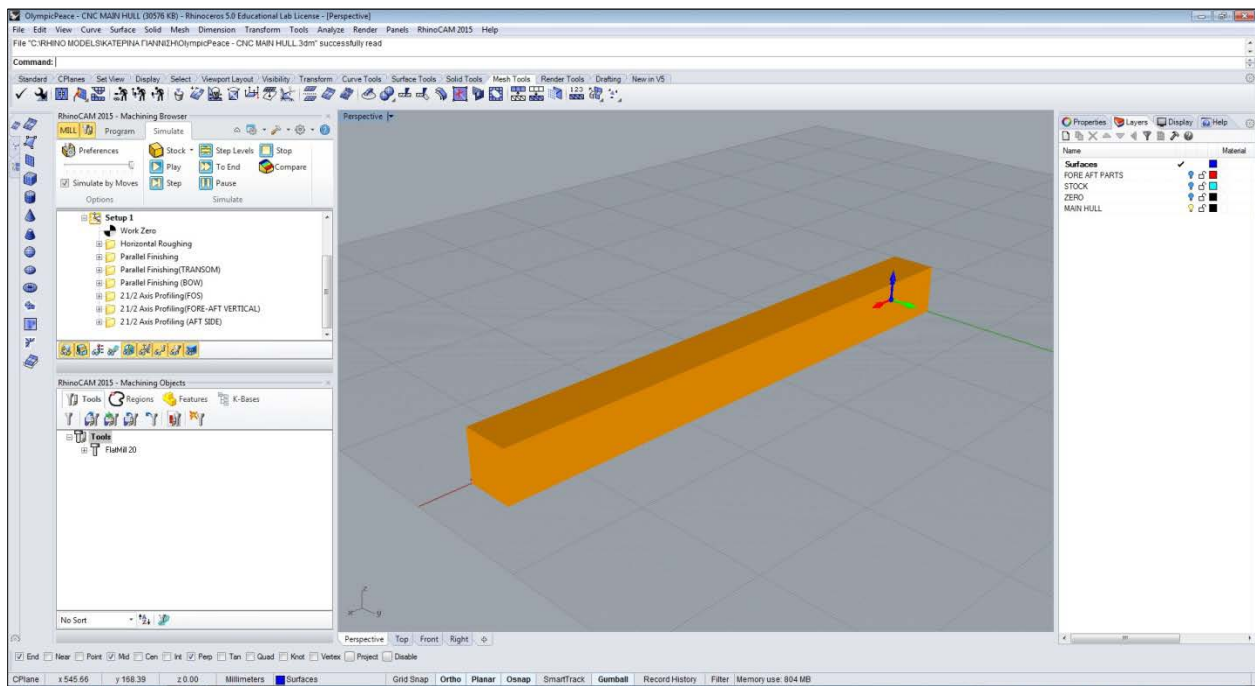
Εικόνα 4.22: Ανάλυση καμπυλότητας της επιφάνειας (CURVATURE ANALYSIS)

5. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΟΠΗΣ

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τα στάδια εκτέλεσης κατά την κοπή του προτύπου ιστιοπλοϊκού σκάφους. Ξεκινώντας από την εισαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου στο CAM, προχωρούμε στον ορισμό των παραμέτρων κοπής, καθώς και την προσομοίωση των κατεργασιών. Ακολουθεί η δημιουργία του κώδικα μηχανής (G-code) και η εισαγωγή του στον ελεγκτή Mach 3. Τέλος, τοποθετείται και ευθυγραμμίζεται το υλικό προς κατεργασία, ορίζονται οι παράμετροι κατά αντιστοιχία με το CAM και ξεκινά η κοπή.

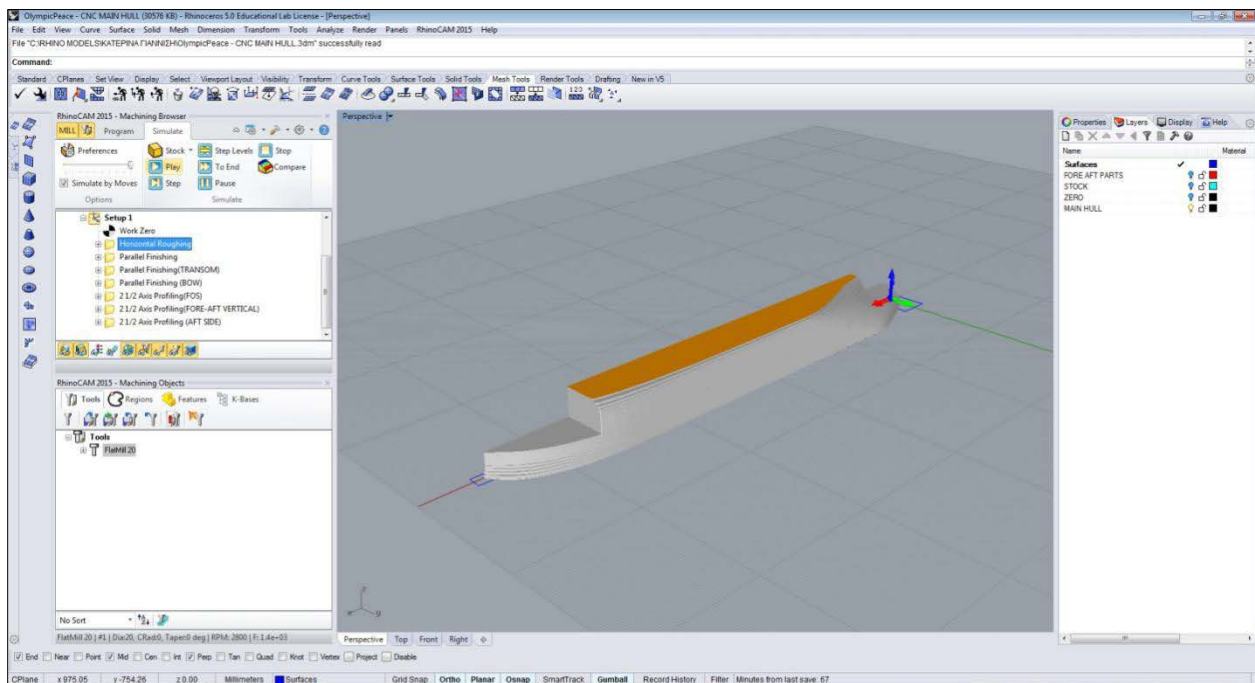
5.1. Από τη σχεδίαση (CAD) στην κατασκευή (CAM)

Όπως προαναφέρθηκε, η CNC μηχανή χρησιμοποιεί δύο κοπτικά εργαλεία, γεγονός που επιτρέπει τη συμμετρική κοπή και, άρα, τη μείωση του χρόνου της κατεργασίας. Έτσι, στο λογισμικό CAM χρησιμοποιείται μόνο η μια πλευρά του σκάφους (starboard). Ο κατακόρυφος άξονας χρησιμοποιεί δύο κινούμενα μέρη, τα οποία κινούνται ταυτόχρονα. Συνήθως, η γεωμετρία εισάγεται ανεστραμμένη στο περιβάλλον CAM, δηλαδή με το κατάστρωμα του πλοίου κάτω και τον πυθμένα πάνω. Ξεκινώντας, κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός του προσανατολισμού στο μοντέλο. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του γεωμετρικού στερεού (*stock-bounding box*), το οποίο καθορίζει τις διαστάσεις του υλικού για την κοπή (13).



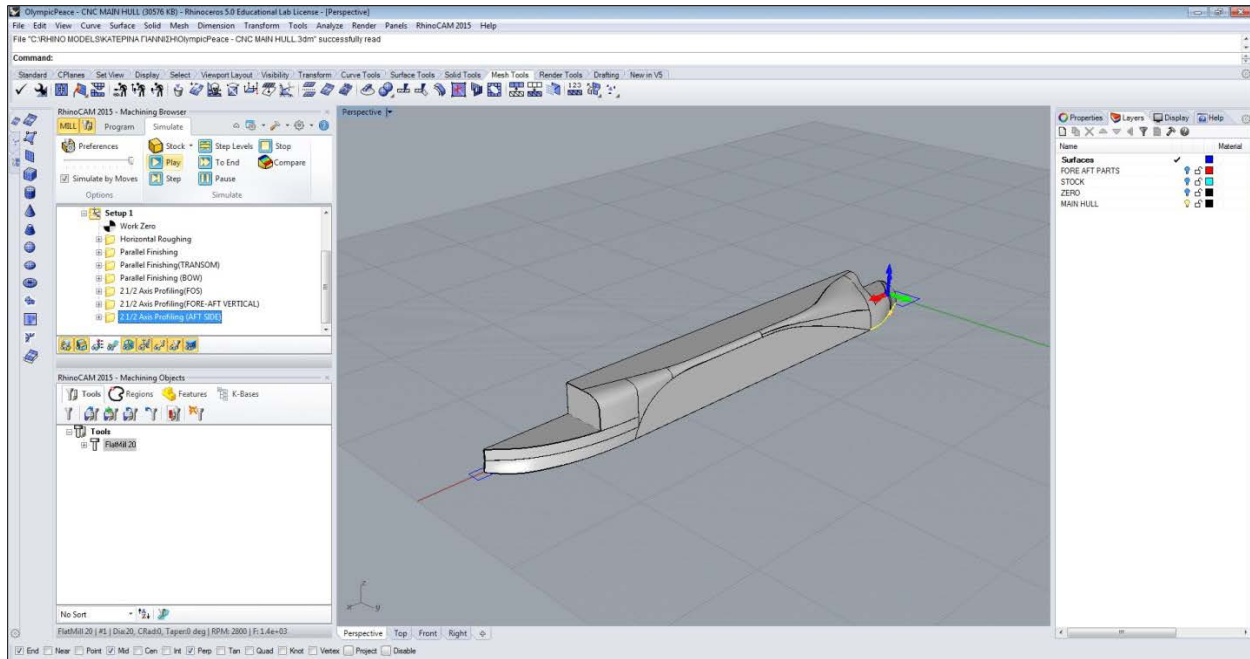
Εικόνα 5.1: Δημιουργία stock (bounding - box) στο περιβάλλον CAM

Το στερεό αυτό πρέπει να εσωκλείει το μοντέλο και οι διαστάσεις του δεν πρέπει να υπερβαίνουν τα φυσικά όρια της μηχανής. Συνήθως, οι διαστάσεις του σχεδιάζονται ελαφρώς μεγαλύτερες από του μοντέλου, προς αποφυγή παραγωγής μεγάλης ποσότητας φύρας. Παράλληλα, επιλέγεται το υλικό του ξύλινου μπλοκ (stock) (Εικόνα 5.1). Ο χρήστης καταλήγει στα κοπτικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν και θέτει το βήμα κοπής (*step*) κατά την οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση. Βάσει του τύπου υλικού, της ταχύτητας και των χαρακτηριστικών του κοπτικού εργαλείου (διάμετρος και αριθμός λεπίδων), το πρόγραμμα ρυθμίζει την ταχύτητα κοπής. Αυτόματα διαμορφώνεται και η διαδρομή του κοπτικού από το λογισμικό CAM, βάσει του σχεδίου που παράχθηκε στο περιβάλλον CAD. Τέλος, προσδιορίζεται το σημείο αναφοράς (*work zero*) της μηχανής.



