



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Αυτοματοποίηση Γραμμής Παραγωγής
Ναυπηγείου Πλαστικών Σκαφών

Γεώργιος Αναγνωστάκης

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Ν. Τσούβαλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	9
2	Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1	Εισαγωγή στην Αυτοματοποίηση	11
2.1.1	Αυτοματοποίηση και Βιομηχανία	11
2.1.2	Η εξέλιξη της Βιομηχανίας	12
2.2	Βιομηχανία 4.0 / Industry 4.0	14
2.2.1	Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (Cyber – Physical Systems)	15
2.2.2	Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT)	15
2.2.3	Ρομπότ (Robots).....	16
2.2.4	Εικονική και Επαυξημένη πραγματικότητα (Virtual and Augmented Reality).....	17
2.2.5	3D εκτύπωση (3D Printing) ή Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing).....	18
2.2.6	Αισθητήρες (Sensors).....	18
2.2.7	Μοντελοποίηση / Προσομοίωση (Modelling / Simulation) – Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins).....	19
2.2.8	Τεχνολογίες Συλλογής και Επεξεργασίας Δεδομένων (Big Data / Data Processing).....	22
2.2.9	Τεχνολογίες αναβάθμισης της Εφοδιαστικής Αλυσίδας (Logistics).....	22
2.2.10	Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing)	23
2.2.11	Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) και Μηχανική Μάθηση (Machine Learning).....	23
2.3	Αυτοματοποίηση στην αυτοκινητοβιομηχανία.....	24
2.4	Αυτοματοποίηση στην αεροδιαστημική βιομηχανία	25
2.4.1	Ρομπότ και Αυτόματη Τοποθέτηση Υφασμάτων.....	26
2.4.2	Χρήση τεχνολογιών Εικονικής Πραγματικότητας (VR).....	30
2.4.3	Χρήση τεχνολογιών Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR)	31
2.4.4	Τεχνολογίες Αισθητήρων στη διαδικασία παραγωγής.....	33
2.5	Αυτοματοποίηση στη ναυπηγική βιομηχανία	34
2.5.1	Ναυπηγεία Μεταλλικών Σκαφών.....	35
3	Κεφάλαιο 3 – Αυτοματοποίηση στα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών	40
3.1	Σύγχρονα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών	41
3.2	Φάση Σχεδιασμού (Design Phase) και Οργάνωσης της Παραγωγής (Production Planning)	43
3.2.1	Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) και Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems).....	43
3.2.2	Ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins – DTs) και Προσομοίωση (Simulation).....	46
3.2.3	Εικονική και Επαυξημένη Πραγματικότητα (VR & AR)	46
3.2.4	Μέθοδος Kanban (ή Lean Manufacturing)	47
3.2.5	Big Data / Data Processing / Cloud Computing / Artificial Intelligence (AI) .	48

3.3	Εφοδιαστική Αλυσίδα και Οργάνωση – Logistics.....	50
3.3.1	ERP systems / MES.....	50
3.3.2	Ρομπότ (Logistic Robots) και Cobots	51
3.3.3	Τεχνολογίες Καταγραφής, Ταυτοποίησης και Εντοπισμού (Auto-ID Systems & RTLS).....	52
3.4	Στάδιο παραγωγής – Ναυπηγεία πλαστικών σκαφών.....	53
3.4.1	Μορφοποίηση με έγχυση ρητίνης σε κενό.....	53
3.4.2	Συναρμολόγηση και Εξοπλισμός	66
3.5	Ναυπήγηση μεγάλων πλοίων από σύνθετα υλικά	67
3.6	Επιθεώρηση των Πολύστρωτων (Inspection).....	70
3.7	Διαδικασίες Συντήρησης και Επισκευής	74
3.7.1	Κύριες αστοχίες και βλάβες στα σκάφη από σύνθετα υλικά	74
3.7.2	Τρόποι αυτοματοποίησης επισκευής	74
3.8	Άλλες τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν στο μέλλον.....	76
3.8.1	Τεχνολογίες αυτόματης τοποθέτησης σύνθετων υλικών (ίνες ή ολόκληρα υφάσματα).....	76
3.8.2	Τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης σύνθετων υλικών (3D Printing).....	83
4	Κεφάλαιο 4 – Case Study	87
4.1	Εισαγωγή.....	87
4.2	Βήματα προς το Ναυπηγείο 4.0	88
4.3	Στάδια παραγωγής.....	89
4.3.1	Σχεδιασμός μοντέλων και προετοιμασία σχεδίων προς παραγωγή	89
4.3.2	Οργάνωση παραγωγής και προμήθεια υλικών / εξοπλισμού.....	91
4.3.3	Παραγωγή πολύστρωτων προϊόντων και καλουπιών	93
4.3.4	Συναρμολόγηση και τοποθέτηση εξοπλισμού	98
4.3.5	Επιθεώρηση και τεχνολογίες Structural Health Monitoring (SHM).....	99
5	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	102
6	Βιβλιογραφία.....	104

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Βιομηχανικές Επανάστασεις (Schuh et al 2020).....	13
Σχήμα 2-2: Στάδια 4 ^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης (Schuh et al 2020)	14
Σχήμα 2-3: Ρομποτικός βραχίονας (kuka.com).....	16
Σχήμα 2-4: Τομείς στους οποίους μπορεί η τεχνολογία AR να βρει εφαρμογή (Fraga-Lamas et al 2018).....	17
Σχήμα 2-5: 3Δ εκτυπωτής (3dprintingmedia.network)	18
Σχήμα 2-6: Διάφοροι αισθητήρες (electronicshub.org)	19
Σχήμα 2-7: IoT,CPS & Digital Twins (Lu et al. 2020)	20
Σχήμα 2-8: Μονάδα τοποθέτησης υφασμάτων σε καλούπι διπλής καμπυλότητας (Leblebici 2018).....	26
Σχήμα 2-9: Τελικός τελεστής των KUKA/DLR (Leblebici 2018)	27
Σχήμα 2-10: Εικόνα του τελεστή (Leblebici 2018)	28
Σχήμα 2-11: Τελικός τελεστής προγράμματος FlexProCFK (Mason 2022)	29
Σχήμα 2-12: Πρόγραμμα AutoBLADE: Βήματα διαδικασίας (Mason 2022)	30
Σχήμα 2-13: Τεχνολογία CAVE (VR) (cog.ethz.ch/)	31
Σχήμα 2-14: Χρήση του λογισμικού PlyMatch (Novak-Marcincin 2012)	32
Σχήμα 2-15: Τυπική κάτοψη ναυπηγείου (Eyres 2012).....	36
Σχήμα 2-16: Εξοπλισμός ανεξάρτητα από τη γάστρα (εξοπλισμός on-unit). Μονάδα σωληνώσεων έτοιμη για τοποθέτηση σε τομέα [pdf - Ship Construction].....	37
Σχήμα 2-17: Συστήματα και τεχνολογίες του Ναυπηγείου 4.0 (Hasan & Mohamad 2018)....	38
Σχήμα 2-18: Τεχνολογίες ψηφιοποίησης [mdpi.com]	39
Σχήμα 3-1: Διάγραμμα ροής διεργασιών	42
Σχήμα 3-2: Λογισμικό Shipyard AI	50
Σχήμα 3-3: Αξιοποίηση RFID (https://www.rfidjournal.com/wp-content/uploads/2021/05/115_Jim_Morgan_Presentation.pdf)	52
Σχήμα 3-4: Βήματα διαδικασίας της μεθόδου μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ – Vacuum Infusion	54
Σχήμα 3-5: Κοπτικά εργαλεία σύνθετων (stylecnc.com/).....	55
Σχήμα 3-6: Κοπτικά εργαλεία (stylecnc.com/)	56
Σχήμα 3-7: Εκτύπωση γραφικών χαρακτήρων με τη χρήση τεχνολογίας Thermal Inkjet Printing (codetechcorp.com/)	56
Σχήμα 3-8: Κοπή υφασμάτων	57
Σχήμα 3-9: Μεταφορά κομμένων υφασμάτων με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα	58
Σχήμα 3-10: Τοποθέτηση κομμένων υφασμάτων στο κατάλληλο kit	58
Σχήμα 3-11: Προβολή αρίθμησης πάνω στα υφάσματα με τη χρήση προτζέκτορα.....	58
Σχήμα 3-12: Διάταξη Non-Crimp Fabric (Schrank 2017)	59
Σχήμα 3-13: Μεμβράνη από σιλικόνη ενώ είναι σηκωμένη μέσω κατάλληλης διάταξης.....	61
Σχήμα 3-14: Κάτοψη της μεμβράνης: αριστερά φαίνονται οι πένσες grip και η διάταξη για την ανύψωση της μεμβράνης, κεντρικά και δεξιά φαίνονται τα διαμήκη κανάλια που επιτρέπουν τη ροή της ρητίνης.....	61

Σχήμα 3-15: Διαδικασία ανοίγματος των σωλήνων τροφοδοσίας.....	62
Σχήμα 3-16: Έλεγχος των σωλήνων τροφοδοσίας και διακοπή ροής όπου χρειάζεται, ανάλογα με το μέτωπο της ρητίνης.....	62
Σχήμα 3-17: Προσομοίωση κοπής πολύστρωτου σε CAM πρόγραμμα (robotmaster.com/)..	64
Σχήμα 3-18: Ρομποτικοί βραχίονες της KMT Robotic Solutions (kmtwaterjet.com)	65
Σχήμα 3-19: Μηχάνημα στεγανοποίησης ακμών (airborne.com).....	65
Σχήμα 3-20: Σημειώσεις γεωαναφοράς – απεικόνιση σε γυαλιά AR (Fraga-Lamas et al 2018)	67
Σχήμα 3-21: Συναρμολόγηση πολύστρωτων πάνελ (Geuskens et al 2019).....	68
Σχήμα 3-22: Κατασκευή S/Y Pink Gin VI με τη μέθοδο συναρμολόγησης panel. Διακρίνεται ο σκελετός πάνω στον οποίο τοποθετείται το πλευρικό πολύστρωτο πάνελ. (Geuskens et al 2019).....	69
Σχήμα 3-23: Το καλούπι της Curveworks ενώ παρουσιάζει καμπύλη μορφή.....	70
Σχήμα 3-24: Ο υπολογισμός της αλλαγής του σχήματος του καλουπιού με τη χρήση CAD προγράμματος	70
Σχήμα 3-25: Αριστερά: NDT για επιφανειακές ατέλειες. Δεξιά: NDT για εσωτερικές ατέλειες (Chaki & Krawczak 2022)	71
Σχήμα 3-26: Αριστερά διάταξη δοκιμής πρόσκρουσης σε πηδάλιο από GFRP με ενσωματωμένους αισθητήρες FBGs. Δεξιά δείκτης αλλαγής δυσκαμψίας μετά την επιβολή κρουστικού φορτίου.	73
Σχήμα 3-27: Αριστερά: MobileBlock της εταιρίας DMG MORI.....	75
Σχήμα 3-28: Κεφαλή CNC πολλαπλών αξόνων για εναπόθεση ταινιών σύνθετου υλικού (ATL).	78
Σχήμα 3-29: Κεφαλή CNC (10-αξόνων) για εναπόθεση ινών σύνθετου υλικού (AFP).....	78
Σχήμα 3-30: Διάφορες παραλλαγές ενός συστήματος AFP. Δυνατότητα περιστροφής του καλουπιού, τεχνική που προέρχεται από τη μέθοδο περιέλιξης ινών (filament winding).	79
Σχήμα 3-31: Διαφορά της ποσότητας φύρας (scrap) στις δύο τεχνικές. Η ATL χρησιμοποιεί πολύ πιο παχές ταινίες, ενώ η AFP μπορεί να χρησιμοποιήσει στουπιά (tows) ινών μερικών χιλιοστών έως μερικών εκατοστών, ανάλογα την εφαρμογή.....	79
Σχήμα 3-32: Διάταξη τοποθέτησης υφασμάτων από τον πάγκο κοπής (δεξιά) στον πάγκο που θα γίνει η έγχυση της ρητίνης (Airborne) (Nehls 2022)	80
Σχήμα 3-33: Το CAD πρόγραμμα της Loop Technology που υπολογίζει τη γεωμετρία του τελικού τελεστή προκειμένου να τοποθετήσει το ύφασμα.	80
Σχήμα 3-34: Ο τελικός τελεστής FibreFORM [®] της Loop Technology ενώ αλλάζει μορφή σύμφωνα με τις οδηγίες από το CAD πρόγραμμα	80
Σχήμα 3-35: Αριστερά φαίνεται η κάτοψη του ενισχυτικού αφρού που έχει ντυθεί με ύφασμα. Δεξιά φαίνεται η διάταξη του μηχανήματος εναπόθεσης του υφάσματος.....	81
Σχήμα 3-36: Μηχανισμός σταθεροποίησης του υφάσματος. Δημιουργεί το μέτωπο επίστρωσης ασκώντας πίεση στα κατάλληλα σημεία.	82
Σχήμα 3-37: Προσομοίωση της επίστρωσης του υφάσματος.	82
Σχήμα 3-38: Υπολογισμός της παραμόρφωσης με τη χρήση λογισμικού FEA.....	82

Σχήμα 3-39: Αριστερά: Όριο αντοχής (από αριστερά προς τα δεξιά) – συνεχή ίνα άνθρακα με μήτρα θερμοπλαστικής ρητίνης, μικρές ίνες άνθρακα με μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης, συνεχής ίνα άνθρακα με μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης.....	84
Σχήμα 3-40: Αριστερά αφότου έχουν κολληθεί τα εκτυπωμένα κομμάτια και δεξιά το τελικό σκάφος βαμμένο (3dnatives.com).....	85
Σχήμα 3-41: Μηχάνημα LSAM της Thermwood εκτυπώνει κομμάτι καλουπιού για την κατασκευή πλαστικού σκάφους μήκους 51 ft. (3dnatives.com).....	85
Σχήμα 3-42: Κομμάτι του καλουπιού ολοκληρωμένο (3dnatives.com).....	86
Σχήμα 4-1: Οδηγίες σε tablet με χρήση AR [AR for manufacturing].....	93
Σχήμα 4-2: Μπλοκ αφρού πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από την κοπή.....	94
Σχήμα 4-3: Τοποθέτηση πάστας (αριστερά) και διαδικασίες φινιρίσματος στην πάστα (δεξιά).....	94
Σχήμα 4-4: Gel coat σε καλούπι υπό κατασκευή.....	95
Σχήμα 4-5: Χώρος κοπής υφασμάτων.....	95
Σχήμα 4-6: CNC-router.....	95
Σχήμα 4-7: Παροχή κενού.....	96
Σχήμα 4-8: Μεταλλικός σκελετός για τη στερέωση των καλουπιών.....	96
Σχήμα 4-9: Μηχάνημα εναπόθεσης gel coat.....	96
Σχήμα 4-10: Διαδικασία Infusion (διακρίνεται η πράσινη πλαστική μεμβράνη).....	96
Σχήμα 4-11: Κόλληση δύο πολύστρωτων κομματιών.....	97
Σχήμα 4-12: Ανοίγματα στη γάστρα για τη διέλευση καναλιών (μπλε εύκαμπτοι σωλήνες).....	97
Σχήμα 4-13: Ολοκληρωμένα σκάφη.....	99
Σχήμα 4-14: Αποθήκη εξοπλισμού προς τοποθέτηση.....	99
Σχήμα 4-15: Επιθεώρηση πολύστρωτου που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο AFP με χρήση AR γυαλιών. (Mason 2020, compositesworld.com).....	100

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3-1: Μέθοδοι εύρεσης επιφανειακών ατελειών: τύποι ατελειών, πλεονεκτήματα και περιορισμοί κάθε μεθόδου (Chaki & Krawczak 2022).....	71
Πίνακας 3-2: Μέθοδοι εύρεσης εσωτερικών ατελειών: τύποι ατελειών, πλεονεκτήματα και περιορισμοί κάθε μεθόδου (Chaki & Krawczak 2022).....	71
Πίνακας 3-3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ATL και AFP.....	77
Πίνακας 4-1: Σύνοψη τεχνολογιών που αξιοποιούνται και θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στο μέλλον από το ναυπηγείο	101

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Τσούβαλη, που γνώρισα μέσα από τις διαλέξεις των μαθημάτων του και είχα την ευκαιρία να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία μαζί του. Εκτός από πρότυπο καθηγητή αποτελεί και έναν εξαιρετικό και απλό άνθρωπο που εκτιμώ και σέβομαι απόλυτα.