Εικόνα 5.2: Κατεργασία roughing στο CAM

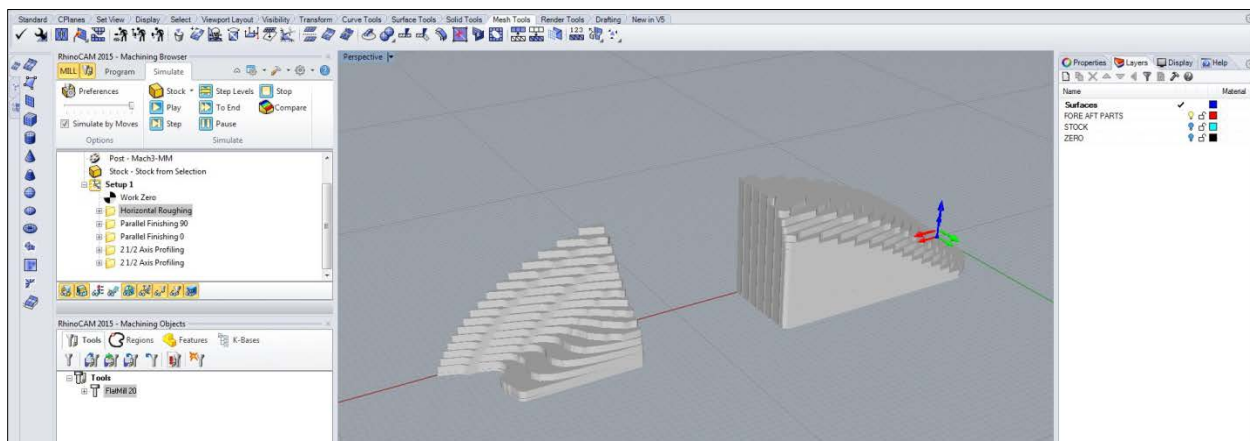
Για το βέλτιστο των αποτελεσμάτων, η διαδικασία κοπής μπορεί να χωριστεί σε δύο επιμέρους διεργασίες. Συνήθως η πρώτη είναι το “ξεχόνδρισμα” (roughing) του stock, όπου η αφαίρεση υλικού είναι γρήγορη και χωρίς ενδιαφέρον για την ποιότητα της τελικής επιφάνειας (Εικόνα 5.2). Στο στάδιο αυτό, η τελική επιφάνεια που προκύπτει είναι περίπου κατά δύο χιλιοστά μεγαλύτερη από την τελική (offset 2 mm) και έχει μορφή βαθμιδωτής κλίμακας. Η τελική επιφάνεια προκύπτει από τη δεύτερη κατεργασία, το φινιρίσμα (finishing) (Εικόνα 5.3). Το αποτέλεσμα εξαρτάται αφενός από τα χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως οι στροφές και το είδος του κοπτικού, το βήμα και ο αριθμός των αξόνων και αφετέρου από μεταβλητές που ορίζει ο χρήστης (υλικό, feed rate κ.α.). Για καλύτερο αποτέλεσμα, ο χρήστης μπορεί να διαιρέσει τις παραπάνω διεργασίες σε περισσότερα στάδια. Ωστόσο, η πρόταση αυτή δεν ενδείκνυται σε ξύλινες κατασκευές, καθώς είναι αρκετά χρονοβόρα χωρίς ιδιαίτερη βελτίωση της τελικής επιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί πως τα στάδια κατεργασίας απαιτούν εν γένει διαφορετικό αριθμό και είδος εργαλείων.



Εικόνα 5.3: Κατεργασία finishing στο CAM

5.2. Προσομοίωση κοπής

Προτού εργαστούμε στη μηχανή, είναι προτιμότερο να εκτελέσουμε μια προσομοίωση της κοπής για να εντοπίσουμε πιθανά σφάλματα. Η διαδικασία εφαρμόστηκε αρχικά στη γάστρα ιστιοπλοϊκού σκάφους και πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια, το ξεχόνδρισμα και το φινίρισμα. Στο πρώτο, τέθηκε ένα περιθώριο 2 χιλιοστών από την τελική επιφάνεια, ενώ στο φινίρισμα δεν χρησιμοποιήθηκε περιθώριο από την τελική επιφάνεια.



Εικόνα 5.4: Προσομοίωση κατεργασίας roughing στην περιοχή του βολβού της πλήρης και στην πλήμνη της πρύμνης

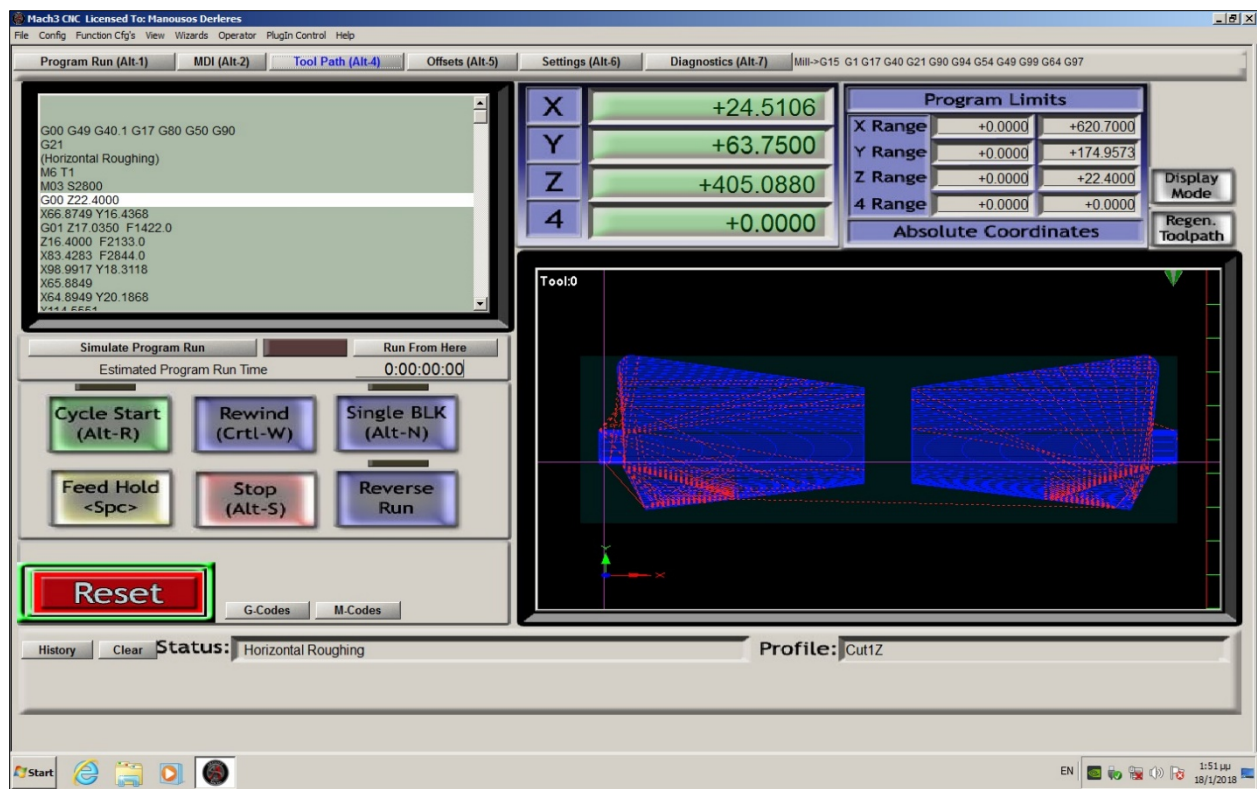
Πρέπει εδώ να επισημάνουμε πως οι διαστάσεις των κοπτικών δεν επιτρέπουν τη διαχείριση πολύπλοκων γεωμετριών. Μια τέτοια περίπτωση αποτέλεσε ο βολβός στη πλώρη και η πλήμνη της πρύμνης, στο μοντέλο του φορτηγού πλοίου. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε ξεχωριστό μπλοκ (stock) και μεμονωμένη προσομοίωση των κατεργασιών roughing και finishing σε δύο περιοχές: κοντά στο βολβό και την πλήμνη (Εικόνα 5.4) και στο εναπομείναν τμήμα της γάστρας (Εικόνα 5.2).

Για τη βελτίωση της ποιότητας της κοπής, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά εργαλεία σε κάθε διεργασία (Εικόνα 5.5). Τα κριτήρια επιλογής τους είναι οι στροφές του κινητήρα κοπής, ο αριθμός των λεπίδων και η διάμετρος του κοπτικού που απαιτεί η εκάστοτε κατεργασία. Στην περίπτωση του ξύλου, για παράδειγμα, επιβάλλεται μεγάλη γωνιακή ταχύτητα και, άρα μεγάλη διάμετρος στα εργαλεία κοπής. Επιπλέον, η διαμόρφωση των λεπίδων επιδρά στην ποιότητα της επιφάνειας. Για το λόγο αυτό, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν στο φινιρίσμα εμφανίζουν μια καμπυλότητα στις λεπίδες τους, χάρις στην οποία η τελική επιφάνεια δε θα χρειαστεί περαιτέρω κατεργασία λείανσης (μέσω τριβείου).



Εικόνα 5.5: Εργαλεία μηχανής CNC (ENΘΥ)

Εφόσον η προσομοίωση δεν παρουσιάζει κάποιο σφάλμα, επόμενο βήμα είναι η παραγωγή ενός κώδικα (G-code) για κάθε διεργασία της κοπής, ο οποίος εισάγεται στον ελεγκτή Mach-3 (Εικόνα 5.6). Σε αυτό το στάδιο, ουσιαστικά επαληθεύουμε όσα έχουν οριστεί προηγουμένως στο CAM. Ο χρήστης μπορεί να επιβεβαιώσει τις διαδικασίες κοπής, καθώς και να προσθέσει ή αφαιρέσει κάποια στάδια ή εντολή στον κώδικα μηχανής. Τα παραπάνω αναλύονται στη συνέχεια, όπως εφαρμόστηκαν στην περίπτωση του ιστιοπλοϊκού μοντέλου.



Εικόνα 5.6: Περιβάλλον εργασίας ελεγκτή Mach 3

5.3. Παραγωγή ιστιοπλοϊκού μοντέλου

Αφού ολοκληρωθεί και το στάδιο της επαλήθευσης στον ελεγκτή, είμαστε σε θέση να ξεκινήσουμε τη διαδικασία κοπής του μοντέλου, αρχίζοντας με την οριοθέτηση της κοίλης κατασκευής. Η ευθυγράμμιση της πραγματοποιείται αναφορικά με το τραπέζι κοπής και τα χαρακτηριστικά σημεία της εργαλειομηχανής. Η γνώση και χρήση των σημείων αυτών συμβάλλουν στην επικοινωνία του χρήστη με τη μηχανή.

Η προεπιλεγμένη από τον κατασκευαστή θέση αναφοράς καλείται *μηδενικό σημείο μηχανής (absolute machine zero)*. Πρόκειται για το σημείο που καθορίζει την αρχή των συντεταγμένων της μηχανής. Στην περίπτωση μας, ο ελεγκτής Mach 3 Mill μας δίνει τη δυνατότητα να επιστρέψουμε ανά πάσα στιγμή στο σημείο αυτό. Πολλές φορές όμως, απαιτείται η μετακίνηση του συστήματος αναφοράς σε μία καταλληλότερη θέση, ώστε να εξυπηρετήσει τις ανάγκες μιας ορισμένης κατεργασίας. Σε αυτήν την περίπτωση, το ρόλο του μηδενικού σημείου αναλαμβάνει το *σημείο αναφοράς (Work origin)*, το οποίο συνήθως ταυτίζεται με τη θέση που ορίστηκε προηγουμένως στο CAM. Συνιστάται ο ορισμός του σημείου αναφοράς πριν από κάθε διεργασία, ώστε να μειωθεί το σφάλμα της μηχανής κατά τη ψηφιοποίηση (18). Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- ο Μετακίνηση του εργαλείου (*Controlled Point*) στην επιθυμητή θέση αναφοράς (Manual Data Input - MDI) ή εισαγωγή της νέας θέσης στον κώδικα μέσω της εντολής *G0*.

- ο Επιλογή της εντολής *Touch* στο *Current Work Offset* της επιφάνειας εργασίας. Αρχικά, το υπάρχον σύστημα αναφοράς μεταφέρεται στο *Part Offset DRO* ⁶ και ο άξονας *DRO* διαβάζει μηδέν. Επιλέγοντας ξανά *Touch* σε άλλους άξονες μεταφέρουν το παρόν σύστημα στη θέση του εργαλείου και μηδενίζουν τον άξονα *DRO*.

Για να αποφευχθεί ο επαναπροσδιορισμός του σημείου αναφοράς, καθώς και η ακούσια επαφή ανάμεσα στο τραπέζι και τα εργαλεία κοπής, έγινε χρήση μιας χειροποίητης βάσης (Εικόνα 5.9). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο ορισμός του πεδίου – χώρου της κοπής, ο οποίος συμβάλει στον εύκολο καθαρισμό από πιθανή περίσσεια υλικού.

Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφέρουμε μια πολύ ενδιαφέρουσα πρόταση, που αφορά τη χρήση ενός τραπεζιού ψηφιακής καθοδήγησης (NC tilting rotary table). Μέσω αυτού, προστίθενται ένας επιπλέον άξονας στη μηχανή, μετατρέποντας την ουσιαστικά σε τεσσάρων αξόνων. Με αυτόν τον τρόπο η κοίλη κατασκευή περιστρέφεται, καθιστώντας έτσι εφικτές κάποιες κατεργασίες που δε θα μπορούσαν να γίνουν διαφορετικά.

Επίσης, μπορεί να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός οποιουδήποτε σημείου του τεμαχίου μέσω ενός αισθητήρα ψηφιοποίησης. Πρόκειται για έναν 3D ανιχνευτή αφής – ελέγχου, ο οποίος τοποθετείται στον εργαλειοδέτη και αντιλαμβάνεται αλλαγή του αισθητηρίου σε τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις (19).

➤ *Παρέμβαση χρήστη στη διαδικασία κοπής.*

Κατά τη διάρκεια της κοπής, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει καινούργιες συντεταγμένες στη διαδρομή του κοπτικού, να παύσει ή και να σταματήσει της διαδικασία (Εικόνα 5.7). Πιο συγκεκριμένα, η εντολή *G1* σε *Feed Rate* ⁷ χρησιμοποιείται για τη γραμμική παρεμβολή σημείου κατά την κίνηση προς το σημείο προορισμού. Επίσης, η χρήση του *Feed Hold* θα σταματήσει την εκτέλεση του προγράμματος όσο το δυνατόν πιο γρήγορα αλλά και ελεγχόμενα, ώστε να μπορεί να επανεκκινηθεί μέσω του *Cycle Start*. Κάτι τέτοιο ίσως δεν είναι εφικτό με χρήση του *Stop*, η οποία προκαλεί την παύση όλων των λειτουργιών και ανύψωση του κοπτικού σε απόσταση ασφαλείας, η οποία ορίζεται από το χρήστη (18).

Ο ορισμός της απόστασης αυτής πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού του ελεγκτή. Πρόκειται για μια δικλείδα ασφαλείας, σε περίπτωση που δεν δουλέψουν οι μηχανικοί διακόπτες, η οποία μπορεί να οριστεί στο στάδιο προετοιμασίας και πριν την εκτέλεση του κώδικα *G*. Στη μηχανή του *ENΘΥ*, ορίστηκε ως απόσταση ασφαλείας κατά την κατακόρυφοι στους 50 πόντους (*Inhibit Z*). Εάν ο χειριστής εισάγει συντεταγμένες που ξεπερνούν τα όρια ασφαλείας του λογισμικού, το πρόγραμμα του υπενθυμίζει τον κίνδυνο υπέρβασης των ορίων. Σε ακραίες περιπτώσεις, όπου το μοντέλο αγγίζει ή ξεπερνά τα φυσικά όρια της μηχανής, ο χειριστής δύναται κατά βούληση να υπερβεί αυτά τα όρια.

⁶ Τα *DROs* ή *Digital Readouts* περιλαμβάνουν οποιοδήποτε νούμερο εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας. Συνήθως, τα κυριότερα είναι οι τρέχουσες θέσεις των αξόνων *X*, *Y*, *Z*, *A*, *B* και *C*.

⁷ Ως *Feed Rate* ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο οι άξονες ή το εργαλείο (*controlled point*) κινείται. Συνήθως ρυθμίζεται από τον χρήστη σε μια σταθερή τιμή.



Εικόνα 5.7: Δυνατότητα παρέμβασης στη διαδικασία κοπής από το μενού του ελεγκτή

Η διαδικασία της κοπής απαιτεί τη συνεχή επίβλεψη του χρήστη. Πιθανά σφάλματα κατά την εκτέλεσή της περιλαμβάνουν απορύθμιση της κατακόρυφης θέσης του σημείου αναφοράς Z0 ή και τη πιθανή μετατόπιση του κοπτικού, συνήθως σε περιπτώσεις αυξημένης απαιτούμενης ροπής. Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν ο σερβοκινητήρας αδυνατεί να μετακινηθεί, ο ελεγκτής συνεχίζει την υλοποίηση του G-code. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο χρήστης πρέπει να συμβουλευτεί το σήμα του κωδικοποιητή, για την αποφυγή καταστροφής της κατασκευής.

Κατά τη διάρκεια της κοπής και με τη βοήθεια μετρητικών υψηλής ακρίβειας, εκτιμήσαμε ότι η κατεργασία στη μηχανή παρουσιάζει απόκλιση 0.2 χιλιοστών ανά μέτρο. Ρυθμίζοντας τους παλμούς περιστροφής ανά χιλιοστό μέσω του ελεγκτή, καταφέραμε να μειώσουμε την απόκλιση σε λιγότερο από 0.1 χιλιοστό ανά μέτρο. Περαιτέρω βελτίωση δεν είναι εφικτή, καθώς εξαρτάται από το βήμα του κοχλία και τα χαρακτηριστικά των σερβοκινητήρων.

5.4.Εναλλακτικός τρόπος κατασκευής προτύπων πλοίων

Πολλές φορές, η αντοχή ή το βάρος του μοντέλου είναι καίριας σημασίας στη διαδικασία παραγωγής. Σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται ελαφριά μοντέλα, με ομοιόμορφη κατανομή βάρους, οι συνήθειες τεχνικές δεν επαρκούν. Τότε, κρίνεται απαραίτητη η χρήση διαφορετικών τύπων υλικών ή μια γενικότερη εναλλακτική προσέγγιση.

Στο παράδειγμά μας, στόχος ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου με όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος. Έτσι, έγινε επιλογή σύνθετων υλικών και συγκεκριμένα των MDF και DOW. Κατά τη διαμόρφωση του εσωτερικού της γάστρας, κάθε οριζόντιο επίπεδο σχεδιάστηκε και κόπηκε ξεχωριστά. Ακολούθησε η συναρμολόγηση των διαμορφωμένων πλέον επιπέδων (Εικόνα 5.8), η οποία καταλήγει στη δημιουργία μιας γάστρας με ομοιόμορφο πάχους. Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται στην παραδοσιακή μέθοδο των ισάλων (bread & butter), για την οποία αναφερθήκαμε στην εισαγωγή. Θεωρήθηκε η απόκλιση των 0.2 χιλιοστών ανά μέτρο, έπειτα από την αρχική βαθμονόμηση της CNC μηχανής.