Ευχαριστώ επίσης τον κύριο Ιωάννου που αφιέρωσε το χρόνο του για να μοιραστεί μαζί μου γνώσεις, πληροφορίες και απόψεις σχετικά με το θέμα της διπλωματικής μου. Αποτελεί πρότυπο Ναυπηγού Μηχανικού και χαίρομαι που είχα την τύχη να τον γνωρίσω αρκετά νωρίς στα ακδημαϊκά μου χρόνια.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στην οικογένεια και τους κοντινούς φίλους μου, που όλα τα χρόνια ήταν δίπλα μου, στα εύκολα και στα δύσκολα. Μέσα από την αγάπη και την στήριξή τους κατάφερα να φτάσω στο τέλος μιας αρκετά απαιτητικής διαδρομής και δεν θα μπορούσα να βρίσκομαι σε αυτή τη θέση σήμερα χωρίς αυτούς.

Γιώργος Αναγνωστάκης

1 Εισαγωγή

Η πλήρης παγκοσμιοποίηση έχει επηρεάσει πολλούς τομείς, ένας εκ των οποίων είναι και αυτός της ναυπηγικής, δημιουργώντας κάποιες ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, την είσοδο στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση και τη γιγάντωση του παγκόσμιου εμπορίου, καθίσταται τεράστιος ο παγκοσμιοποιημένος πλέον ανταγωνισμός. Μεγάλα ναυπηγεία, εκμεταλλευόμενα το μέγεθος, την οικονομική ισχύ και την τεχνογνωσία τους, ήδη έχουν αρχίσει να εφαρμόζουν αναδυόμενες τεχνολογίες επωφελούμενες από τα πολλά πλεονεκτήματα που έχουν να τους προσφέρουν. Αναγκάζουν με αυτόν τον τρόπο και μικρότερου μεγέθους εταιρείες να ακολουθήσουν σε αντίστοιχους ρυθμούς την παραγωγή τους, γιατί αλλιώς υπάρχει ο κίνδυνος να αφομοιωθούν. Ο ίδιος ο κίνδυνος, όμως, προσφέρει και δυνατότητες διασφάλισης της ακεραιότητας ενός μικρού ναυπηγείου, αφού η ανάγκη για ποιοτικά σκάφη, με έμφαση στη λεπτομέρεια, το σχεδιασμό, την εργονομία και την αξιοπιστία εξακολουθεί να υπάρχει. Εκτός από τις ανάγκες που προκύπτουν ως φυσικό επακόλουθο μια παγκοσμιοποιημένης οικονομίας, υπάρχουν και άλλες οι οποίες αφορούν στο περιβάλλον, στην καλύτερη διαχείριση των πρώτων υλών και στην εργασία που δεν επιβαρύνει την υγεία του ανθρώπου.

Με την είσοδο στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση υπάρχει η τάση για πλήρη ψηφιοποίηση και αυτοματοποίηση σε όλους τους κλάδους της βιομηχανίας, κάτι που ισχύει και στη ναυπηγική. Αν και η ναυπηγική αποτελεί ένα κλάδο που αποφεύγει τα ρίσκα και προτιμάει να προσκολλάται σε συνήθεις πρακτικές, οι εξελίξεις σε τεχνολογίες που συνδράμουν στην αυτοματοποίηση σε άλλους κλάδους, όπως αυτός της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, συμπαρασέρνουν και την ίδια. Απαιτήσεις για υψηλότερη παραγωγικότητα και διασφαλισμένη ποιότητα έχουν οδηγήσει τα διάφορα ναυπηγεία να υιοθετήσουν τεχνολογίες και πρακτικές που βελτιστοποιούν την παραγωγή τους. Οι απαιτήσεις αυτές έρχονται να καλυφθούν μέσω αναδυόμενων τεχνολογιών που έχουν διαμορφώσει την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση την τελευταία δεκαετία. Μέσω τεχνολογιών που προϋπήρχαν αλλά και νέων, στόχος της βιομηχανίας του μέλλοντος είναι η διασύνδεση όλων των παραγόντων της αλυσίδας παραγωγής, από τον προμηθευτή της πρώτης ύλης μέχρι τον αποδέκτη του τελικού προϊόντος. Κύριο άξονα προς αυτή την κατεύθυνση αποτελεί η ψηφιοποίηση, τόσο της βιομηχανίας όσο και του ίδιου του προϊόντος.

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί εστιάζει στις τεχνολογίες που είτε έχουν ήδη τεθεί σε εφαρμογή σε ναυπηγεία που κατασκευάζουν σκάφη από σύνθετα υλικά είτε πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο κοντινό μέλλον. Οι τεχνολογίες αυτές διαμορφώνουν το Ναυπηγείο 4.0, μία έννοια που απορρέει από την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση. Αρχικά γίνεται μία εισαγωγή στην αυτοματοποίηση, πώς προέκυψε και πώς έχει εξελιχθεί με τα χρόνια, από βιομηχανική σε βιομηχανική επανάσταση έως το σήμερα. Ακολουθεί στο 2ο κεφάλαιο αναφορά στις κύριες τεχνολογίες που συναντώνται στη Βιομηχανία 4.0 (ή αλλιώς τέταρτη βιομηχανική επανάσταση) για να κλείσει το κεφάλαιο με αναφορές σε τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής βιομηχανίας και τέλος της

ναυπηγικής, κάνοντας μια γενική αναφορά σε τεχνολογίες που αυτοματοποιούν την παραγωγή. Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει σε τεχνολογίες που αφορούν τα ναυπηγεία που κατασκευάζουν σκάφη από σύνθετα υλικά και στο τέταρτο γίνεται μία μελέτη (case study) σχετικά με τις τεχνολογίες που θα μπορούσαν να ενταχθούν στο ναυπηγείο της Technohull, εταιρείας που κατασκευάζει φουσκωτά σκάφη (RIBs) στην περιοχή του Λαυρίου. Ακολουθούν συμπεράσματα για όσα μελετήθηκαν καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον ίδιο τομέα.

2 Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή στην Αυτοματοποίηση

2.1.1 Αυτοματοποίηση και Βιομηχανία

Η αυτοματοποίηση αποτελεί μία από τις πιο ενδιαφέρουσες έννοιες στον τομέα της παραγωγής σήμερα. Ως έννοια εμφανίζεται ήδη από τον δέκατο όγδοο αιώνα με την αρχή της Βιομηχανικής Επανάστασης και κύριος στόχος της είναι η αύξηση της οικονομικής ισχύος βιομηχανιών μέσω της ένταξης καινοτομιών στη γραμμή παραγωγής. Τη σημερινή εποχή τα βασικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη, πέρα από το χρόνο και τον όγκο παραγωγής που ουσιαστικά συνεισφέρουν στα οικονομικά μιας εταιρείας, είναι η επαναληψιμότητα, οι συνθήκες εργασίας για τους εργαζομένους, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η προστασία του περιβάλλοντος.

Ο χρόνος, που μεταφράζεται και σε όγκο παραγωγής, αποτελεί το κυριότερο κίνητρο για μία βιομηχανία να εφαρμόσει αλλαγές στην παραγωγή και στη διαχείριση των προϊόντων της. Αν και για κάποιες βιομηχανίες, με πρωτοστάτη την αυτοκινητοβιομηχανία, η επένδυση σε τεχνολογίες αυτοματοποίησης αποτελεί εδώ και καιρό τη μόνη λύση για τη δημιουργία και διατήρηση μιας ανταγωνιστικής επιχείρησης, τα τελευταία χρόνια οι εξελίξεις σε τεχνολογικούς τομείς και κυρίως σε αυτόν των υπολογιστών έχουν καταστήσει την αυτοματοποίηση - πλήρη ή μερική - πιο προσιτή και για άλλου είδους βιομηχανίες, όπως η ναυπηγική.

Δεν αποτελεί, όμως, το μόνο κριτήριο ο χρόνος. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, η ποιότητα του τελικού προϊόντος έχει τον κυρίαρχο ρόλο όσον αφορά στην επιλογή του τρόπου παραγωγής. Προκειμένου, λοιπόν, να αυξηθούν οι ρυθμοί παραγωγής σε μία βιομηχανία τόσο «ευαίσθητη» στην ποιότητα του τελικού προϊόντος, υπήρξε η ανάγκη για επαναληψιμότητα στις διαδικασίες παραγωγής, ώστε να είναι σαφή τα όρια αποκλίσεων που μπορεί να εμφανιστούν και να μην ξεπερνώνται, ανάλογα με τις επιτρεπόμενες ανοχές κάθε φορά. Η ανάγκη για καλύτερη ποιότητα και επαναληψιμότητα έχει περάσει σαν νοοτροπία και σε άλλες βιομηχανίες, βλέποντας τα οφέλη που μπορούν να αποκομίσουν. Στη ναυπηγική, οι εργασίες που χρειάζεται να γίνουν προκειμένου να ολοκληρωθεί η κατασκευή ενός πλοίου μπορεί να είναι χιλιάδες. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι πρέπει να υπάρχει έλεγχος των διαδικασιών που ήρθαν σε πέρας μέσω χειρωνακτικής εργασίας, έχουν οδηγήσει πολλά ναυπηγεία να αυτοματοποιούν σταδιακά πολλά μέρη των διαδικασιών τους. Δύο απλά παραδείγματα σε μεγάλα ναυπηγεία αποτελούν τόσο οι συγκολλήσεις όσο και τα κοψίματα λαμαρινών. Πολλές εφαρμογές που εστιάζουν στην επαναληψιμότητα της παραγωγής σε ναυπηγεία πλαστικών σκαφών αναφέρονται στη συνέχεια.

Σημαντικός παράγοντας δεν παύει να είναι η υγεία του ανθρώπου. Αν και τις τελευταίες δεκαετίες έχει αρχίσει να δίνεται περισσότερη έμφαση σε αυτό το κομμάτι στον εργασιακό χώρο, η τεχνολογία σήμερα μπορεί να επιτρέψει την ελαχιστοποίηση οποιουδήποτε κινδύνου ή σωματικής καταπόνησης ενός εργαζομένου. Με την αυτοματοποίηση της παραγωγής,

πολλές επίπονες και συχνά επικίνδυνες εργασίες καταργούνται. Ειδικότερα στη ναυπηγική, μία βιομηχανία που παραδοσιακά ενέχει πολλούς κινδύνους για έναν εργαζόμενο, η έλευση τεχνολογιών που αυτοματοποιούν κάποιες διεργασίες θα έχει ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα ως προς την ποιότητα στον εργασιακό χώρο.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα, δεδομένης της ενεργειακής κρίσης που συνεπάγεται και αύξηση του κόστους ενέργειας, αποτελεί επίσης έναν καθοριστικό παράγοντα για τις επιλογές αυτοματοποίησης που λαμβάνει ένα ναυπηγείο. Τεχνολογικές λύσεις που επιτρέπουν τη μείωση των ενεργειών που χρειάζονται για την ολοκλήρωση ενός προϊόντος σε συνδυασμό με τη μείωση των προϊόντων που απορρίπτονται λόγω ατελειών, μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση για το ναυπηγείο.

Τέλος, η προστασία του περιβάλλοντος, που αποτελεί πλέον προτεραιότητα για πολλές χώρες, ωθεί άμεσα ή έμμεσα τις αποφάσεις που λαμβάνει ένα ναυπηγείο προς την κατεύθυνση αναβάθμισης της γραμμής παραγωγής του. Πολλές τεχνολογίες, οι οποίες έχουν και οικονομικό συμφέρον για το ναυπηγείο, μειώνουν την ανάγκη για πρώτες ύλες ή για «χαμένα» υλικά κατά τη διάρκεια παραγωγής. Επιπλέον, νομοθετικά πλαίσια που έχουν ισχύ σε τοπικό ή παγκόσμιο επίπεδο (μέσω διεθνών οργανισμών, π.χ. IMO) ωθούν τα ναυπηγεία στην ενσωμάτωση τεχνολογιών και την υιοθέτηση πρακτικών που είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον.

2.1.2 Η εξέλιξη της Βιομηχανίας

Από το 18^ο αιώνα και την πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση έως σήμερα και την τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση ή Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0), έχουν συμβεί ριζικές αλλαγές στις κατασκευαστικές μεθόδους στον τομέα της παραγωγής. Μια σύντομη αναφορά για τα στάδια και τις αλλαγές της κάθε περιόδου, που χαρακτηρίστηκε και ως επανάσταση, γίνεται παρακάτω. Στο Σχήμα 2-1 απεικονίζονται αυτά τα στάδια.

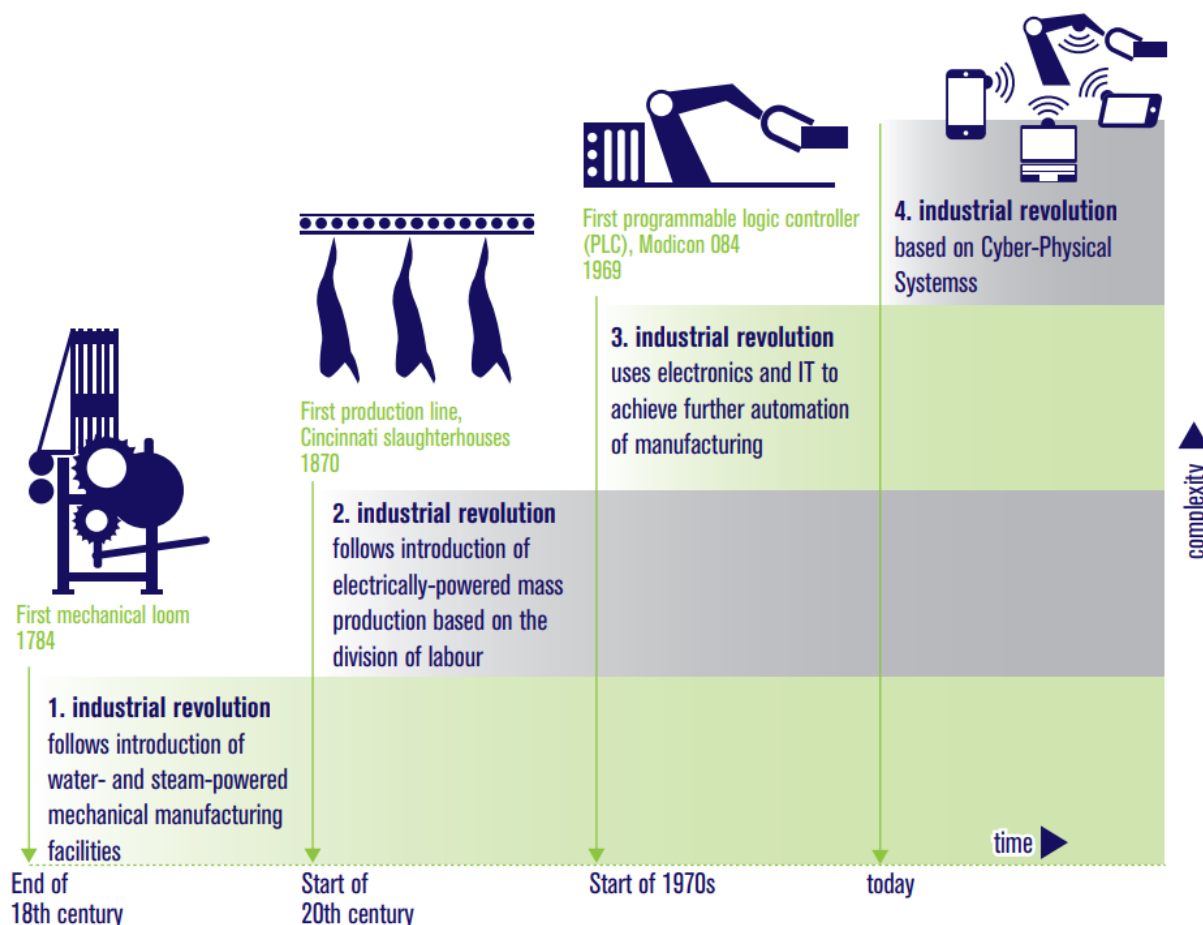
Η πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση, στα τέλη του 18^{ου} αιώνα, αποτέλεσε απόρροια της εμφάνισης μηχανών που εκμεταλλεύτηκαν την ενέργεια του νερού και του ατμού. Με την μαζική εξαγωγή του άνθρακα και την εμφάνιση της ατμομηχανής δημιουργήθηκε για πρώτη φορά η γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου. Ακολούθησε η δημιουργία πολλών μηχανημάτων που βοήθησαν στην επέκταση της βιομηχανικής επανάστασης σε διάφορους τομείς της παραγωγής. Η οικονομία μετατράπηκε σταδιακά από καθαρά αγροτική σε βιομηχανική, όπως παραμένει έως σήμερα.

Με την ανακάλυψη του ηλεκτρισμού και τη χρήση του πετρελαίου έκανε την εμφάνισή της η δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Καταλύτης αυτής της περιόδου αποτέλεσε η μηχανή εσωτερικής καύσης, που οδήγησε στην εμφάνιση πολλών άλλων εφευρέσεων, όπως το αμάξι και το αεροπλάνο. Αυτά σε συνδυασμό με την εμφάνιση των τηλεπικοινωνιών, ώθησαν τη βιομηχανία σε ραγδαία ανάπτυξη. Αυτήν την περίοδο πολλά νέα προϊόντα, μηχανήματα και εφευρέσεις άρχισαν να παράγονται σε μαζικές ποσότητες.

Η τρίτη Βιομηχανική Επανάσταση σηματοδοτεί και την αρχή της στροφής των εργαζομένων εντός της βιομηχανίας από χειρωνακτικές εργασίες σε εργασίες που αφορούν τη

διαχείριση δεδομένων και λήψης αποφάσεων. Η μεταβολή αυτή ξεκινά με την εξέλιξη του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (PC), η οποία ενισχύει την ψηφιοποίηση των εργασιών με την εμφάνιση των Τεχνολογιών Πληροφορίας (Information Technologies – IT) και ταυτόχρονα η περαιτέρω αυτοματοποίηση της γραμμής παραγωγής με τη χρήση ρομπότ. Η τάση για ολοένα και μικρότερες υπολογιστικές μονάδες με μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ επιτρέπει τη διασύνδεση, μέσω ασύρματων δικτύων και του Διαδικτύου, του πραγματικού με τον ψηφιακό κόσμο, κάτι που μας οδηγεί στη σημερινή εποχή σταδιακά.

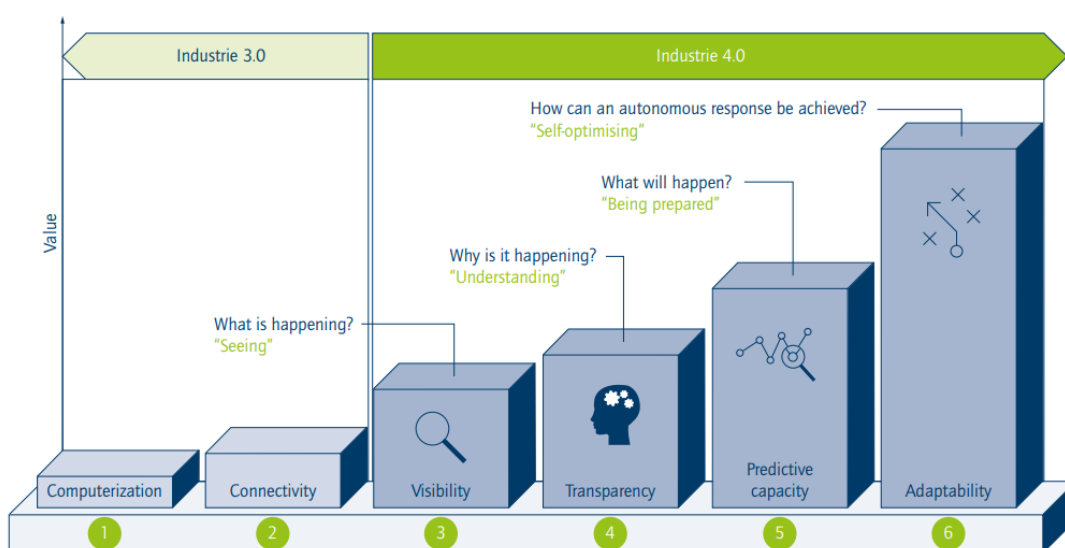
Σήμερα η βιομηχανία, έχοντας στη διάθεσή της τεράστια υπολογιστική ισχύ με αναρίθμητες ικανότητες, μεγάλη διασυνδεσιμότητα μεταξύ των υπολογιστών και των μηχανημάτων και μια πληθώρα από δεδομένα, εισάγεται πλέον στην τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση. Η αυτοματοποίηση πλέον εξαπλώνεται σε όλους τους τομείς της βιομηχανίας, από τη διαχείριση των πρώτων υλών και την κατασκευή έως την λήψη αποφάσεων. Η διαδικασία παραγωγής, το προϊόν κι ο χώρος εργασίας ψηφιοποιούνται και η Βιομηχανία 4.0 μετατρέπει τα εργοστάσια σε «Έξυπνα Εργοστάσια» (Smart Factories). Τα προϊόντα των έξυπνων εργοστασίων είναι προσαρμοσμένα στις ανάγκες των καταναλωτών, αναγνωρίσιμα και είναι γνωστή η τρέχουσα κατάστασή τους. Ανώτερος σκοπός των Έξυπνων Εργοστασίων είναι η δημιουργία των έξυπνων προϊόντων (smart products). Τα προϊόντα αυτά δίνουν τη δυνατότητα στον καταναλωτή να τα διαμορφώσει σύμφωνα με τη θέλησή του πριν αλλά και κατά τη διάρκεια παρασκευής τους (Wan & Zhou 2015).



Σχήμα 2-1: Βιομηχανικές Επανάστασεις (Schuh et al 2020)

2.2 Βιομηχανία 4.0 / Industry 4.0

Η 4^η Βιομηχανική Επανάσταση, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εκμεταλλεύεται τεχνολογίες που ενισχύουν τη διασυνδεσιμότητα και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών. Με τη χρήση αυτών των τεχνολογιών, για τις οποίες θα γίνει αναφορά παρακάτω, τα σύνορα μεταξύ ψηφιακού και πραγματικού κόσμου αρχίζουν να εξαλείφονται. Βασικοί στόχοι της βιομηχανίας του μέλλοντος είναι η πλήρης ψηφιοποίηση και ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο, από το εργοστάσιο και το εργατικό δυναμικό έως το τελικό προϊόν, στη συνέχεια η πρόβλεψη και εν τέλει η αυτοματοποιημένη αντίδραση στις όποιες αλλαγές ενδέχεται να προκύψουν στην πορεία. Αυτήν ακριβώς τη λογική αναπαριστά το παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2-2), το οποίο αποτελεί μέρος έρευνας της ακαδημίας Acatech στη Γερμανία.



Σχήμα 2-2: Στάδια 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης (Schuh et al 2020)

Το εργοστάσιο γίνεται «έξυπνο» και αποκτά «συνείδηση» σε τέτοιο βαθμό που δύναται να προβλέψει και να συντηρήσει τον εξοπλισμό και τα μηχανήματα από τα οποία απαρτίζεται και να ελέγχει σε πραγματικό χρόνο τη διαδικασία παραγωγής (Qin et al 2016). Διαδικασίες σχεδιασμού προϊόντος, οργάνωσης της παραγωγής, διαμόρφωσης της κατασκευαστικής μηχανικής, δηλαδή του τρόπου κατασκευής του τελικού προϊόντος, παραγωγής και επισκευής, θα μπορούν πλέον να προσομοιωθούν και να συνδεθούν μεταξύ τους, να δέχονται εντολές από ένα αποκεντρωμένο σύστημα και να ελέγχονται ανεξάρτητα η μία από τις υπόλοιπες, προσδίδοντας έτσι πλήρη κατασκευαστική ελευθερία στον κατασκευαστή, κάτι το οποίο με τη σειρά του επιτρέπει την εξατομίκευση των προϊόντων στις ανάγκες και τις απαιτήσεις του τελικού αποδέκτη. Τα παραπάνω ορίζουν τη μορφή που ήδη έχουν αρχίσει να παίρνουν κάποια εργοστάσια και τείνουν να μετατραπούν σε Έξυπνα Εργοστάσια.

Καινοτόμες τεχνολογίες αποτελούν τη βάση για τη βιομηχανία του μέλλοντος. Η πλήρης ψηφιοποίηση και αυτοματοποίηση έχει ήδη ξεκινήσει να επιτυγχάνεται μέσω μιας σειράς

τεχνολογιών που αναφέρονται παρακάτω. Οι ονομασίες των τεχνολογιών αναγράφονται στα ελληνικά αλλά και στα αγγλικά, αφού λόγω της φύσης του θέματος ο μεγαλύτερος όγκος δημοσιεύσεων σχετικά με τη Βιομηχανία 4.0 είναι στα αγγλικά. Οι κύριες τεχνολογίες είναι οι εξής:

1. Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (Cyber – Physical Systems)
2. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT)
3. Ρομπότ (Robots)
4. Εικονική και Επαυξημένη Πραγματικότητα (Virtual and Augmented Reality)
5. 3D εκτύπωση (3D Printing) ή αλλιώς Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing)
6. Αισθητήρες (Sensors)
7. Μοντελοποίηση / Προσομοίωση (Modelling / Simulation) και Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)
8. Τεχνολογίες Συλλογής και Επεξεργασίας Δεδομένων (Big Data / Data Processing)
9. Τεχνολογίες αναβάθμισης της Εφοδιαστικής Αλυσίδας (Advancement in Logistics)
10. Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing)
11. Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) και Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)

Προκειμένου ο αναγνώστης να είναι εξοικειωμένος με τις τεχνολογίες που μόλις αναφέρθηκαν, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε καθεμία από αυτές και στο πώς συμβάλλουν στη διαμόρφωση της Βιομηχανίας 4.0.

2.2.1 Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (Cyber – Physical Systems)

Τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems) είναι συστήματα συνεργατικών υπολογιστικών στοιχείων που ελέγχουν φυσικά συστήματα. Αποτελούν συνδυασμό μηχανών, προϊόντων, αντικειμένων, συστημάτων αποθήκευσης και εγκαταστάσεων παραγωγής που είναι σε θέση να ανταλλάσσουν αυτόνομα πληροφορίες, να επενεργούν και να ελέγχονται μεταξύ τους. Πρόκειται ουσιαστικά για τον συνδυασμό τεχνολογίας πληροφοριών (Information Technology - IT) και επιχειρησιακής τεχνολογίας (Operational Technology - OT). Τα συστήματα αυτά καλύπτουν όλο τον κύκλο παραγωγής και σε κάθε στάδιο της συλλέγουν, αποθηκεύουν και αξιολογούν τα παραγόμενα δεδομένα προκειμένου να τα αναλύσουν και να τα μοντελοποιήσουν (Φιτσιλής 2022).

2.2.2 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων περιγράφει το δίκτυο φυσικών αντικειμένων τα οποία έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες, λογισμικά και άλλες τεχνολογίες με σκοπό τη διασύνδεση και ανταλλαγή δεδομένων με άλλες συσκευές και συστήματα μέσω του διαδικτύου.