Εικόνα 5.8: Συναρμολόγηση οριζόντιων επιπέδων

Ξεκινώντας, επιβεβαιώνεται πως το πλαίσιο είναι πολύ καλά στερεωμένο στο τραπέζι, ώστε να προβλεφθούν ανεπιθύμητες δονήσεις κατά την κοπή (Εικόνα 5.9). Για τη συγκράτηση του τεμαχίου πάνω στη βάση χρησιμοποιούνται βίδες. Σε επόμενη εικόνα παρατηρείται η δημιουργία έξι οπών (τρεις ανά πλευρά) επί του οριζόντιου επιπέδου, για τη μετέπειτα εφαρμογή βιδών (Εικόνα 5.10). Οι θέσεις αυτές μεταβάλλονται σε κάθε τεμάχιο, γιατί η γάστρα «κλείνει» όσο πλησιάζουμε τον πυθμένα. Σημειώνεται επίσης πως οι βίδες θα χρησιμοποιηθούν μόνο για την ευθυγράμμιση των «στρωμάτων» γάστρας (layers). Μας ενδιαφέρει η επαφή των τμημάτων μέχρι να τοποθετεί κόλλα μεταξύ τους, ώστε να εξασφαλιστεί η ένωσή τους (με καβίλιες). Ούτως ή άλλως, το κομμάτι γύρω από τη γάστρα στο τέλος θα αφαιρεθεί.

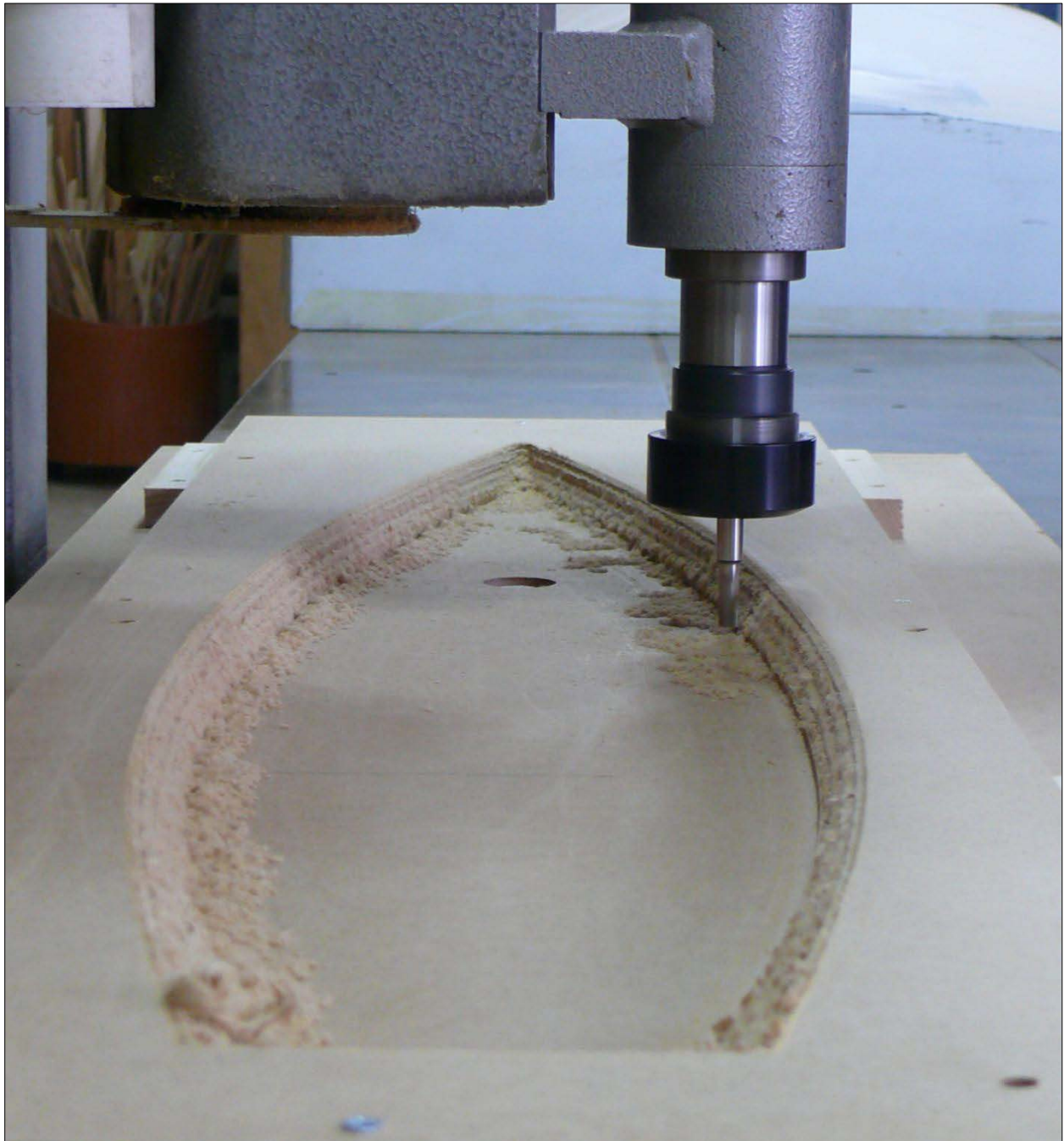


Εικόνα 5.9: Χρήση βάσης κατά την κοπή οριζόντιου επιπέδου της γάστρας



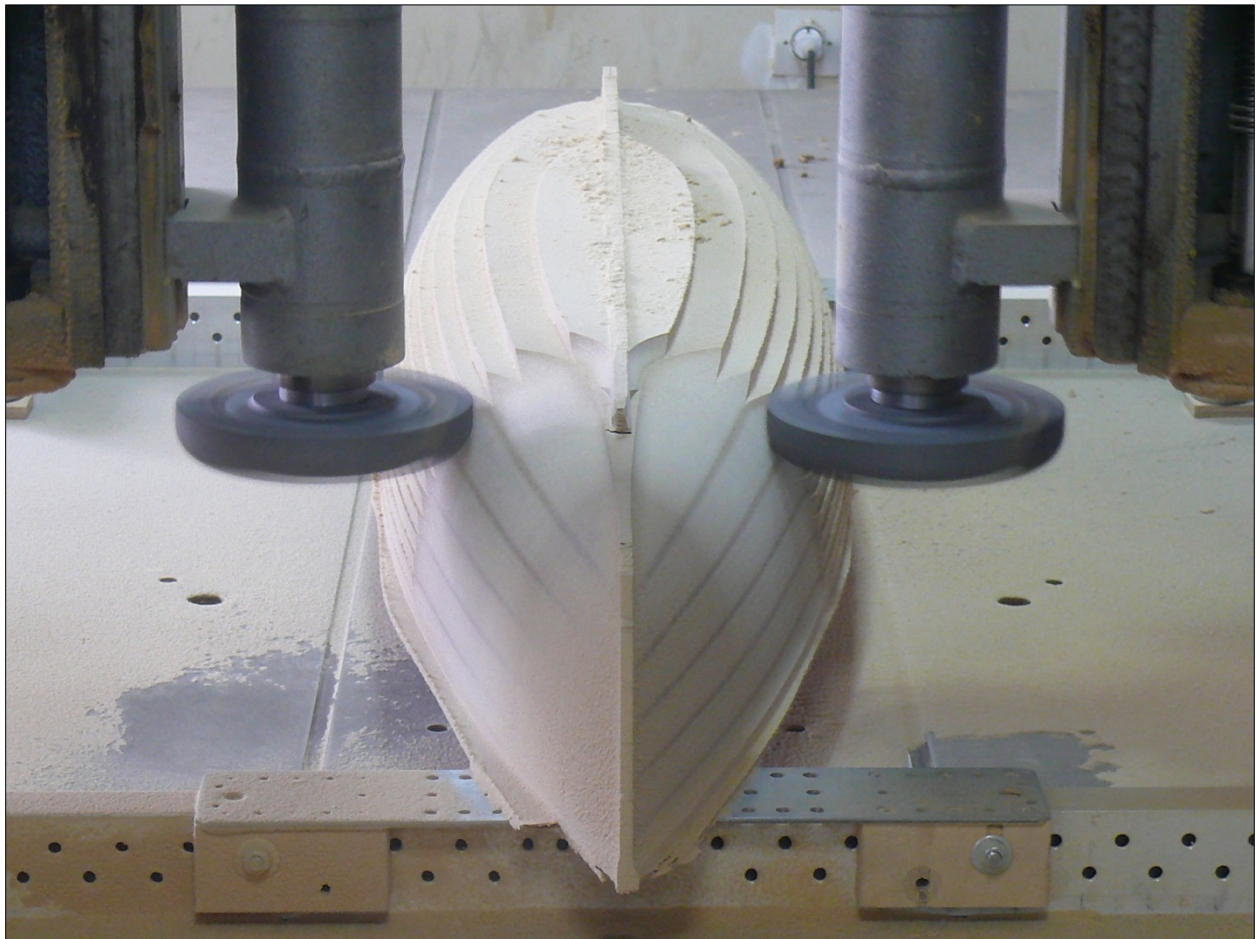
Εικόνα 5.10: Συγκράτηση τεμαχίου στη βάση μέσω βιδών

Έπειτα, ο χρήστης πρέπει να υλοποιήσει τους κώδικες G, όπως παρήχθησαν από τις διεργασίες που ορίστηκαν στο CAM (ξεχόνδρισμα και φινίρισμα). Η ποιότητα της κοπής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα περιστροφής των κοπτικών εργαλείων. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μειώσει την ταχύτητα κοπής πριν ή και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, σε περίπτωση που αντιληφθεί πως η ποιότητα της επιφάνειας δεν είναι η επιθυμητή.



Εικόνα 5.11: Διεργασία φινιρίσματος στο εσωτερικό οριζόντιου επιπέδου

Στη συνέχεια, η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για τη διαμόρφωση του περιβλήματος της γάστρας (Εικόνα 5.12). Με αυτόν τον τρόπο, η γάστρα μπορεί να διαφοροποιηθεί εσωτερικά και εξωτερικά, ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος. Το πάχος της προκύπτει μέσω μιας μετατόπισης στη διαδρομή των κοπτικών εργαλείων.