Ως έννοια είναι εφάμιλλη με τα Κυβερνο-Φυσικά συστήματα, με τη διαφορά ότι τα Κυβερνο-Φυσικά συστήματα εστιάζουν στο συνδυασμό των υπολογιστικών στοιχείων και στοιχείων ελέγχου με τα φυσικά συστήματα, ενώ το Διαδίκτυο των Πραγμάτων εστιάζει στην

τεχνολογία μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η διασύνδεση των προαναφερθέντων συστημάτων. (Vanderbilt Engineering 2022)

2.2.3 Ρομπότ (Robots)

Τα ρομπότ (Σχήμα 2-3) είναι γνωστά ως φυσικά συστήματα ήδη από την 3^η Βιομηχανική Επανάσταση. Μπορούν να έχουν πολλές διαφορετικές μορφές και σκοπός τους είναι να φέρουν σε πέρας εργασίες που είναι είτε δύσκολες είτε επικίνδυνες. Επίσης, μπορούν να δρουν γρηγορότερα σε σχέση με έναν άνθρωπο και χωρίς να υπάρχει παύση της εργασίας τους, κάτι που τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά, ειδικά σε επαναλαμβανόμενες διεργασίες. Οι δυνατότητές τους, όμως, ήταν για πολλά χρόνια αρκετά περιορισμένες και η ενσωμάτωσή τους εντός ενός εργοστασίου αρκετά περίπλοκη. Προκειμένου μια γραμμή παραγωγής να αυτοματοποιηθεί πλήρως, είναι αναγκαία η ύπαρξή τους. Μεγάλες εταιρείες, κυρίως στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική βιομηχανία, εκμεταλλεύτηκαν ήδη από την 3^η Βιομηχανική Επανάσταση τα πλεονεκτήματα χρήσης ρομπότ και αυτοματοποίησαν πλήρως κομμάτια της παραγωγής τους. Τα μεγάλα αρχικά κόστη επένδυσης και η απαίτηση για τεχνογνωσία στο προσωπικό, όμως, αποτελούσαν και ακόμη αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για τις περισσότερες βιομηχανίες μικρού και μεσαίου μεγέθους.



Σχήμα 2-3: Ρομποτικός βραχίονας (kuka.com)







Οι τεχνολογίες που έχουν κάνει την εμφάνισή τους τα τελευταία χρόνια, με την είσοδο στην 4^η Βιομηχανική Επανάσταση, επιτρέπουν την αξιοποίηση των ρομπότ από πολύ μεγαλύτερη μερίδα του βιομηχανικού τομέα και όχι μόνο. Τα ρομπότ γίνονται πιο απλά στον χειρισμό τους και αυτό επιτρέπει τη λιγότερη εξειδίκευση του χρήστη πάνω σε αυτά. Επίσης, όπως με κάθε άλλη τεχνολογία που αναπτύσσεται με γρήγορους ρυθμούς, έτσι και τα ρομπότ γίνονται πιο προσιτά οικονομικά. Στην Αμερική αυτή τη στιγμή η ενοικίαση εργάτη ρομπότ είναι πιο φθηνή από τον ελάχιστο μισθό ενός εργαζομένου (Van Marle 2022).

Μια ακόμη τεχνολογία, που αποτελεί εξέλιξη κατά κάποιο τρόπο των ρομπότ, είναι τα συνεργατικά ρομπότ ή όπως αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία Cobots (Collaborative Robots). Πριν την εμφάνιση των Cobots, δεν ήταν δυνατή η συνεργασία ανθρώπου και ρομπότ στον ίδιο χώρο για λόγους ασφαλείας. Πλέον με τη συνδρομή και άλλων τεχνολογιών, όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση, τεχνολογίες για τις οποίες θα γίνει αναφορά παρακάτω, τα Cobots μπορούν να εκτελούν εργασίες που δεν είναι επαναλαμβανόμενες και να προσαρμόζονται ανάλογα με την εκάστοτε περίπτωση. Γίνονται δηλαδή σταδιακά «έξυπνα», ακολουθώντας τη φιλοσοφία των «Έξυπνων Εργοστασίων».

2.2.4 Εικονική και Επαυξημένη πραγματικότητα (Virtual and Augmented Reality)

Η Εικονική Πραγματικότητα είναι η χρήση τεχνολογίας υπολογιστών για τη δημιουργία ενός προσομοιωμένου περιβάλλοντος. Οι χρήστες «μπαίνουν» σε ένα εικονικό περιβάλλον και μπορούν να αλληλεπιδρούν με τρισδιάστατους κόσμους, αντί να παρακολουθούν μια διδιάστατη αναπαράσταση σε μια οθόνη.

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα είναι μια τεχνολογία που εισάγει ψηφιακά αντικείμενα στον πραγματικό κόσμο σε πραγματικό χρόνο. Πρόκειται για ένα είδος διαδραστικού περιβάλλοντος που βασίζεται στην πραγματικότητα και χρησιμοποιεί τις δυνατότητες της οθόνης, του ήχου, του κειμένου και των εφέ που παράγονται από υπολογιστή, για να βελτιώσει την πραγματική εμπειρία του χρήστη (Ψηφιακός Μετασχηματισμός 2022). Οι τεχνολογίες AR που βρίσκουν εφαρμογή στον κλάδο της βιομηχανίας ονομάζονται και Industrial Augmented Reality (IAR) και στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι διάφοροι τομείς, εντός της βιομηχανίας, στους οποίους μπορεί να βρει εφαρμογή. Στο Σχήμα 2-4 φαίνονται διάφορες χρήσεις της τεχνολογίας AR.

 SERVICE	 MANUFACTURING	 SALES & MARKETING	 DESIGN	 OPERATIONS	 TRAINING
Manuals & instructions [45, 48]	Quality assurance [63,64,65,69]	Product displays & demos [55,56]	Collaborative engineering [43]	Heads-up displays [63]	Job-specific training [50,52]
Service inspections & verifications [46,59]	Maintenance work instructions [69,70]	Logistics, retail space optimization [74,75]	Inspection of digital prototypes [44]	Digital product controls [49]	Safety & security training [52,53]
Remote expert guidance [50]	Performance dashboards [66]	Augmented brand experience [54,58]	Augmented interface [63,68]	Augmented operator manuals [45,70]	Expert coaching
Improved service and self-service [42]	Assembly work instructions [50,67,69,71-73]	Augmented advertisement [57,58,61,62]	Error diagnosis [63]	Augmented interface [47,68]	

Σχήμα 2-4: Τομείς στους οποίους μπορεί η τεχνολογία AR να βρει εφαρμογή (Fraga-Lamas et al 2018)

Η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών έγκειται στο γεγονός ότι στην εικονική πραγματικότητα ο χρήστης βρίσκεται εντός ενός εικονικού περιβάλλοντος, ενώ στην Επαυξημένη Πραγματικότητα ο χρήστης χρησιμοποιεί ένα υφιστάμενο φυσικό περιβάλλον στο οποίο υπερθέτει εικόνες και πληροφορίες.

Οι δύο αυτές τεχνολογίες, που στη βάση τους έχουν πολλά κοινά στοιχεία, έχουν ήδη αρχίσει να βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Μερικά παραδείγματα που

αφορούν στον κλάδο της ναυπηγικής και έχουν ήδη εφαρμοστεί ή μπορεί να εφαρμοστούν στο κοντινό μέλλον είναι τα εξής:

- Οπτική αναπαράσταση του μηχανοστασίου ενός πλοίου. Το άτομο, φορώντας μια συσκευή προβολής τρισδιάστατης εικόνας, μπορεί να περιηγηθεί εντός του μηχανοστασίου ενώ βρίσκεται σε άλλη τοποθεσία και να αντλήσει πληροφορίες για τα εξαρτήματα μπορούν να εμφανίζονται κατά την περιήγησή του.
- Μηχανικός εντός του μηχανοστασίου ενός πλοίου φοράει γυαλιά, τα οποία υπερθέτουν πληροφορίες χρήσιμες για τον χρήστη. Με αυτό τον τρόπο ο μηχανικός μπορεί σε πραγματικό χρόνο να έχει πληροφορίες για ένα μηχάνημα που βλέπει μπροστά του.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε πιο εξειδικευμένα παραδείγματα που αφορούν τον τομέα των πλαστικών σκαφών.

2.2.5 3D εκτύπωση (3D Printing) ή Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D εκτύπωση) γνωστή και ως προσθετική κατασκευή, αποτελεί μια τεχνολογία που αναπτύσσεται ραγδαία και έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον κατασκευαστικό τομέα. Τα τελευταία χρόνια εκτυπωτές (Σχήμα 2-5) που κατασκευάζουν ή αλλιώς εκτυπώνουν προϊόντα έχουν γίνει τόσο διαδεδομένοι και προσιτοί που είναι πλέον δυνατόν κάποιος να έχει και στον ιδιωτικό του χώρο.

Η διαδικασία της προσθετικής κατασκευής είναι η πρόσθεση υλικού, το οποίο προηγουμένως ήταν σε χύδην μορφή και υπό κατάλληλη επεξεργασία προστίθεται σταδιακά στις 3 διαστάσεις προκειμένου να διαμορφώσει το τελικό προϊόν. Συνήθως το ένα στρώμα υλικού εναποτίθεται πάνω στο άλλο.



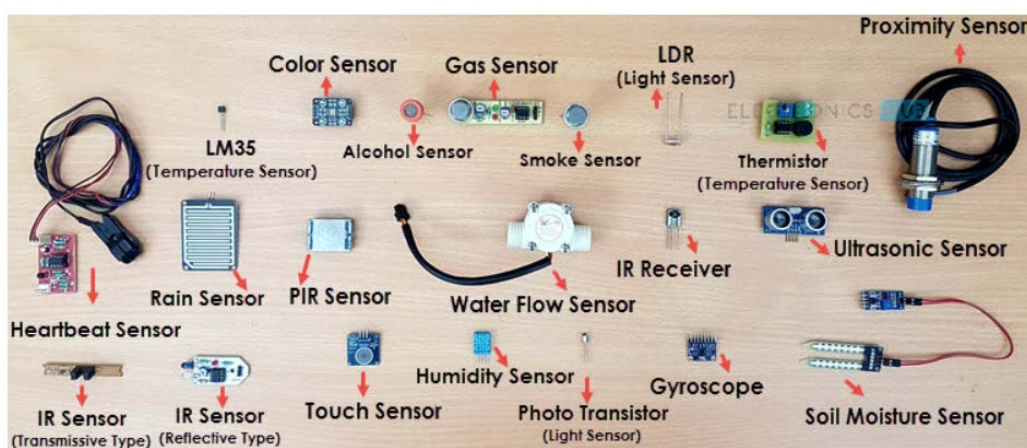
Σχήμα 2-5: 3D εκτυπωτής (3dprintingmedia.network)

2.2.6 Αισθητήρες (Sensors)

Οι αισθητήρες είναι συσκευές που ανιχνεύουν ένα φυσικό μέγεθος και παράγουν από αυτό μία μετρήσιμη έξοδο/ηλεκτρικό σήμα. Προκειμένου να αυτοματοποιηθεί πλήρως ένα εργοστάσιο, θα πρέπει να υπάρχει διαρκώς ροή πληροφορίας από τον χώρο εργασίας προς τους υπολογιστές και τα άτομα που διαχειρίζονται τη γραμμή παραγωγής. Αυτήν την

πληροφορία μπορεί να τη μετρήσει ένας αισθητήρας. Για αυτό το λόγο η χρήση αισθητήρων βρίσκει μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών εντός ενός σύγχρονου εργοστασίου.

Ως συσκευές, οι αισθητήρες έχουν ήδη βρει πολλές εφαρμογές εδώ και δεκαετίες. Με τις συνεχείς εξελίξεις στην τεχνολογία και με την ανάγκη για περαιτέρω αυτοματοποίηση της παραγωγής, οι τύποι και οι εφαρμογές των αισθητήρων διαρκώς αυξάνονται. Κάποια απλά παραδείγματα χρήσης αισθητήρων είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας εντός ενός χώρου εργοστασίου με ευαισθησία στις διακυμάνσεις, καθώς και ο εντοπισμός της απόκλισης μιας κατασκευής από τις επιθυμητές διαστάσεις. Στο παρακάτω Σχήμα 2-6 απεικονίζονται διάφοροι τύποι αισθητήρων.



Σχήμα 2-6: Διάφοροι αισθητήρες (electronicshub.org)

2.2.7 Μοντελοποίηση / Προσομοίωση (Modelling / Simulation) – Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)

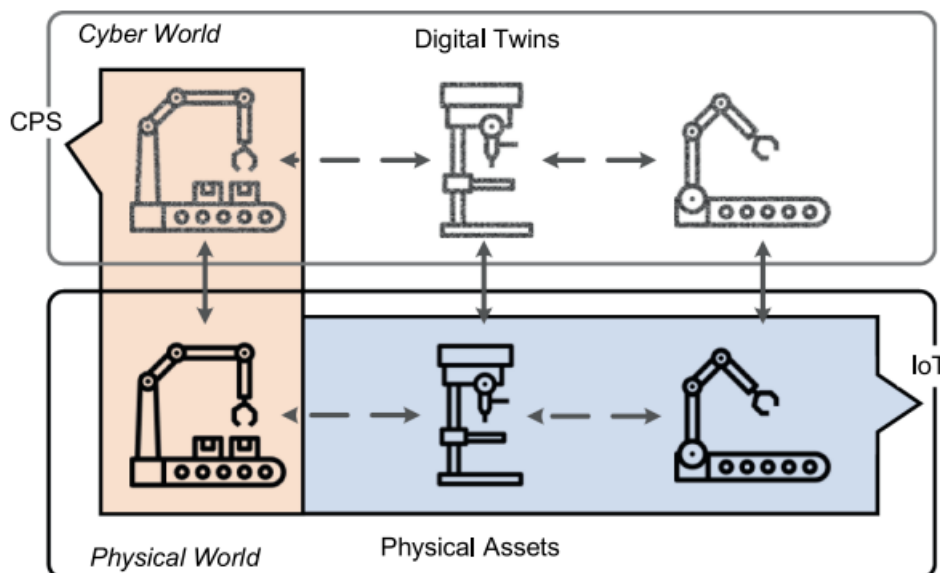
Με τη δημιουργία προγραμμάτων CAD/CAM (Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing) κατέστη δυνατή τόσο η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου που να αναπαριστά το προϊόν προς παραγωγή όσο και η προσομοίωση της λειτουργίας αυτού σε πραγματικές συνθήκες. Μοντελοποίηση και προσομοίωση είναι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται όχι μόνο για προϊόντα και φυσικά αντικείμενα, αλλά και για διεργασίες.

Ψηφιακό Δίδυμο (DT) είναι η ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου, μίας διαδικασίας ή υπηρεσίας. Είναι στην ουσία ένα υπολογιστικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιεί δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο για τη δημιουργία προσομοιώσεων, οι οποίες μπορούν να προβλέψουν την απόδοση ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας.

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων επιτρέπει μεταξύ άλλων την προσομοίωση, την παρακολούθηση, τον έλεγχο, την διενέργεια διαγνωστικών και την πρόβλεψη. Η χρήση των DT αποτελεί αρωγός προς την «έξυπνη κατασκευή» (smart manufacturing).

Έξυπνη κατασκευή είναι η εντατική χρήση «κατασκευαστικής νοημοσύνης» σε ολόκληρη τη γραμμή παραγωγής και την εφοδιαστική αλυσίδα. Περιλαμβάνει την κατανόηση, τη λογική προσέγγιση, τον σχεδιασμό και τη διαχείριση των κατασκευαστικών διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο μέσω της χρήσης προηγμένων αισθητήρων, ανάλυσης δεδομένων, δημιουργίας ψηφιακού μοντέλου και προσομοιώσεων. (Lu et al. 2020)

Το παρακάτω Σχήμα 2-7 δείχνει τις διαφορές και τη συσχέτιση μεταξύ των Ψηφιακών Διδύμων, του Διαδικτύου των Πραγμάτων και των Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων. Το Κυβερνο-Φυσικό Σύστημα αποτελείται από το Ψηφιακό Δίδυμο και το φυσικό αντικείμενο, ενώ το Ψηφιακό Δίδυμο αποτελείται μόνο από το ψηφιακό μοντέλο, αλλά δεν υφίσταται χωρίς το φυσικό αντικείμενο που αναπαριστά. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων από την άλλη αναφέρεται στη συνδεσιμότητα μεταξύ των φυσικών αντικειμένων.



Σχήμα 2-7: IoT,CPS & Digital Twins (Lu et al. 2020)

Για την κατασκευή ενός Ψηφιακού Διδύμου (DT) χρειάζονται 3 στοιχεία:

- Ένα μοντέλο πληροφόρησης (information model), το οποίο αποσπά τις προδιαγραφές και τα χαρακτηριστικά ενός φυσικού αντικειμένου.
- Έναν μηχανισμό επικοινωνίας, ο οποίος μεταφέρει αμφίδρομα δεδομένα μεταξύ του DT και του φυσικού αντικειμένου που αναπαριστά.
- Ένα μοντέλο επεξεργασίας δεδομένων, το οποίο μπορεί να εξάγει πληροφορίες από ετερογενείς πηγές δεδομένων και να κατασκευάζει την αναπαράσταση του φυσικού αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο.

Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί με τον συνδυασμό διαφόρων τεχνολογιών, όπως Big Data Processing (Διαχείριση Μεγάλου Όγκου Δεδομένων): υψηλών αποδόσεων επεξεργασία δεδομένων αποτελεί το κλειδί για τη γεφύρωση μεταξύ της ροής ετερογενών δεδομένων και του ψηφιακού διδύμου και τη χρήση τεχνολογίας υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Για αυτές τις τεχνολογίες θα γίνει αναφορά παρακάτω.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (DTs) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα εξής (στον τομέα των κατασκευών):

Παραγωγικό περιουσιακό στοιχείο (manufacturing asset)

Καθίσταται πιο σαφής η απόδοση του στοιχείου καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας του σε πραγματικό χρόνο. Η διαδικασία της παραγωγής μπορεί να γίνει πιο ελαστική και ευέλικτη, ειδικότερα τώρα που υφίσταται η μαζική εξατομίκευση των αντικειμένων.

Ανθρώπους

Η δημιουργία ενός DT που αναπαριστά έναν εργάτη μπορεί να βελτιώσει τις συνθήκες εργασίας. Προσωπικές πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς αυτήν την κατεύθυνση είναι το βάρος και η κατάσταση της υγείας του εκάστοτε ανθρώπου. Επίσης, οι εργάτες μπορούν να αναβαθμίσουν τις δεξιότητες τους μέσω ρεαλιστικών προγραμμάτων εκπαίδευσης που αναμειγνύουν τον πραγματικό χώρο εργασίας με υποθετικά σενάρια ή μέσω προσωποποιημένων ψηφιακών προγραμμάτων εκπαίδευσης. Τα παραπάνω παραδείγματα μπορούν να ανεβάσουν εξαιρετικά την αποδοτικότητα και τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.

Ολόκληρα εργοστάσια

Τα DTs μπορούν να αναπαραστήσουν και ολόκληρα εργοστάσια, δημιουργώντας μια ζωντανή αναπαράσταση του εργασιακού περιβάλλοντος. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός εργασιακού περιβάλλοντος εντός του εργοστασίου που αυτο-οργανώνεται και έχει πλήρη επιχειρησιακή ορατότητα και ευελιξία. Η διασύνδεση και η παρακολούθηση δεδομένων σε ολόκληρη την παραγωγική διαδικασία επιτρέπουν στις διαδικασίες του εργοστασίου να μετατραπούν σε πρακτικές που βασίζονται σε δεδομένα. Αυτό δίνει τη δυνατότητα για ιχνηλάτηση αστοχιών, ανάλυση της παραγωγικής διαδικασίας και εύρεση σημείων συμφόρησης της καθώς και για πρόβλεψη μελλοντικών αναγκών σε πρώτες ύλες.

Δίκτυα παραγωγής (production networks)

Διασύνδεση εταιρειών που συνεργάζονται στον ψηφιακό χώρο. Κάθε στοιχείο μιας επιχείρησης μπορεί να αναπαρασταθεί ψηφιακά μέσω των DTs. Η σύνδεση των διαφόρων DTs ανάμεσα στις εταιρείες μπορεί να τους επιτρέψει τη δημιουργία ψηφιακών δικτύων παραγωγής.

Κάποιες εφαρμογές των DTs:

- Ψηφιοποίηση της διαδικασίας συναρμολόγησης με τη χρήση τεχνολογιών, όπως τεχνητή νοημοσύνη (AI), προσομοίωσης (simulation) και μεγάλων δεδομένων (industrial big data). Φυσικός χώρος συναρμολόγησης – Ψηφιακός χώρος συναρμολόγησης – μοντέλο DT. Η τεχνολογία ψηφιακής συναρμολόγησης μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα της παραγωγής και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.
- Point cloud data (νέφος σημείων) από laser scanner υψηλής ακρίβειας
Μπορεί να συγκριθεί με θεωρητικό μοντέλο (3D μοντέλο) και να φανούν οι αποκλίσεις.

2.2.8 Τεχνολογίες Συλλογής και Επεξεργασίας Δεδομένων (*Big Data / Data Processing*)

Η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων θα αποτελέσει κύριο μηχανισμό λειτουργίας του εργοστασίου του μέλλοντος. Τα ψηφιακά δίδυμα, όπως και άλλες νέες τεχνολογίες, βασίζονται στην πρόοδο της τεχνολογίας δεδομένων. Κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων (*Big Data Analysis*) που χρήζουν προσοχής είναι:

- Ανάλυση και συσχέτιση χαρακτηριστικών δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο.
- Επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων με χαμηλή καθυστέρηση (*cloud computing*). Αυτό αποδεικνύεται κρίσιμο για πολλές εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα.
- Υψηλής ποιότητας δεδομένα. Αυτό σημαίνει ότι πέρα από τον όγκο δεδομένων, πρέπει να δοθεί έμφαση και στην ποιότητά τους προκειμένου να χαρακτηρίζουν πλήρως ένα σύστημα ή μια διαδικασία. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να φτιαχτούν μοντέλα ικανά να αξιολογούν και να «ξεσκαρτάρουν» τις άχρηστες πληροφορίες. Στη βιβλιογραφία γίνεται αναφορά στον όρο *sensor fusion* (Galar & Kumar 2017). Ο συγκεκριμένος όρος αφορά τη συσχέτιση δεδομένων από διάφορες πηγές (αισθητήρες) προκειμένου να εξαλειφθεί ο «θόρυβος» και να βελτιωθεί η ποιότητα της πληροφορίας που στη συνέχεια θα τροφοδοτηθεί για ανάλυση σε κάποιο σύστημα.

2.2.9 Τεχνολογίες αναβάθμισης της Εφοδιαστικής Αλυσίδας (*Logistics*)

Εφοδιαστική (και σε ελληνικές εταιρείες αναφέρεται ως *Logistics*) είναι η διαδικασία σχεδιασμού και εκτέλεσης της μεταφοράς αγαθών από τον αρχικό στον τελικό προορισμό με αποδοτικό τρόπο.

Η εφοδιαστική αλυσίδα εντός ενός εργοστασίου αποτελείται από δύο υποκατηγορίες. Την εισερχόμενη (*inbound*) και την εξερχόμενη (*outbound*). Η εισερχόμενη αναφέρεται σε όλες τις διαδικασίες συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης και μεταφοράς των εισερχόμενων υλικών, των υλικών δηλαδή που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των προϊόντων του εκάστοτε εργοστασίου και η εξερχόμενη αναφέρεται στη συλλογή, συντήρηση και παράδοση των τελικών προϊόντων στον πελάτη.

Οι τεχνολογίες στις οποίες θα γίνει αναφορά παρακάτω αφορούν κυρίως την εισερχόμενη εφοδιαστική και πώς μπορεί ένα εργοστάσιο να διαχειριστεί με αυτόματες διαδικασίες τα υλικά της. Κύριο πρόβλημα ενός εργοστασίου είναι η καταγραφή και η ταυτοποίηση των υλικών που διαχειρίζεται, οπότε συστήματα που καλύπτουν αυτήν την ανάγκη βρίσκουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές σε εργοστάσια που αποβλέπουν στην αυτοματοποίηση αυτών των ενεργειών.

Τα συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προς αυτήν την κατεύθυνση είναι Αυτόματης Καταγραφής και Ταυτοποίησης (Auto-ID systems) κάποια εκ των οποίων είναι τα εξής:

- RFID technology (Radio Frequency Identification)
- Dot-peening (DPM: Direct Part Marking)
- 1D or 2D codes (barcodes, QR codes)

2.2.10 Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing)

Το υπολογιστικό νέφος είναι η διάθεση υπολογιστικών πόρων μέσω διαδικτύου, κυρίως για αποθήκευση δεδομένων (cloud storage) και υπολογιστική ισχύ, από κεντρικά συστήματα που βρίσκονται μακριά από τον τελικό χρήστη. Αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία παροχής υπολογιστικών πόρων (Ray 2018).

Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, το σύγχρονο εργοστάσιο δεν χρειάζεται να επενδύει σε χώρο και υλικοτεχνικό εξοπλισμό για όλες τις υπολογιστικές του ανάγκες. Καθίσταται έτσι πιο ανεξάρτητο από τους εγκατεστημένους υπολογιστικούς του πόρους και ταυτόχρονα έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί αντίγραφα ασφαλείας.

Το κυριότερο ζήτημα του «έξυπνου εργοστασίου» είναι ότι θα έχει να διαχειρίζεται ένα τεράστιο όγκο δεδομένων καθημερινά. Αυτό σημαίνει ότι θα χρειάζεται τόσο αποθηκευτικούς πόρους όσο και πόρους που θα διαχειρίζονται αυτά τα δεδομένα. Αυτό έρχεται να καλύψει η τεχνολογία του υπολογιστικού νέφους και οι εταιρίες που παρέχουν τέτοιου είδους υπηρεσίες.

2.2.11 Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence) και Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)

Η τεχνητή νοημοσύνη είναι νοημοσύνη που επιδεικνύεται από μηχανές. Αν και αρχικά οριζόταν ως η επίδειξη γνωστικών δεξιοτήτων αντίστοιχων με του ανθρώπου, όπως η μάθηση και η λύση προβλημάτων, πλέον έχει απορριφθεί από τους περισσότερους ερευνητές πάνω σε αυτόν τον τομέα και ορίζεται ως η επίδειξη λογικής και οι ενέργειες με όρους λογικής, χωρίς όμως να οριοθετείται ο τρόπος που επιτυγχάνεται η νοημοσύνη (Russell et al 2022).

Οι εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης ουσιαστικά είναι απεριόριστες. Ήδη την τελευταία δεκαετία η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας έχει οδηγήσει σε πληθώρα εφαρμογών που επηρεάζουν καθημερινά τη ζωή του ανθρώπου. Από παροχή συστάσεων σε πλατφόρμες στο Διαδίκτυο, όπως παρακολούθηση προτεινόμενων βίντεο με βάση το ιστορικό προβολής, έως τηλεφωνητές που χρησιμοποιούν τεχνολογία AI προκειμένου να απαντήσουν στον πελάτη.

Όλες σχεδόν οι διαδικασίες, προκειμένου να αυτοματοποιηθούν, έχουν ή θα χρησιμοποιήσουν μία μορφή τεχνητής νοημοσύνης. Εδώ εντοπίζεται και ένα θέμα αναγνωρισιμότητας της χρήσης τεχνητής νοημοσύνης που είναι γνωστό και ως φαινόμενο τεχνητής νοημοσύνης (AI effect) (McCorduck 2004). Σύμφωνα με αυτό, τεχνολογίες που

κάποτε υπολογίζονταν ως κομμάτι της τεχνητής νοημοσύνης, πλέον έχουν γίνει τόσο κοινότυπες που έχουν αφαιρεθεί από αυτήν την κατηγοριοποίηση. Παράδειγμα αποτελεί η οπτική αναγνώριση χαρακτήρων. Αυτό υποδηλώνει ότι και άλλες τεχνολογίες που θα αναφερθούν παρακάτω και εκμεταλλεύονται τη χρήση νοημοσύνης, μπορεί να μην κατατάσσονται στην κατηγορία ΑΙ ή τουλάχιστον εκ πρώτης όψεως.

Η μηχανική μάθηση, αν και συχνά συγχέεται με την τεχνητή νοημοσύνη, αποτελεί υποκατηγορία της. Με τον όρο μηχανική μάθηση ορίζεται ο σχεδιασμός αλγορίθμων που μπορούν αυτόματα να αντλήσουν πληροφορίες από δεδομένα (Deisenroth et al 2021). Οι τρεις βασικές έννοιες που απαρτίζουν τη μηχανική μάθηση είναι τα δεδομένα, το μοντέλο και η μάθηση. Στόχος της μηχανικής μάθησης είναι η δημιουργία ενός μοντέλου ικανού να αντλήσει χρήσιμες πληροφορίες από μια σειρά δεδομένων, χωρίς να έχει κάποια εξειδίκευση πάνω στον συγκεκριμένο τομέα.

Στα 3 επόμενα υποκεφάλαια, 2.3-2.5, που ακολουθούν γίνεται αναφορά σε τεχνολογίες που έχουν ήδη βρει εφαρμογή στους κλάδους της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής και της ναυπηγικής (αναφορά κυρίως σε μεταλλικά σκάφη) και θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε ναυπηγείο που κατασκευάζει σκάφη από σύνθετα υλικά.

2.3 Αυτοματοποίηση στην αυτοκινητοβιομηχανία

Ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας αποτελεί έναν από τους πρώτους τομείς της βιομηχανίας που εκμεταλλεύτηκε τεχνολογίες αυτοματοποίησης και ήδη από την 3^η βιομηχανική επανάσταση, με την εμφάνιση των PLC (Programmable Logic Controller) και την ανάπτυξη της τεχνολογίας γύρω από τα ρομπότ, μεγάλο μέρος της γραμμής παραγωγής των αυτοκινητοβιομηχανιών αυτοματοποιήθηκε.