Εικόνα 5.12: Διαεργασία φινιρίσματος στο περίβλημα της γάστρας

Ο τυπικός χρόνος κοπής εκτιμάται περίπου στις 20 ώρες για ένα μοντέλο 3.5 μέτρων. Τέλος, για την εκτίμηση της συνολικής απόκλισης στα μοντέλα, είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση της μηχανής. Σε αυτή, το σφάλμα εκτιμάται βάσει των περιστροφών του μοτέρ κίνησης και του βήματος του κοχλία. Υπενθυμίζεται εδώ πως, στην περίπτωση του ιστιοπλοϊκού, το σφάλμα λόγω βαθμονόμησης εκτιμήθηκε στα 0.2 χιλιοστά ανά μέτρο στο μοντέλο. Πλέον, η τιμή αυτή έχει πρακτικά εκμηδενιστεί, έπειτα από διόρθωση στη μηχανή.

6. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΕΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (ΛΕΙΑΝΣΗ-ΒΑΦΗ)

Η επιφάνεια της γάστρας μετά τη διαμόρφωσή της στη CNC μηχανή απαιτεί μια σύντομη διαδικασία λείανσης με γυαλόχαρτο, αρχίζοντας από 220 grit και τελειώνοντας με 400. Χρήση γυαλόχαρτων μεγαλύτερου κόκκου εγκυμονεί κίνδυνο παραμόρφωσης της επιφάνειας. Σε μεμονωμένες περιπτώσεις ατελειών λόγω του υλικού ή της διαδικασίας κοπής, ενδείκνυται η τοπική χρήση πολυεστερικού στόκου. Συνήθως, η διαδικασία δεν απαιτεί τη χρήση πατρών στον έλεγχο και τη διόρθωση ατελειών της γεωμετρίας.

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε αστάρι εσωτερικά και εξωτερικά της κατασκευής, με εμποτιστικό (μονωτικό πολυεστέρα) δύο συστατικών. Ακολουθεί η εφαρμογή υποστρώματος (στόκος πιστολιού) δύο συστατικών (primer). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ωστόσο καλυφθούν όλοι οι πόροι του ξύλου. Συνίσταται η εφαρμογή τουλάχιστον τριών στρώσεων υποστρώματος για το βέλτιστο αποτέλεσμα στη βαφή. Μεταξύ των στρώσεων, η επιφάνεια λειαίνεται με γυαλόχαρτο για την επίτευξη ακόμη πιο λείου αποτελέσματος.



Εικόνα 6.1: Εφαρμογή υποστρώματος στο εξωτερικό της γάστρας

Στο τελικό στάδιο, η εξωτερική επιφάνεια λειαίνεται με το ψιλότερο γυαλόχαρτο (400 grit) και αρχίζει η διαδικασία της βαφής. Συνήθως χρησιμοποιείται βαφή δύο συστατικών, η οποία παρουσιάζει μεγάλη ανθεκτικότητα στην υγρασία. Το κύριο μειονέκτημα των πολυεστερικών βαφών είναι το πολύ σύντομο χρονικό περιθώριο εφαρμογής που επιτρέπουν στο χρήστη.

Όταν η βαφή στεγνώσει, προχωρούμε στη χάραξη των νομέων και των ισάλων με χρήση ισομετρικού χαρακτήρα.



Εικόνα 6.2: Ολοκλήρωση κατασκευής

Συγκριτικά με τις παλιότερες μεθόδους, εμφανίζεται αισθητά μικρότερος αριθμός βαθουλωμάτων, οπότε η επιφάνεια είναι σχεδόν λεία. Χρήση στόκου πιστολιού ενδείκνυται για την επικάλυψη των πόρων του ξύλου. Οι διαφορές της τελικής από την αρχική επιφάνεια οφείλονται στο λάθος ψηφιοποίησης της φρεζομηχανής, καθώς και στις διαφορές της επιφανείας λόγω εξομάλυνσης (όρα κεφάλαιο 2.1.2.).

7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στη παρούσα διπλωματική, ζητήθηκε η μοντελοποίηση δύο χαρακτηριστικών τύπων σκαφών. Η πρώτη αφορά τη δημιουργία ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους, ενώ η δεύτερη ένα φορτηγό πλοίο τύπου χύδην (bulk carrier). Θεωρήθηκε ότι τα δύο αυτά σκάφη αντιπροσωπεύουν ένα ικανοποιητικό δείγμα προτύπων που χρησιμοποιεί το εργαστήριο για πειραματικούς σκοπούς. Το μεν φορτηγό για την απαιτητική διαμόρφωση στην πλώρη και στην πρύμνη, το δε ιστιοπλοϊκό ως χαρακτηριστικό σκάφος αναψυχής. Ειδικά για την περίπτωση του φορτηγού, λόγω της μεγάλης κλίμακας αλλά και της πολύπλοκης γεωμετρίας του βολβού, χρειάστηκε ειδική διαχείριση για την επίτευξη του επιθυμητού στόχου. Ακολούθως παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των δύο αυτών σκαφών, καθώς και κάποιες λεπτομέρειες όσον αφορά τη σχεδίαση και κατασκευή των μοντέλων τους.

7.1. Πρότυπο ιστιοπλοϊκού σκάφους

Σε μια προσπάθεια αξιολόγησης της διαδικασίας σχεδίασης και κατασκευής που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, δημιουργήσαμε ένα μοντέλο ιστιοπλοϊκού σκάφους σε κλίμακα 1:13. Με συνολικό μήκος μοντέλου 1.20 m, επιτύχαμε τη μείωση του χρόνου και κόστους κοπής, ώστε να είναι δυνατή η δημιουργία πολλών προτύπων με μικρές τροποποιήσεις στις παραμέτρους σχεδίασης και κοπής. Μέσω αυτών παρατηρήθηκε αρχικά σημαντικός αριθμός ατελειών στην τελική επιφάνεια.



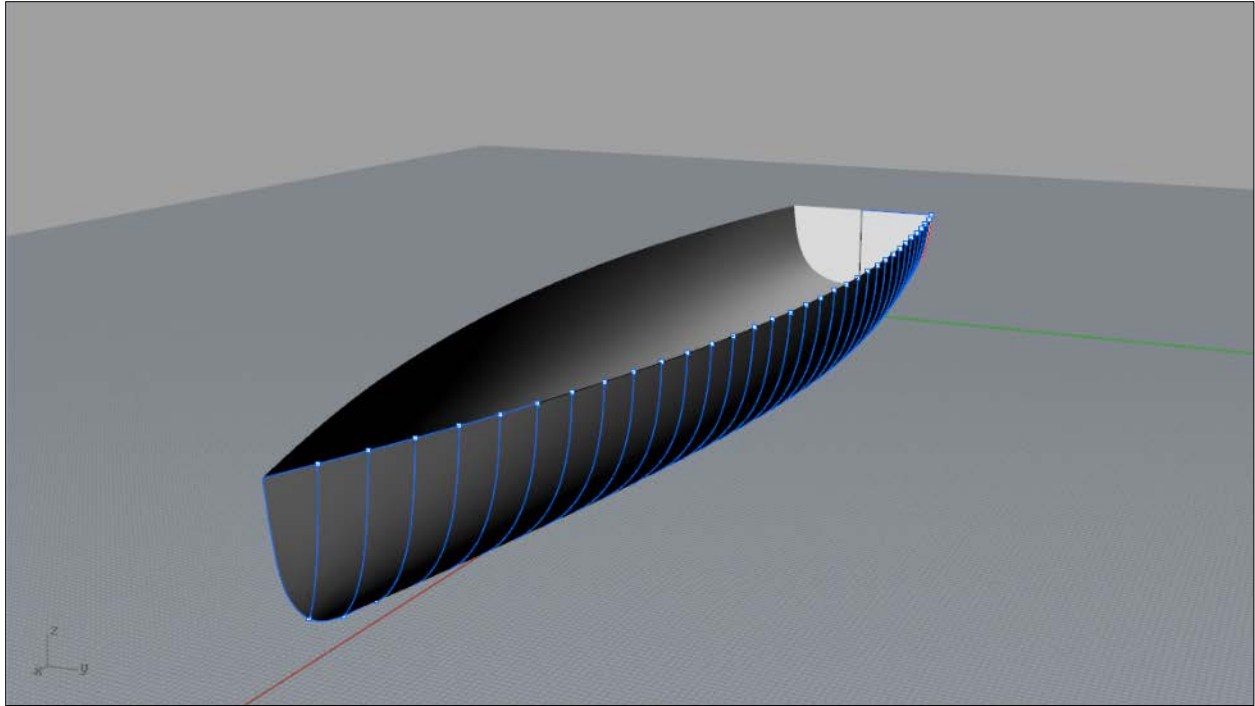
Εικόνα 7.1: Μοντέλο ιστιοπλοϊκού σκάφους μετά την κοπή

Σε πρώτη φάση, διορθώθηκαν ατέλειες που προέρχονταν από τη σχεδίαση του μοντέλου στο CAD. Έπειτα, η κοπή επαναλήφθηκε με το διορθωμένο σχέδιο, όπου προέκυψε βελτιωμένο αποτέλεσμα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι στην προσομοίωση το κοπτικό δεν είχε συνεχόμενες διαδρομές αλλά διακοπτόταν σε σημεία των επιφανειών χωρίς κάποιο εμφανή λόγο. Για το λόγο αυτό, η διαδικασία επαναλήφθηκε, έπειτα από τη βελτιστοποίηση των διαδρομών κοπής που ορίζονται στο CAM. Μετά από αρκετές δοκιμές, προχωρήσαμε σε νέα ρύθμιση των παραμέτρων κοπής, με στόχο την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος βάσει του υλικού κατεργασίας.