Δεδομένου ότι στη συμβατική αυτοκινητοβιομηχανία (εξαιρούνται ο μηχανοκίνητος αθλητισμός, όπως η Formula 1 (F1) και τα supercars) δεν χρησιμοποιούνται τα σύνθετα υλικά στην κατασκευή των αυτοκινήτων, οι τεχνολογίες που θα αναφερθούν παρακάτω εστιάζουν στην αυτοματοποίηση τομέων της γραμμής παραγωγής που δεν έχουν σχέση με την κατασκευή και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, αλλά με τη φιλοσοφία γύρω από την οποία μία οποιαδήποτε βιομηχανία θα μπορούσε να δομήσει τη γραμμή παραγωγής της.

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση όσον αφορά στη δομή της γραμμής παραγωγής είναι αυτή της Toyota. Η Toyota πρωτοπορεί εδώ και δεκαετίες στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας και έχει καταφέρει να εδραιωθεί ως μία από τις πιο αξιόπιστες κατασκευάστριες εταιρείες αυτοκινήτων παγκοσμίως. Ο τρόπος με τον οποίο έχει καταφέρει να είναι τόσο αξιόπιστη εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η γραμμή παραγωγής, μιας και από αυτήν ξεκινάνε όλα. Η εταιρεία μέσω του μοντέλου παραγωγής της που ονομάζεται TPS (Toyota Production System) και στη βιβλιογραφία συχνά αναφέρεται και ως Λιτή Παραγωγή (Lean Manufacturing) εστίασε από το 1950 και μετά στη μείωση της απώλειας υλικών και στην αύξηση της αποδοτικότητας σε όλη τη διαδικασία παραγωγής (Toyota production system 2022).

Πιο αναλυτικά, η φιλοσοφία της εταιρείας ως προς τη λιτή παραγωγή βασίζεται σε δύο άξονες. Αρχικά, κάθε πρόβλημα που προκύπτει στη γραμμή παραγωγής πρέπει να εντοπίζεται

αυτόματα, να διακόπτεται η παραγωγή και να επιθεωρείται το τυχόν σφάλμα, παίρνοντας παράλληλα και ανασταλτικά μέτρα. Βασικό ρόλο σε αυτήν την προσέγγιση έχει η διάδοση της πληροφορίας σε όλα τα απαραίτητα μέλη της παραγωγής προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση αντίστοιχου προβλήματος στο μέλλον, αλλά και να επιτευχθεί η γρηγορότερη αντιμετώπισή του, αν προκύψει. Ο δεύτερος άξονας εστιάζει στην παραγωγή κομματιών σε κάθε στάδιο της παραγωγής όταν αυτά ζητηθούν και στην ποσότητα που θα ζητηθεί. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται οι απώλειες υλικών και παραγμένων κομματιών, υπάρχει συνέπεια στην ποιότητα των προϊόντων και η ροή των εργασιών προχωράει πιο ομαλά. Αυτό βέβαια απαιτεί οργάνωση τόσο στη διαχείριση και τοποθεσία των υλικών μέσα στον χώρο παραγωγής όσο και στην αλληλουχία των εργασιών. Αν και η προσέγγιση αυτή υπάρχει εδώ και δεκαετίες, τη σημερινή εποχή καθίσταται πιο εύκολη και προσιτή σε ένα μεγάλο εύρος της βιομηχανίας λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων που έχουν επιτρέψει την πλήρη ψηφιοποίηση των εργοστασίων.

Μια τέτοια προσέγγιση της γραμμής παραγωγής μπορεί να μην αποτελεί λύση για ένα οποιοδήποτε εργοστάσιο. Το μέγεθος, η κουλτούρα και η φύση της εταιρείας είναι που θα καθορίσουν αν ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί στις διαδικασίες παραγωγής των προϊόντων της.

Μια τεχνολογία που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας και θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλες βιομηχανίες είναι η χρήση Ψηφιακών Διδύμων για την οργάνωση της παραγωγής. Με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια στα αυτοκίνητα να αυξάνονται με γρήγορους ρυθμούς, οι εταιρείες παραγωγής πρέπει να βρουν τρόπους για να τις ενσωματώσουν στα ήδη υπάρχοντα προϊόντα και στις υπάρχουσες γραμμές παραγωγής. Αυτό αποτελεί ένα πρόβλημα που καλείται να λύσει ο μηχανικός παραγωγής. Ένα σύστημα παραγωγής, ειδικά στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας, δέχεται διαρκώς αλλαγές και βελτιώσεις κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε απόκλιση του σχεδίου με το παραγόμενο προϊόν. Η χρήση ενός Ψηφιακού Διδύμου το οποίο διαρκώς ανανεώνεται με τη χρήση πληροφοριών που λαμβάνει από την παραγωγή μπορεί να οδηγήσει στη μείωση εμφάνισης αποκλίσεων και στην καλύτερη συνεργασία μεταξύ της οργάνωσης παραγωγής και του σχεδιασμού των προϊόντων. Προφανώς μέσα στο μοντέλο του Ψηφιακού Διδύμου υπάρχει και ο κατάλληλος αλγόριθμος Τεχνητής Νοημοσύνης που επιτρέπει τη διενέργεια διαφόρων σεναρίων/προσομοιώσεων.

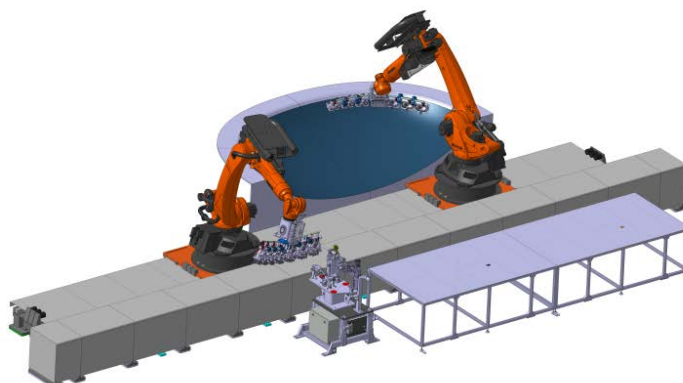
2.4 Αυτοματοποίηση στην αεροδιαστημική βιομηχανία

Η αεροδιαστημική βιομηχανία είναι ο τομέας στον οποίο εντοπίζεται το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τη χρήση σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά με το χαμηλό ειδικό βάρος και τις μηχανικές ιδιότητες που επιδεικνύουν, όπως πολύ υψηλή αντοχή, αποτελούν πολύ ελκυστική τεχνολογία για αυτήν τη βιομηχανία. Για αυτόν τον λόγο πολλές εφαρμογές που στοχεύουν στην αυτοματοποίηση παραγωγής εργοστασίων και επεξεργάζονται ή κατασκευάζουν προϊόντα από σύνθετα υλικά προκύπτουν μέσω έρευνας και ανάπτυξης σε εταιρείες ή ινστιτούτα ερευνών που ασχολούνται με τον τομέα της αεροδιαστημικής.

2.4.1 Ρομπότ και Αυτόματη Τοποθέτηση Υφασμάτων

Η σωστή τοποθέτηση του υφάσματος στο καλούπι αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο της διαδικασίας διαμόρφωσης ενός προϊόντος κατασκευασμένου από σύνθετα υλικά. Τα υφάσματα, πριν εμποτιστούν με ρητίνη και διαμορφώσουν το σύνθετο, έχουν πολύ χαμηλή διατμητική και καμπτική ακαμψία, επιτρέποντάς τους να αποκτούν με σχετικά εύκολο τρόπο το σχήμα του καλουπιού μέσα στο οποίο εναποτίθενται, αλλά ταυτόχρονα είναι εύκολο να παραμορφωθούν, να τσακίσουν ή να διπλώσουν, κάτι που οδηγεί σε ένα προϊόν με κατώτερες μηχανικές ιδιότητες των προβλεπόμενων. Η διαδικασία τοποθέτησης των υφασμάτων εντός ενός καλουπιού αποτελεί μια διαδικασία που γίνεται ακόμη χειροκίνητα στο μεγαλύτερο μέρος και ο λόγος είναι η ευαισθησία που υπάρχει στο θέμα της παραμόρφωσης του υφάσματος όταν τοποθετηθεί. Σε μικρά κομμάτια υφάσματος η χειροκίνητη διαδικασία είναι σχετικά εύκολη, με μόνο πρόβλημα την απαίτηση προσοχής στα σημεία που αλλάζει απότομα η γεωμετρία του καλουπιού, όπως οι γωνίες. Στα μεγάλα κομμάτια, όμως, η διαδικασία τοποθέτησης του υφάσματος αποτελεί μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία προκειμένου να επιτευχθεί σωστά. Η επαναληψιμότητα είναι κάτι που δεν επιτυγχάνεται όσο η διαδικασία παραμένει χειροκίνητη, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαίος ο ενδεδειγμένος μη καταστροφικός έλεγχος (Non Destructive Technology - NDT) προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα του προϊόντος, ειδικά σε εφαρμογές σε τομείς όπως η αεροδιαστημική.

Ενδιαφέρουσα λύση αποτελεί η ανάπτυξη τελεστών (εξαρτημάτων) που εφαρμόζονται σε βραχίονες ρομπότ για την αυτόματη τοποθέτηση στεγνών υφασμάτων στα καλούπια. Η εταιρία KUKA με έδρα τη Γερμανία σε συνεργασία με το Γερμανικό Αεροδιαστημικό Κέντρο (DLR) έχουν διαμορφώσει μία μονάδα για την κατασκευή ενός εξαρτήματος που αναπαριστά το διάφραγμα συμπίεσης ενός αεροπλάνου, εξαρτήματος που έχει διπλή καμπυλότητα. Στο παρακάτω Σχήμα 2-8 απεικονίζεται ψηφιακά αυτή η μονάδα. Τα δύο ρομπότ συνεργάζονται μεταξύ τους για να πιάσουν τα κομμένα υφάσματα από τον πάγκο, να τα σηκώσουν και να τα τοποθετήσουν τελικά στο καλούπι.

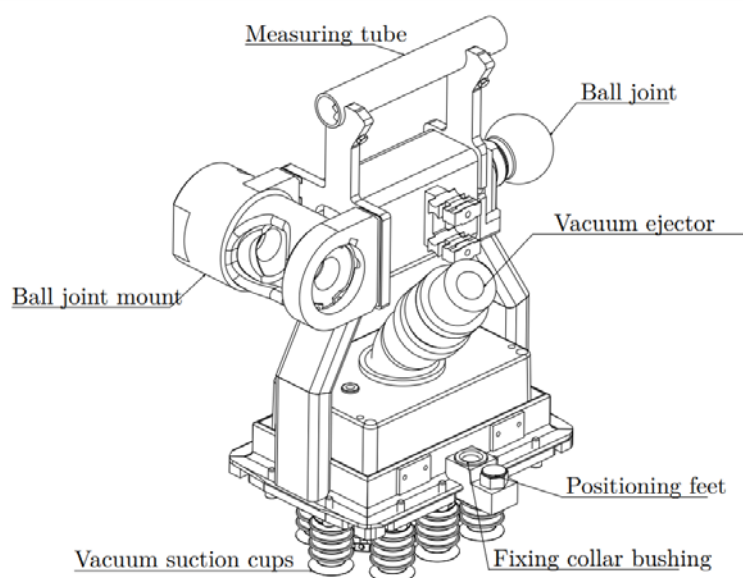


Σχήμα 2-8: Μονάδα τοποθέτησης υφασμάτων σε καλούπι διπλής καμπυλότητας (Leblebici 2018)

Για να υλοποιηθούν όλες αυτές οι διαδικασίες πρέπει να επιτευχθούν τα παρακάτω:

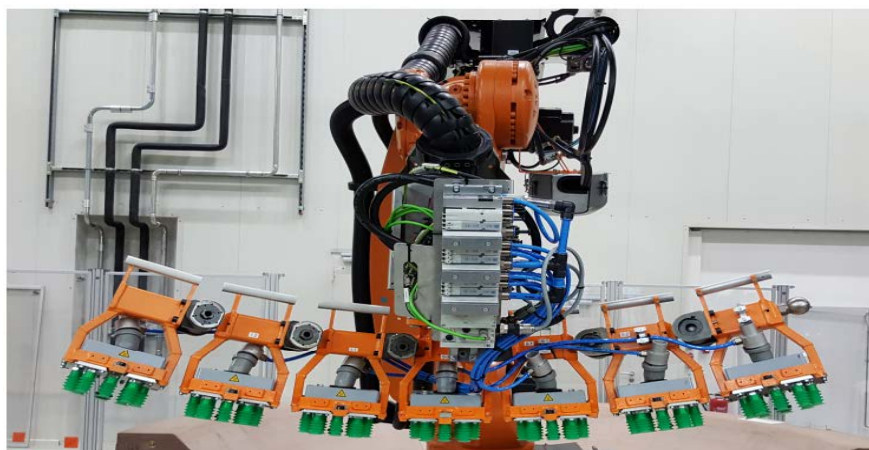
- Η συνεργασία των ρομπότ, η οποία επιτυγχάνεται με ένα πρωτόκολλο συνεργασίας τύπου αφέντης – δούλος, όπου το ένα ρομπότ «υπακούει» στις κινήσεις του άλλου.
- Ο κατάλληλος προσδιορισμός των σημείων αναφοράς: ολικό (global), του ρομπότ, του τελικού τελεστή (εξαρτήματος που κάνει τις διεργασίες). Τα ρομπότ συσχετίζουν τις κινήσεις τους με βάση αυτά τα τρία σημεία αναφοράς.
- Η εύκολη μετακίνηση των ρομποτικών βραχιόνων. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα ρομπότ είναι τοποθετημένα πάνω σε ένα γραμμικό άξονα που τους επιτρέπει την κίνηση και διευρύνει τον χώρο εργασίας τους.
- Η παροχή κομμένων υφασμάτων στην κατάλληλη γεωμετρία για να τοποθετηθούν πάνω στο καλούπι. Τα υφάσματα αυτά τοποθετούνται πάνω σε ένα πάγκο εργασίας, που έχει συγκεκριμένη θέση ως προς τα ρομπότ.
- Η παροχή δυνατότητας στους τελεστές να έχουν την δυνατότητα να τοποθετήσουν το ύφασμα όπως θα γινόταν και χειροκίνητα. Δηλαδή να υπάρχει συγκεκριμένη τοποθέτηση που να αποτρέπει την παραμόρφωση. Με τη χρήση CAD προγραμμάτων τα ρομπότ μπορούν να αντλήσουν τα δεδομένα προκειμένου σε δεύτερο χρόνο να οριστούν οι κινήσεις που θα ακολουθήσουν.
- Η δημιουργία τελεστών ικανών να σηκώσουν και να μετακινήσουν τα υφάσματα.