Για το εν λόγω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το σχέδιο γραμμών του σκάφους BOC-50 από το αρχείο του ΕΝΘΥ. Οι κύριες διαστάσεις του μοντέλου, καθώς και η τελική επιφάνεια του παρουσιάζονται παρακάτω:

Πίνακας 1: Κύριες διαστάσεις ιστιοπλοϊκού σκάφους

Κύρια Χαρακτηριστικά	BOC 50-ft yacht	Μοντέλο (κλίμακα 1:13)
Μήκος ισάλου (m)	15.36	1.20
Πλάτος ισάλου (m)	3.54	0.27
Βύθισμα σχεδίασης (m)	0.4150	0.0319
Μέγιστο βύθισμα (m)	4.065	0.3129
Εκτόπισμα σχεδίασης (kg)	7175	3.186
Εκτόπισμα παρελκόμενων (kg)	569	0.253
Διαγωγή	Ισοβύθιστο	
Υδροτομή καρίνας	NACA 64A015	
Εξάρτηση	Δυο κατάρτια	-
Επιφάνεια ιστιοφορίας (m ²)	130	-



Εικόνα 7.2: Τελική επιφάνεια προτύπου για το ιστιοπλοϊκό BOC-50

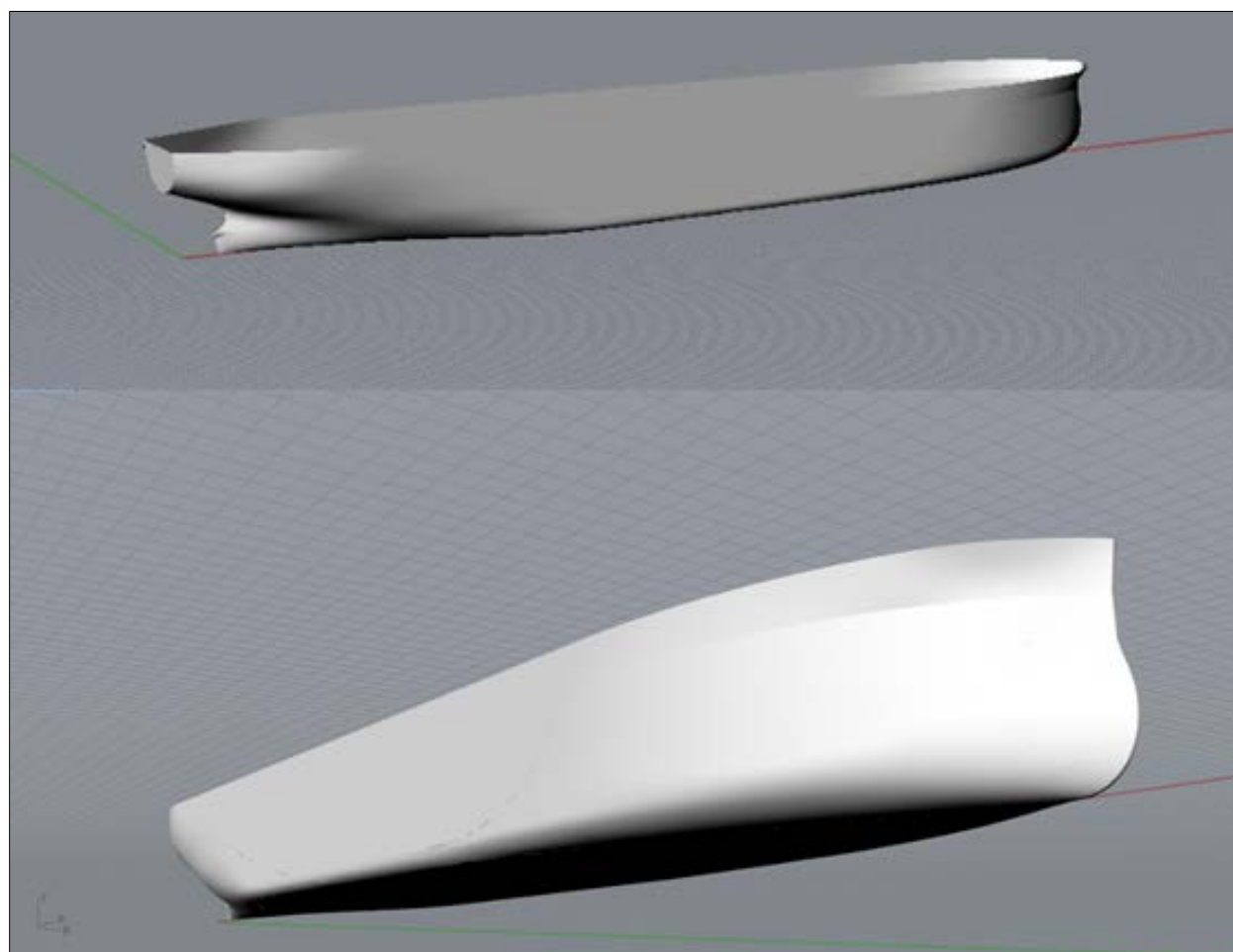
7.2. Πρότυπο φορτηγού πλοίου χύδην (bulk carrier)

Η εμπειρία που αποκτήθηκε από τη σχεδίαση και κατασκευή του προηγούμενου μοντέλου, συντέλεσε στη δημιουργία ενός προτύπου σκάφους με πιο πολύπλοκη γεωμετρία. Για το σκοπό αυτό, έγινε επιλογή προτύπου του φορτηγού τύπου M.V. Olympic Peace (bulk carrier), σε κλίμακα 1:75. Προς το παρόν, έχει ολοκληρωθεί η προαναφερόμενη διαδικασία από την εισαγωγή των κατασκευαστικών σχεδίων και τη σχεδίαση στο CAD, έως και την μοντελοποίηση στο CAM. Σύντομα, αναμένεται να προχωρήσουμε και στα επόμενα στάδια της κοπής και επιφανειακής κατεργασίας. Υπενθυμίζουμε σε αυτό το σημείο πως γνωρίζουμε ήδη ότι η κοπή του μοντέλου θα είναι τμηματική, γεγονός που προέκυψε από την προσομοίωση στο CAM. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή που ορίζεται από το βολβό στη πλώρη και την πλήμνη της πρύμνης παρουσιάζει μια αρκετά πολύπλοκη γεωμετρία, την οποία δεν μπορούν να διαχειριστούν τα διαθέσιμα κοπτικά εργαλεία. Για το λόγο αυτό, πρέπει να κατεργαστεί ξεχωριστά από το υπόλοιπο τμήμα της γάστρας.

Στη συνέχεια ακολουθεί πίνακας των κύριων χαρακτηριστικών του προτύπου και του πραγματικού πλοίου, όπως και η τρισδιάστατη απεικόνιση του στο CAD.

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά πλοίου τύπου *bulk-carrier*

Κύρια Χαρακτηριστικά	BOC 50-ft yacht	Πρότυπο (κλίμακα 1:75)
Μήκος καθέτων (m)	185.79	2.50
Πλάτος (m)	32.26	0.43
Κοίλο (m)	17.62	0.23
Βύθισμα σχεδίασης (m)	11.000	0.146
Μέγιστο βύθισμα (m)	12.502	0.167
Πρόσθετο βάρος (DWT) (t)	55709	0.129
Διαγωγή	Ισοβύθιστο	



Εικόνα 7.3: Τελική επιφάνεια προτύπου για το φορτηγό “Olympic Peace”

Το σφάλμα που εκτιμήθηκε στην τελευταία βαθμονόμηση της μηχανής είναι λιγότερο του 0.1 χιλιοστού ανά μέτρο. Παράλληλα, η μέγιστη απόκλιση από τις αρχικές γραμμές εκτιμήθηκε στα 101 mm στην περιοχή του καταστρώματος, κοντά στην πλώρη. Η μέτρηση αυτή αναφέρεται στις πραγματικές διαστάσεις του πλοίου (κλίμακα 1:1). Η απόκλιση ολόκληρης της βρεχόμενης επιφάνειας προέκυψε μικρότερη από 35 mm και είναι συμβατή με τις οδηγίες της ITTC.

7.3. Εναλλακτικός τρόπος κατασκευής ιστιοπλοϊκού σκάφους

Η παρούσα διαδικασία είχε ως στόχο την επίτευξη μικρότερου βάρους και μεγαλύτερης αντοχής, σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή. Για το σκοπό αυτό το σχέδιο και οι παράμετροι στο CAM δεν μεταβλήθηκαν, αλλά διαφοροποιήθηκε το υλικό κατασκευής. Επιπλέον, το μοντέλο κόπηκε με μετατόπιση της εξωτερικής επιφάνειας (offset) ενός χιλιοστού εσωτερικά, ώστε να ληφθεί υπόψη το πάχος της ρητίνης και του υαλονήματος.

Σημειώνεται εδώ πως η κατανομή του πάχους της γάστρας είναι ομοιόμορφη κατά το μήκος. Ωστόσο, πολλές φορές ενδείκνυται η διαμόρφωση ανομοιόμορφου πάχους κατά το μήκος της γάστρας, ούτως ώστε να επιτευχθεί διαφορετική κατανομή βάρους στο μοντέλο. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυτό μπορεί να οριστεί κατά βούληση το κέντρο μάζας και η ροπή αδράνειας της κατασκευής, που είναι ζητούμενα σε πειράματα δυναμικής συμπεριφοράς. Συνήθως η ροπή αδράνειας ορίζεται στο 0.25 του μήκους καθέτων του σκάφους.

Καθ' όμοιο τρόπο μπορεί να ενισχυθούν επιλεκτικά οι περιοχές της γάστρας που δέχονται μεγαλύτερο φορτίο. Σε πρώτη φάση, με χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, όπως το ANSYS, μπορούν να προσδιοριστούν οι πιο ευπαθείς περιοχές, οι οποίες θα επανασχεδιαστούν με αυξημένο πάχος. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ του βάρους και της αντοχής του σκάφους.

Σε αυτήν την περίπτωση, το μείζον μειονέκτημα έγκειται στο ότι η τελική εξωτερική επιφάνεια της γάστρας χρειάζεται αρκετή επεξεργασία ώστε να προκύψει ένα λείο αποτέλεσμα. Το προηγούμενο καταργεί εν μέρει τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου και θεωρήθηκε αντιπαραγωγικό. Εναλλακτική περίπτωση είναι η δημιουργία «θηλυκού» καλουπιού και εν συνεχεία η χρήση gel coat για τη δημιουργία της επιφάνειας (20). Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται κατά κόρον στην παραγωγή των ταχύπλων σκαφών και προσδίνει άψογο αποτέλεσμα.