Στο παράδειγμα του ρομπότ των KUKA και DLR αναπτύχθηκε τελικός τελεστής (Σχήμα 2-9) με πνευματικό σύστημα για τον έλεγχο των κινήσεων και κατάλληλους βαθμούς ελευθερίας κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και των στοιχείων του τελεστή που λειτουργούν σαν αρπάγη για να ταιριάζουν στη διπλή καμπυλότητα του καλουπιού. Τα στοιχεία, που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με συνδέσμους που δίνουν τρεις βαθμούς ελευθερίας σηκώνουν τα υφάσματα δημιουργώντας κενό στο σημείο επαφής των στοιχείων με το ύφασμα.



Σχήμα 2-9: Τελικός τελεστής των KUKA/DLR (Leblebici 2018)

Τα στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους και αποτελούν τον τελικό τελεστή με την παρακάτω μορφή (Σχήμα 2-10).

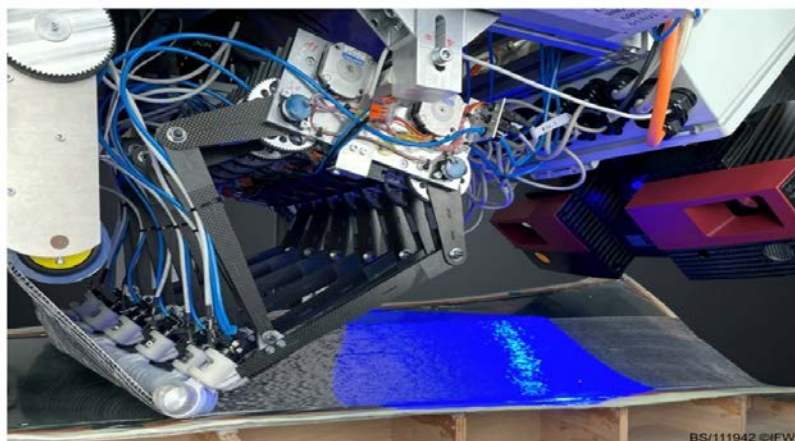


Σχήμα 2-10: Εικόνα του τελεστή (Leblebici 2018)

Μια άλλη προσέγγιση για την αυτοματοποίηση της τοποθέτησης ινών προέκυψε από το πρόγραμμα FlexProCFK και το ινστιτούτο IFW του πανεπιστημίου του Αννόβερου μεταξύ άλλων. Το πρόγραμμα στόχευε αρχικά να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία τοποθέτησης υφασμάτων με τη χρήση της μεθόδου Advanced Ply Placement (APP) (αναφορά σε αυτήν την τεχνολογία γίνεται και στο Κεφάλαιο 3) πάνω από ενισχυτικά διπλής καμπυλότητας που ήταν τοποθετημένα στην άτρακτο ενός αεροσκάφους. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα ρομπότ (της KUKA) που χρησιμοποιούσε διαφορετικό τελικό τελεστή από το προηγούμενο παράδειγμα.

Σε αυτήν την περίπτωση ο τελικός τελεστής αποτελείται από έναν σωλήνα χωρισμένο σε έξι τμήματα τα οποία μπορούν να συμπιεστούν ανεξάρτητα και από επτά βραχίονες που μετακινούν τον σωλήνα. Οι κινήσεις όλου του εξαρτήματος προκύπτουν με τη χρήση του λογισμικού Matlab[®] που αντλεί δεδομένα από τη γεωμετρία του καλουπιού. Στο Σχήμα 2-11 φαίνεται ο τελικός τελεστής από κοντινή λήψη. Αναφορά σχετικά με αυτόν τον μηχανισμό γίνεται και στο 3^ο Κεφάλαιο.

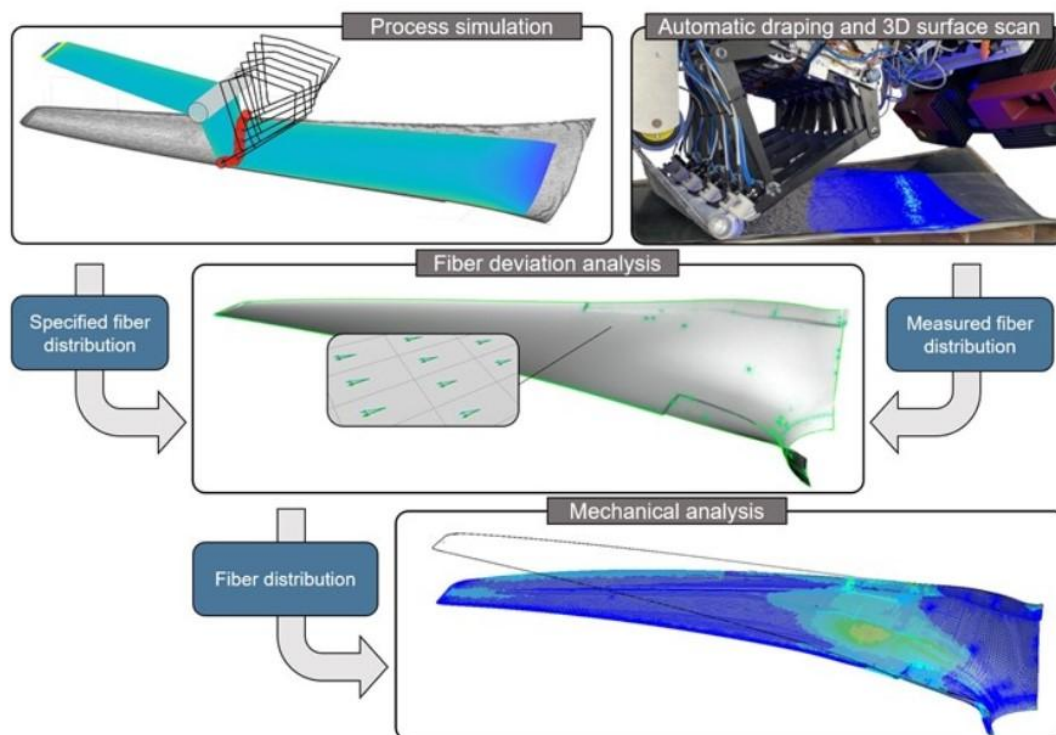
Τα στάδια που ακολουθούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι τρία: αρχικά κόβεται το ύφασμα στην επιθυμητή γεωμετρία, στη συνέχεια εμποτίζεται με ρητίνη από την κάτω μεριά και τέλος τοποθετείται πάνω στο καλούπι. Για την ολοκλήρωση του παρασκευαζόμενου κομματιού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος μορφοποίησης με σάκο κενού (vacuum bagging) και σκλήρυνση εντός φούρνου.



Σχήμα 2-11: Τελικός τελεστής προγράμματος FlexProCFK (Mason 2022)

Σε συνέχεια του προγράμματος FlexProCFK, το μηχάνημα που διαμορφώθηκε χρησιμοποιήθηκε και στο πρόγραμμα AutoBLADE ξεκινώντας το 2021. Σε αυτό το πρόγραμμα στόχος ήταν η αυτοματοποίηση της δημιουργίας πτερυγίων που χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες που αξιοποιούν την ενέργεια της παλίρροιας (tidal turbines) (Σχήμα 2-12). Οι διαφορές που προέκυψαν στη διαδικασία από το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι οι εξής:

- Αντί για εμποτισμός με ρητίνη, το ύφασμα εμποτίζεται πρώτα με κολλώδες υλικό με σκοπό τη σταθεροποίηση του υφάσματος όταν τοποθετηθεί στο καλούπι και στη συνέχεια ακολουθεί vacuum infusion.
- Η εφαρμογή αυτή έχει τη δυνατότητα να σκανάρει το τοποθετημένο ύφασμα με τεχνολογία 3D scanning και να εντοπίζει τυχόν αποκλίσεις στη διεύθυνση των ινών.
- Με τη χρήση λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζεται πως θα συμπεριφερθεί το ύφασμα κατά την εναπόθεσή του.
- Με τη χρήση των δεδομένων από το σκανάρισμα και του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται σύγκριση του μοντέλου και της πραγματικής εναπόθεσης, προκειμένου να εντοπιστούν τυχόν αποκλίσεις και να βελτιωθεί η ποιότητα της εναπόθεσης.
- Τέλος γίνεται αυτομάτως και μηχανική ανάλυση με τη χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων αξιοποιώντας την πραγματική διεύθυνση των ινών του πτερυγίου.



Σχήμα 2-12: Πρόγραμμα AutoBLADE: Βήματα διαδικασίας (Mason 2022)

Η συγκεκριμένη εφαρμογή δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τις τεχνολογίες AFP (Automated Fiber Placement) και ATP (Automated Tape Laying) που θα αναφερθούν και στο επόμενο Κεφάλαιο.

Τεχνολογίες Εικονικής (VR) και Επαυξημένης (AR) πραγματικότητας αναπτύσσονται ταχύτατα στον τομέα της αεροδιαστημικής.

2.4.2 Χρήση τεχνολογιών Εικονικής Πραγματικότητας (VR)

Εταιρείες όπως η Lockheed Martin στις ΗΠΑ και η Bombardier Transportation στον Καναδά χρησιμοποιούν τεχνολογία CAVE (cave automatic virtual environment), που αποτελεί υποκατηγορία της τεχνολογίας VR, για τη δημιουργία πρωτοτύπων. Η τεχνολογία CAVE βασίζεται στην προβολή, μέσω κατάλληλων μηχανημάτων, εικόνων μεταξύ τριών και έξι τοίχων ενός δωματίου σε σχήμα κύβου (Σχήμα 2-13). Ο χρήστης φορώντας 3D γυαλιά μπορεί να δει ολογράμματα να αιωρούνται. Με τη χρήση του CAVE οι μηχανικοί μπορούν να δουν ένα πρωτότυπο που έχει σχεδιαστεί στο σύνολό του και ταυτόχρονα τους δίνεται η δυνατότητα να δουν σε πραγματικό χρόνο προσομοιώσεις του προϊόντος σε πραγματικές συνθήκες. Ήδη υπάρχουν πολλά λογισμικά που επιτρέπουν την οπτική αναπαράσταση μιας προσομοίωσης και μέσω της τεχνολογίας VR έχει επιτραπεί η διασύνδεση αυτών των δεδομένων με την τρισδιάστατη αναπαράσταση.



Σχήμα 2-13: Τεχνολογία CAVE (VR) (cog.ethz.ch/)

Η εταιρία Safran στη Γαλλία έχει χρησιμοποιήσει την τεχνολογία CAVE για την προσομοίωση της γραμμής παραγωγής του θαλάμου που φτιάχνει για το μοντέλο A330 της Airbus. Με τη χρήση της τεχνολογίας αυτής κατάφερε να μειώσει τον χρόνο ανάπτυξης του θαλάμου κατά 30%, από 60 σε 42 μήνες.

Μία ακόμη προσέγγιση της τεχνολογίας VR, που έχει χρησιμοποιηθεί από την Lockheed Martin, είναι η εξέταση στον εικονικό κόσμο θεμάτων εργονομίας, τόσο στην γραμμή παραγωγής και στα μηχανήματα από τα οποία απαρτίζεται όσο και στην τελική συνδεσμολογία των εξαρτημάτων προκειμένου να παραχθεί το ολοκληρωμένο προϊόν. (Mason 2020)

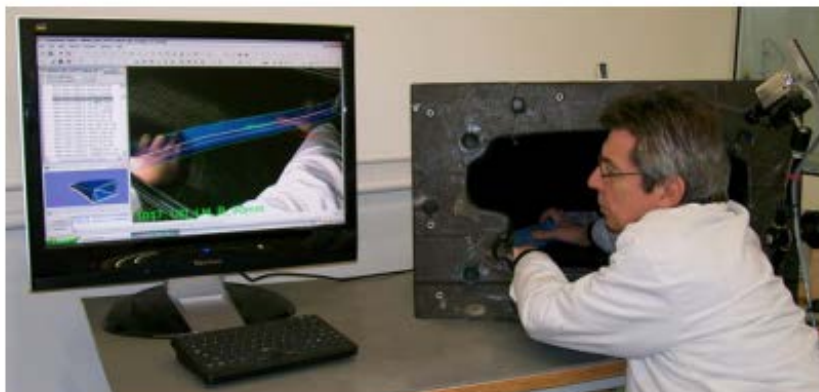
2.4.3 Χρήση τεχνολογιών Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR)

Οι τεχνολογίες AR έχουν βρει επίσης ευρύ πεδίο εφαρμογών στον τομέα της αεροδιαστημικής.

Η εταιρία Anaglyph με έδρα την Αγγλία κατασκευάζει το σύστημα PlyMatch. Το PlyMatch είναι ένα σύστημα AR που αξιοποιεί κάμερες για να προβάλλει σε πραγματικό χρόνο τον κατασκευαστικό χώρο στον εικονικό κόσμο και να υπερθέτει σε αυτόν τη στρώση του υλικού που πρέπει να τοποθετηθεί με τη σωστή διεύθυνση των ινών. Για την υπέρθεση της πληροφορίας των στρώσεων στην πραγματική εικόνα, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί δεδομένα από CAD αρχεία. Το PlyMatch έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τυχόν αποκλίσεις του τελικού προϊόντος από το αρχικό σχέδιο και σε επόμενο στάδιο θα μπορούσε αυτή η πληροφορία να δοθεί σε ένα πακέτο ανάλυσης (FEA) για να υπολογιστεί η επίπτωση που έχουν αυτές οι αποκλίσεις στην αντοχή του σύνθετου υλικού. (Novak-Marcincin 2012)

Ο τεχνικός που χρησιμοποιεί το λογισμικό της PlyMatch, αφού κάνει μια αρχική βαθμονόμηση του συστήματος, είναι έτοιμος να το χρησιμοποιήσει εντός λίγων λεπτών.

Κοιτώντας μέσα στην οθόνη όπου εμφανίζεται η εικόνα του καλουπιού μαζί με τις πληροφορίες που υπερθέτονται προχωράει στην κατασκευή του προϊόντος (παράδειγμα στο Σχήμα 2-14). Για έναν έμπειρο τεχνικό, η εξειδίκευσή του στη χρήση αυτού του προγράμματος απαιτεί κάτι λιγότερο από μία μέρα.



Σχήμα 2-14: Χρήση του λογισμικού PlyMatch (Novak-Marcincin 2012)

Αντίστοιχες τεχνολογίες με το PlyMatch, που χρησιμοποιούν όμως τεχνολογίες Laser για οπτικοποίηση πάνω στο πολύστρωτο των απαραίτητων πληροφοριών, απαιτούν πολύ μεγαλύτερο αρχικό κόστος και είναι αρκετά ευαίσθητες στο θέμα της βαθμονόμησης.