Τόσο στο συγκεκριμένο, όσο και στην προηγούμενη εφαρμογή του ιστιοπλοϊκού σκάφους, η μέγιστη απόκλιση από τις αρχικές γραμμές εκτιμήθηκε 0.56 χιλιοστά στην περιοχή της πλώρης. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού CAD και αναφέρεται σε διαστάσεις του προτύπου (κλίμακα 1:13). Λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη το σφάλμα 0.2 χιλιοστών ανά μέτρο (μετά από βαθμονόμηση της μηχανής), προκύπτει συνολική απόκλιση μικρότερη από 1 χιλιοστό. Συνεπώς, τα όρια της ITTC ικανοποιούνται.



Εικόνα 7.4 : Επίστρωση υαλονήματος και ρητίνης στην επιφάνεια του μοντέλου

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το θέμα που μας απασχόλησε στην παρούσα διατριβή ήταν η σχεδίαση και κατασκευή μοντέλου γάστρας, εντός των προδιαγραφόμενων ανοχών. Για το σκοπό αυτό, το ΕΝΘΥ πρόσφατα αναβάθμισε μια παραδοσιακή χειροκίνητη φρέζα σε μηχανή αυτόματης κοπής, η οποία συνεργάζεται με λογισμικό CAD-CAM για την παραγωγή προτύπων πλοίων.

Κατά την εκτέλεση των προαναφερόμενων σταδίων, συνειδητοποιήσαμε πως η ακρίβεια στην κατασκευή των μοντέλων εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων. Μεταξύ αυτών είναι το λειτουργικό σφάλμα της μηχανής και του λογισμικού CAD/CAM, αλλά και κατά τη μεταφορά δεδομένων από τη σχεδίαση στη παραγωγή, η ορθή επιλογή υλικών κατασκευής και συγκόλλησης, οι αποκλίσεις λόγω επιφανειακής κατεργασίας (φινιρίσμα), καθώς και η τεχνογνωσία του υπεύθυνου τεχνίτη.

Η δυσκολία στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης από τις πραγματικές διαστάσεις εμφανίζεται ήδη από το στάδιο σχεδίασης. Δεδομένου ότι το σχέδιο γραμμών συχνά λαμβάνεται από τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου, τα οποία συνήθως διατίθενται σε έντυπη μορφή, πρέπει να συνυπολογιστεί το σφάλμα κατά τη ψηφιοποίηση τους. Ακόμη, λαμβάνεται υπόψη το σφάλμα ψηφιοποίησης της μηχανής CNC. Ωστόσο, η σημαντικότερη απόκλιση από το αρχικό σχέδιο προκύπτει από τον ανασχεδιασμό και την εξομάλυνση των γραμμών στο CAD. Μάλιστα, στην εφαρμογή του φορτηγού πλοίου, το ποσοστό της απόκλισης στο CAD εκτιμάται στο 90% της συνολικής.

Από τα παραπάνω γίνονται αντιληπτές οι δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε στην τήρηση των προδιαγραφών της ΙΤΤC. Ωστόσο, το πόρισμα από την εφαρμογή της διαδικασίας τόσο στην περίπτωση του ιστιοπλοϊκού σκάφους, όσο και την περίπτωση του φορτηγού πλοίου χύδην, επιβεβαιώνει πως είναι δυνατή η κατασκευή ενός μοντέλου με αρκετά μεγάλη ακρίβεια και σε μικρό σχετικά χρόνο. Καθώς τα παραπάνω πρότυπα δημιουργήθηκαν με διαφορετικό λόγο κλίμακας, έγινε αντιληπτή η σημασία της στην επίτευξη των δεδομένων προδιαγραφών. Για το λόγο αυτό, προτείνουμε σε αυτό το σημείο την αναθεώρηση των κανονισμών της ΙΤΤC, ώστε η ανοχή να οριστεί συναρτήσει της κλίμακας του μοντέλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η κλίμακα, τόσο αυστηρότερες πρέπει να είναι και οι απαιτήσεις στην απόκλιση.

Η διασφάλιση πως οι διαστάσεις των προτύπων είναι εντός των δεδομένων ορίων επιτυγχάνεται μέσω ακριβούς μέτρησης. Η επιθεώρηση των προτύπων ενδείκνυται τόσο αμέσως μετά την ολοκλήρωσή τους, όσο και μετέπειτα, κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων στη δεξαμενή. Εκεί, η επίδραση της παραμόρφωσης των μοντέλων στην ακρίβεια των μετρήσεων ελέγχεται πιο αποτελεσματικά (21).

Επί του παρόντος, το ΕΝΘΥ ασχολείται με την ενσωμάτωση μιας μετρητικής συσκευής στη CNC μηχανή. Πιο συγκεκριμένα, ο ελεγκτής Mach 3 παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με μια μετρητική συσκευή, ώστε να εκτελεί διαδικασία αυτόματης σάρωσης. Αισθητήρες επαφής και συσκευές laser μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό. Επιπλέον, με χρήση ενός τραπεζιού ψηφιακής καθοδήγησης (NC tilting rotary table), προστίθενται έναν επιπλέον άξονα στη μηχανή και, με κατάλληλη αλλαγή του μοτέρ των κοπτικών, επιτρέπει τη διαχείριση και κατεργασία ακόμη πιο πολύπλοκων γεωμετριών.

Επιπροσθέτως, οι διαφορετικές προσεγγίσεις και τα σύγχρονα υλικά επιτρέπουν τη μείωση του κόστους και βάρους, όπως και την αύξηση των δυνατοτήτων της κατασκευής. Στην περίπτωση μας, έγινε χρήση των DOW απλού MDF, τα οποία είναι οικονομικά υλικά και εύκολα κατεργάσιμα. Εναλλακτικά, ενδείκνυται η χρήση του πράσινου MDF, το οποίο αποτελεί ιδανική λύση για τη δημιουργία αδιάβροχων κατασκευών.

Υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο το πλεονέκτημα που παρέχουν τα σύνθετα υλικά και το ξύλο στην επιλογή ανομοιόμορφης κατανομής του βάρους κατά το μήκος του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση του πάχους στις περιοχές της γάστρας που χρειάζονται επιπλέον ενίσχυση.

Αξίζει να σημειωθεί πως, πριν την επιφανειακή κατεργασία, καθίσταται εφικτός ο προϋπολογισμός του πάχους της βαφής και του primer. Πιο συγκεκριμένα, η συνεισφορά του κάθε στρώματος στο συνολικό πάχος μπορεί να μετρηθεί σε μια επίπεδη επιφάνεια, η οποία έχει επιστρωθεί με την αναμενόμενη ποσότητα βαφής ή primer που θα εφαρμοστεί μετέπειτα στο μοντέλο.

Τέλος, αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως μέρος της παρούσας διπλωματικής δημοσιεύτηκε στο διεθνές συνέδριο MARTECH 2018 στην Πορτογαλία (“4th International Conference on Maritime Technology and Engineering”) (22). Το συνέδριο διεξήχθη στο Πολυτεχνείο “Técnico Lisboa” της Λισαβόνας, στις 7-9 Μαΐου του τρέχοντος έτους. Αντικείμενο συζήτησης αποτέλεσε, μεταξύ άλλων ο σχεδιασμός, η αντίσταση και πρόωση του πλοίου, η χρήση της υπολογιστικής υδροδυναμικής, η αξιοποίηση κυματικής και αιολικής ενέργειας, η εφαρμογή σύνθετων υλικών, καθώς και οι πλωτές κατασκευές.

9. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο σημείο αυτό, πραγματοποιείται αναφορά σε κάποιες προτάσεις, οι οποίες επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της σχεδίαση προτύπων πλοίων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η ιδέα της παραμετροποίησης και της γενικότερης αυτοματοποίησης της διαδικασίας σχεδιασμού, ενώ σχολιάζεται η επιλογή της τριγωνοποίησης ως μεθόδου απεικόνισης της γεωμετρίας στο λογισμικό CAD.

9.1.Τριγωνοποίηση

Η απεικόνιση τρισδιάστατων μοντέλων επιφανειών γίνεται συνήθως με την δημιουργία μιας ψηφιακής προσέγγισης τους. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος, η οποία εφαρμόζεται και στην περίπτωση του Rhinoceros 3d, είναι η προσέγγιση της αρχικής επιφάνειας με μια πολυεδρική, η οποία ορίζεται από ένα πλέγμα τετραπλεύρων. Το γεγονός αυτό καθιστά δύσκολη την παρεμβολή επιφανειών σε ένα μοντέλο πλοίου όπου, όπως είδαμε, εμφανίζει κάποιες περιοχές με μη τετραπλευρική τοπολογία. Παράλληλα, σε μια τετραπλευρική επιφάνεια δεν μπορεί να εφαρμοστεί ανάλυση CFD (Computational Fluid Dynamics), η οποία αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην εύρεση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του μοντέλου.

Σε μια προσπάθεια αντιμετώπισης των παραπάνω προβλημάτων, προτείνεται η δημιουργία ενός πλέγματος τριγώνων για την παρεμβολή της επιφάνειας. Το πλέγμα αποτελείται από ένα σύνολο κορυφών και τριγώνων που ορίζουν το σχήμα. ενός αντικειμένου. (23)

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος τριγωνοποίησης είναι η τριγωνοποίηση κατά Delaunay ενός συνόλου εστιών για την οποία ισχύουν τα εξής:

- Τρεις εστίες ορίζουν τρίγωνο αν ο περιγεγραμμένος κύκλος του είναι κενός, δηλαδή δεν περιέχει εστίες στο εσωτερικό του
- Δύο εστίες ορίζουν ακμή αν υπάρχει κενός κύκλος με τις εστίες στην περιφέρειά του, δηλαδή υπάρχει κλειστός δίσκος με χορδή που ορίζεται από τις δύο εστίες και δεν περιέχει καμία άλλη εστία.

Ο λόγος για τον οποίο η μέθοδος Delaunay θεωρείται υψηλής ποιότητας είναι ότι αποφεύγει τις μικρές γωνίες. Η μικρότερη γωνία της μεθόδου Delaunay είναι τουλάχιστον ίση με την μικρότερη γωνία κάθε άλλης μεθόδου τριγωνοποίησης δεδομένων εστιών.

Μια εφαρμογή της τριγωνοποίησης στο Rhinoceros 3d έχει ήδη πραγματοποιηθεί, στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας (16). Αρχικά, επιλέχθηκε ο μέγιστος αριθμός τριγώνων, ώστε η τριγωνοποίηση να προσεγγίζει όσο το δυνατόν τη γεωμετρία του μοντέλου. Εν συνεχεία, έγινε εισαγωγή των αρχείων στο πρόγραμμα 3ds Max 8, ένα λογισμικό για 3d animation, modeling και rendering. Το εν λόγω πρόγραμμα παρέχει εργαλεία επεξεργασίας πολυγωνικών meshes, με τα οποία μεταβάλλουμε τον αριθμό των τριγώνων που περιγράφουν κάθε αντικείμενο.

Στόχος μας είναι η παραγωγή αρχείων με διαφορετικό επίπεδο λεπτομέρειας (level of detail). Ο όρος αυτός αναφέρεται στην απλούστερη αναπαράσταση αντικειμένων ανάλογα με την απόσταση

τους από τον «θεατή» ή ανάλογα με άλλα κριτήρια ποιότητας, όπως ορατότητα, σπουδαιότητα του αντικειμένου ή προσομοίωση κίνησης. Μία λύση είναι να ορίσουμε το αντικείμενο με την μέγιστη απαιτούμενη λεπτομέρεια. Στην περίπτωση αυτή όμως όταν το αντικείμενο απεικονίζεται από μακριά θα χρησιμοποιούσαμε περισσότερη λεπτομέρεια από την απαιτούμενη. Σε περίπτωση αναπαράστασης πολλών ίδιων αντικειμένων η περιττή πληροφορία δεν θα ήταν αμελητέα. (24). Μια καλή λύση για να αντιμετωπιστεί το άνω πρόβλημα είναι η περιγραφή ενός αντικειμένου με διάφορα μοντέλα. Θεωρούμε ότι τρεις διαφορετικές αναπαραστάσεις είναι επαρκείς για να προσομοιώσουν το επιθυμητό επίπεδο λεπτομέρειας. Ο διαχωρισμός των επιπέδων λεπτομέρειας μπορεί να πραγματοποιηθεί μειώνοντας των αριθμό των τριγώνων του κάθε αντικειμένου. Με τον τρόπο αυτό παράγουμε διαφορετικές γεωμετρικές αναπαραστάσεις. Οι διαφορετικές εκδοχές του μοντέλου μας θα παραχθούν με επεξεργασία των τριγώνων που αναπαριστούν κάθε αντικείμενο. Θα δημιουργήσουμε τρία διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας. Η παραγωγή των διαφορετικών επιπέδων δεν θα γίνει συνολικά. Αντικείμενα τα οποία αποτελούνται από απλές επίπεδες επιφάνειες αναπαρίσταται με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα επίπεδα λεπτομέρειας.

9.2. Αυτοματοποίηση - Παραμετροποίηση

Η στρατηγική κατεργασίας τμημάτων πολύπλοκης μορφής, όπως ένα μοντέλο, δεν μπορεί εύκολα να τυποποιηθεί, λόγω των σύνθετων και πολλές φορές επικαλυπτόμενων σχημάτων που παρουσιάζει η μορφή της γάστρας τους. Ωστόσο, η πορεία κατεργασίας μπορεί εν μέρει να αυτοματοποιηθεί βάσει της εμπειρίας από τα προηγούμενα δεδομένα κατεργασίας. Το πρόβλημα είναι πως τα δεδομένα αυτά δεν παρουσιάζουν την κατάλληλη δομή για να χρησιμοποιηθούν από τους προγραμματιστές πορείας, ώστε να παραχθούν οι επιθυμητές στρατηγικές κατεργασίας και τα σχέδια πορείας. Οι μέθοδοι σχεδιασμού αποτελούν το επίκεντρο της έρευνας τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, η διαχείριση τρισδιάστατων γεωμετριών σε σύστημα CAD παραμένει μια δύσκολη διαδικασία.

Μια συνηθισμένη προσέγγιση για την ανεύρεση εναλλακτικών σχεδιασμών είναι να μεταβάλλουμε τα μέρη του συστήματος. Τα τμήματα και το σύνολο πρέπει να παραμετροποιηθούν επαρκώς για την επίτευξη των σχεδιαστικών στόχων. Σε τμηματικό επίπεδο, ο παραμετρικός σχεδιασμός υποδηλώνει τη δημιουργία στερεών χαρακτηριστικών και σχετικών διαστάσεων, ώστε η μεταβολή μιας διάστασης να σηματοδοτεί την κατάλληλη ανακατασκευή του μέρους, το οποίο εξακολουθεί να πληροί τους στόχους σχεδιασμού. Συνολικά, η παραμετροποίηση σχεδιασμού περιλαμβάνει τον ορισμό των μερών της συστοιχίας και τη συσχέτιση των διαστάσεων των τμημάτων. Όταν ένα σύνολο είναι πλήρως παραμετροποιημένο, η μεταβολή στην τιμή μιας διάστασης διαδίδεται αυτόματα σε όλα τα τμήματα που επηρεάζονται. Αυτά ανακατασκευάζονται διατηρώντας κατάλληλες θέσεις και προσανατολισμούς, χωρίς να διαταράξουν κάποιο άλλο τμήμα του συνόλου.

Ένα παραμετρικό στερεό μοντέλο αποτελείται από δύο στοιχεία κλειδιά: ένα δέντρο χαρακτηριστικών και πλήρως παραμετροποιημένα σχέδια για τα προεξέχοντα στερεά χαρακτηριστικά. Ένα τέτοιου είδους σχέδιο συνεπάγεται ότι το συνολικό προφίλ του σχεδίου είναι πλήρως ορισμένο όσον αφορά τους περιορισμούς και τις διαστάσεις του. Συνεπώς, η μεταβολή μιας διάστασης οδηγεί σε αναδόμηση, όπως προβλέπεται από τις προϋποθέσεις του σχεδιασμού (8).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Recommended Procedures and Guidelines*. **ITTC**. s.l. : International Towing Tank Conference, 2002. Model Manufacture. Ship Models. σσ. 1-3.
2. **Wikipedia**. Numerical control. *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Ηλεκτρονικό] 27 June 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control.
3. **Δαμιανίδης, Κ.Α.** *Ελληνική Παραδοσιακή Ναυπηγική*. Αθήνα : Πολιτιστικό Τεχνολογικό Ίδρυμα ΕΤΒΑ, 1998.
4. Λεξικό Ναυτικών Όρων. *www.naftotopos.gr*. [Ηλεκτρονικό] 05 Φεβρουαρίου 2012. http://www.naftotopos.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=102&Itemid=483&lang=el.
5. **Κ.Δαμιανίδης, Α.Ζήβας**. *Το τρεχαντήρι στην Ελληνική Ναυπηγική Τέχνη*. Αθήνα : ΕΟΜΜΕΧ, 1986.
6. **Kempf & Remmers**. *Making Wooden Ship Models*. Hamburg : Indian Institute of Technology, May 1954.
7. **Παντελής, Δ.Ι.** *Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά*. Αθήνα : Παπασωτηρίου, 2008.
8. *3D Shape Engineering and Design Parameterization*. **Chang K., Chen C.** s.l. : University of Oklahoma, 2011. *Computer-Aided Design & Applications*. σσ. 681-692.
9. **Wikipedia**. G-code. *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Ηλεκτρονικό] 21 April 2018. <https://el.wikipedia.org/wiki/G-code>.
10. *Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review*. **A. Lasemi, D. Xue, P. Gu**. 2010, *Computer-Aided Design* 42/7, σσ. 641-654.
11. *Adaptable geometric patterns for five-axis machining: a survey*. **Makhanov, S.S.** 2010, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47/9-12, σσ. 1167–1208.
12. **Κώστας, Κ.Β.** *3D Σχεδίαση & Υπολογισμοί με το Rhino 3d*. Αθήνα : da Vinci, 2014.
13. **Robert McNeel & Associates**. <https://www.rhino3d.com/>. Barcelona, Spain : s.n., 2018.
14. **Wikipedia**. Rhinoceros 3D. *Wikipedia, the free encyclopedia*. [Ηλεκτρονικό] 28 March 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Rhinoceros_3D.
15. **Κακλής, Π.Δ.** *Συστήματα CAD/CAM για τη Σχεδίαση & Κατασκευή Πλοίου*. Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2011.
16. **Μυλωνάς, Δημήτριος**. Διπλωματική εργασία. *Επεξεργασία γεωμετρίας πλοίου για εφαρμογή σε εικονικό περιβάλλον*. Αθήνα : Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Ιούλιος 2008.
17. **T.Lyche , K.Mørken**. *Spline Methods*. 2005.
18. **MachDN**. *Using Mach3Mill: A user's guide to installation, configuration and operation*. s.l., Livermore Falls, USA : Art Fenerty and John Prentice, 2006.

19. **Μαρτίκας, Παναγιώτης.** Διπλωματική εργασία. *Κατασκευή παραμετρικά σχεδιασμένου πιστονιού βενζινοκινητήρα σε κέντρο κατεργασιών και κέντρο τórνευσης CNC.* Αθήνα: Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Ιανουάριος 2014.
20. **Τσούβαλης, Ν.Γ.** *Ανάλυση & σχεδίαση σκαφών από σύνθετα υλικά (Σημειώσεις μαθήματος).* Αθήνα: Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, 1998.
21. *Proceedings of the 23rd ITTC – Volume III. Group Discussion B.1: Model Manufacturing and Accuracy.* **ITTC.** s.l.: 23rd International Towing Tank Conference, 2002.
22. *Procedure for production of scaled ship models for towing tank testing.* **K. D. Giannisi, D.E. Liarokapis, J. P. Trachanas, G. P. Milonas & G. D. Tzabiras.** Lisbon: s.n., 2018.
23. **Εμίρης, Γ.Ζ.** *Υπολογιστική Γεωμετρία. Μια σύγχρονη αλγοριθμική προσέγγιση.* Αθήνα: Κλειδάριθμος, 2009.
24. **Clark, J.H.** *Communications of the ACM. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms.* October 1976, σσ. 547-554.