Μέσω θυγατρικών της Airbus έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες AR. Μία εφαρμογή AR που αναπτύχθηκε από τη θυγατρική InFactory Solutions, αφορά την επιθεώρηση και επιδιόρθωση κομματιών που έχουν κατασκευαστεί. Ο τεχνικός κρατώντας ένα tablet ή φορώντας κατάλληλα διαμορφωμένα γυαλιά για τη χρήση AR μπορεί να δει τις περιοχές που υπάρχει κάποια αστοχία στο προϊόν ή κάποιο κατασκευαστικό λάθος. Η περιοχή με την αστοχία στο υλικό μαζί με χρήσιμες πληροφορίες για την περιοχή προβάλλονται στο tablet μέσω οπτικοποίησης και καθιστούν πολύ γρηγορότερη την επιθεώρηση της γραμμής όσο και την επιδιόρθωση του προβλήματος, αφού ο χρήστης έχει άμεσα όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται. Επιτεύχθηκε έτσι η ελάττωση του χρόνου επιθεώρησης κατά 95%, του χρόνου επιδιόρθωσης κατά 78% και του συνολικού χρόνου παραγωγής κατά 48%.

Η Testia, μία άλλη θυγατρική της Airbus, με το σύστημά της SART (Smart Augmented Reality Tool) εστίασε στην περίπτωση που πρέπει να επιθεωρηθούν μπρακέτα που στηρίζουν κομμάτια, όπως σωλήνες και καλώδια, εντός της ατράκτου ενός αεροσκάφους και στο σύνολό τους μπορεί να είναι από εκατοντάδες έως χιλιάδες. Το σύστημα της επιθεώρησης αποτελείται από ένα tablet και κάμερα που προβάλλουν σε πραγματικό χρόνο το σχέδιο στο υπάρχον τμήμα της ατράκτου. Το σύστημα αυτό καταγράφει τυχόν λάθος τοποθετημένα, μη τοποθετημένα ή κακής ποιότητας μπρακέτα και αυτομάτως δημιουργεί μία τεχνική έκθεση με όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες. Ο χρόνος επιθεώρησης ύστερα από την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας μειώθηκε από τρεις εβδομάδες σε τρεις μέρες. (Mason 2020)

2.4.4 Τεχνολογίες Αισθητήρων στη διαδικασία παραγωγής

Με απώτερο σκοπό την αυτοματοποίηση και καλύτερη επίβλεψη διαδικασιών έγχυσης ρητίνης σε καλούπι κατασκευής πολύστρωτου (Resin Transfer Moulding – RTM), μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες παρακολούθησης της διαδικασίας. Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούν μία τεχνολογία που αναπτύσσεται τις τελευταίες τρεις δεκαετίες και μπορούν να ελέγχουν τη σκλήρυνση της ρητίνης, μεταξύ άλλων παραμέτρων. Στόχος τους είναι η παρακολούθηση και ο έλεγχος των διαδικασιών παρασκευής εξαρτημάτων από σύνθετα υλικά. Η ανάγκη για παρακολούθηση της διαδικασίας προέκυψε λόγω της μη ύπαρξης δεδομένων για το σύνθετο υλικό από την έναρξη της έγχυσης της ρητίνης έως ότου αυτό να βγει από το καλούπι. Ακόμη και για εφαρμογές στην αεροδιαστημική βιομηχανία δεν υπήρχε τρόπος να αντληθούν δεδομένα κατά τη διάρκεια παρασκευής, πέρα από τη θερμοκρασία, η οποία όμως ήταν σε εξωτερική επιφάνεια, μακριά από τα σημεία ενδιαφέροντος του πολύστρωτου. Η μη ύπαρξη χρήσιμων δεδομένων κατά τη διάρκεια της παρασκευής αποτελούσε και αποτελεί έως και σήμερα έναν ανασταλτικό παράγοντα όσον αφορά τον εντοπισμό και την επίλυση προβλημάτων ή αστοχιών που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της έγχυσης και σκλήρυνσης.

Η τεχνολογία της διαδικασίας παρακολούθησης της παραγωγής (Online Process Monitoring) έχει εξετάσει και αναπτύξει αρκετούς αισθητήρες. Οι πιο αξιόλογοι, με τα περισσότερα δεδομένα, τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε πραγματικές εφαρμογές, είναι οι αισθητήρες διηλεκτρικής ανάλυσης (Dielectric Analysis – DEA), στους οποίους εφαρμόζεται τάση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων που τους απαρτίζουν και υπάρχουν δύο υποκατηγορίες. Οι αισθητήρες των οποίων τα ηλεκτρόδια (μέρος του αισθητήρα) διεγείρονται από ένα σήμα Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC) και εκείνοι των οποίων τα ηλεκτρόδια δέχονται Συνεχές Ρεύμα (DC). Στην περίπτωση της χρήσης AC ρεύματος, το σήμα που προκύπτει στο δεύτερο ηλεκτρόδιο είναι ίδιας συχνότητας, αλλά αλλάζει το πλάτος και η φάση σε σχέση με την τάση που εφαρμόζεται στο κύκλωμα. Με αυτό τον τρόπο μετρούνται οι διηλεκτρικές ιδιότητες της ρητίνης, μέσω των οποίων μπορεί να υπολογιστεί το ιξώδες της σε πραγματικό χρόνο. Στην περίπτωση των αισθητήρων που χρησιμοποιούν DC ρεύμα, μετριέται η αύξηση της αντίστασης, η οποία είναι ανάλογη του ιξώδους και της ακαμψίας της ρητίνης. Και στους δύο τύπους αισθητήρων αξιοποιούνται μοντέλα που συσχετίζουν τις διηλεκτρικές ιδιότητες της ρητίνης με το ιξώδες και κατ'επέκταση με το στάδιο πολυμερισμού της (Gardiner 2020).

Οι παράμετροι που μπορούν να ελέγχονται με τέτοια συστήματα κατά τη διαδικασία παραγωγής και αφορούν τη ρητίνη και οι αποφάσεις που μπορούν να παρθούν αυτομάτως είναι οι εξής (Tontisakis et al 2016):

- Ποιότητα της ρητίνης και προσαρμογή της διαδικασίας αναλόγως
- Εντοπισμός της έλευσης της ρητίνης σε κρίσιμα σημεία του πολύστρωτου και αντίστοιχα άνοιγμα-κλείσιμο βαλβίδων
- Έλεγχος του ιξώδους της ρητίνης και απόφαση για το πότε πρέπει να ξεκινήσει η θέρμανση (για την σκλήρυνσή της)

- Αναγνώριση ελάχιστου ιξώδους και απόφαση σχετικά με την πίεση του συστήματος (αύξηση ή μείωση)
- Εντοπισμός απρόβλεπτων γεγονότων και επιλογή εναλλακτικής λύσης
- Βελτίωση της ακρίβειας της προσομοίωσης (αν υφίσταται) και σχεδιασμός πιο έξυπνων στρατηγικών
- Απόφαση σε πραγματικό χρόνο για τους κύκλους σκλήρυνσης (μετα-πολυμερισμού) με βάση τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης και το βαθμό σκλήρυνσης που έχει επιτευχθεί

Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) αποτελεί μια πολύ χρήσιμη πληροφορία ενός πολυμερούς μιας και καθορίζει ένα όριο στο οποίο αλλάζουν διάφορες ιδιότητές του, τόσο μηχανικές όσο και φυσικές. Άρα ένας μηχανικός, γνωρίζοντας τις συνθήκες λειτουργίας ενός πολύστρωτου, μπορεί να επιλέξει την κατάλληλη ρητίνη, αναλόγως με την T_g που παρουσιάζει. Με τη χρήση αισθητήρων που μετρούν την ηλεκτρική αντίσταση της ρητίνης κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης, μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα και για την T_g που έχει επιτευχθεί, μιας και η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g) είναι ανάλογη της αντίστασης της ρητίνης. Επιτυγχάνεται, έτσι, έλεγχος της διαδικασίας του μετα-πολυμερισμού (post-curing), σταματώντας τη διαδικασία αυτή όταν πλέον έχει επιτευχθεί η επιθυμητή T_g στο εκάστοτε πολυμερές, αντί να ακολουθείται κάποια εμπειρική εξίσωση, όπως η εξίσωση di Benedetto, στην οποία θα υπολογιζόταν, πριν την εκκίνηση της διαδικασίας, η ώρα στην οποία πρέπει να βρίσκεται το πολυμερές σε θερμοκρασία που θα επέτρεπε τον πλήρη πολυμερισμό του και την επιθυμητή T_g (Τσούβαλης 2022) (Urbaniak 2011).

Η τεχνολογία παρακολούθησης της διαδικασίας έγχυσης και γήρανσης της ρητίνης είναι κάτι που έχει μεγάλο εύρος εφαρμογών στην αεροδιαστημική, χωρίς όμως να περιορίζεται μόνο σε αυτή. Τόσο στην αυτοκινητοβιομηχανία όσο και σε εφαρμογές πτερυγίων ανεμογεννητριών, η ανάγκη για έλεγχο κατά τη διάρκεια παρασκευής - σε συνδυασμό με την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας που ακολουθείται - έχει οδηγήσει τη συγκεκριμένη τεχνολογία να αποτελεί την τεχνολογική αιχμή για όσες βιομηχανίες προσβλέπουν σε αυτοματοποίηση της παραγωγής τους και κατασκευάζουν προϊόντα από σύνθετα υλικά.

2.5 Αυτοματοποίηση στη ναυπηγική βιομηχανία

Παρακάτω ακολουθεί μία σύντομη εισαγωγή στη σύγχρονη ιστορία της ναυπηγικής, στον τρόπο δόμησης των ναυπηγείων και στην εξέλιξη τεχνικών και υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται έως και σήμερα.

Μία πρώτη μορφή αυτοματοποίησης στον τομέα της ναυπηγικής ήρθε με την εμφάνιση των CAD/CAM (Computer-Aided Design και Computer-Aided Manufacturing), την εισαγωγή δηλαδή των υπολογιστών (H/Y) στη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής των πλοίων. Αρχικά, υπολογιστικά προγράμματα έκαναν την είσοδο τους μόνο σε μεγάλα ναυπηγεία - λόγω του υψηλού κόστους - τη δεκαετία του '60 και ήταν εφαρμογές που φτιάχνονταν εντός του ναυπηγείου (in-house). Με την πάροδο των χρόνων, την εμφάνιση του

προσωπικού υπολογιστή και τη δημιουργία αξιόπιστων προγραμμάτων, τα CAD/CAM εδραιώθηκαν και στον τομέα της ναυπηγικής.

Πριν την εμφάνιση του Η/Υ και των προγραμμάτων είχαν κάνει την εμφάνισή τους άλλες τεχνικές που διευκόλυναν την παραγωγική διαδικασία στα ναυπηγεία, αλλά αφορούσαν κυρίως το οργανωτικό κομμάτι, τον καλύτερο διαμοιρασμό των ευθυνών και την ευκολότερη και πιο ξεκάθαρη επικοινωνία μεταξύ του σχεδιαστικού τμήματος και του τμήματος παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμη και σήμερα ο τομέας της οργάνωσης της παραγωγικής διαδικασίας και της σωστής μεταφοράς της πληροφορίας από τον σχεδιαστή προς το τεχνικό προσωπικό αποτελεί ίσως τον πιο καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας ενός ναυπηγείου.

Το μέλλον των ναυπηγείων, όπως και όλων των υπόλοιπων τομέων της βιομηχανίας, καθορίζεται από τις τρέχουσες εξελίξεις στη Βιομηχανία 4.0. Η περίοδος της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης έχει κάνει την εμφάνισή της και στον τομέα της ναυπηγικής. Πολλές από τις τεχνολογίες που έχουν αναφερθεί εφαρμόζονται ήδη σε μεγάλα και μικρά ναυπηγεία, ενώ άλλες είναι στη διαδικασία ένταξής τους σε αυτά. Τεχνολογίες που καλύπτουν ένα εύρος από τον σχεδιασμό έως την κατασκευή ενός πλοίου.

Οι τεχνολογίες που θα αξιοποιήσει ένα ναυπηγείο για την είσοδό του στην εποχή της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης είναι, όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η Τρισδιάστατη Εκτύπωση (3D Printing) ή Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing), η εκτεταμένη χρήση Robots και Cobots (Collaborative – Robot), η Εικονική και η Επαυξημένη Πραγματικότητα (Virtual and Augmented Reality), η χρήση Αισθητήρων, τα Ψηφιακά Δίδυμα ή Μοντελοποίηση και Προσομοίωση (Digital Twins / Modeling and Simulation), η χρήση προηγμένων συστημάτων Διαχείρισης της Εφοδιαστικής Αλυσίδας (Advancements in Logistics) και τέλος η χρήση Μεγάλων Δεδομένων (Big Data), Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing) και Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence).

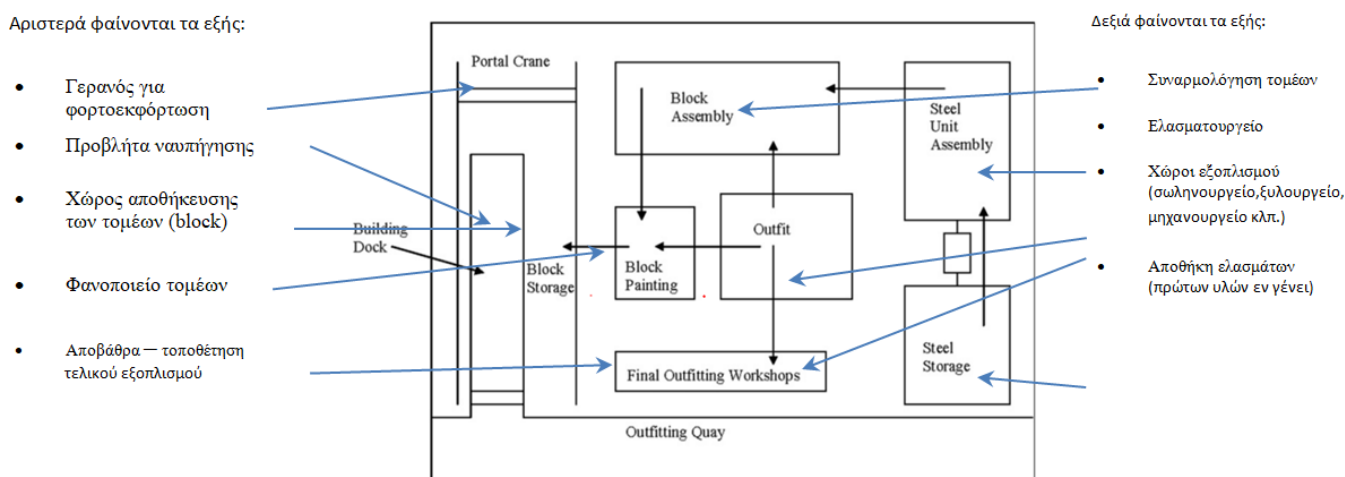
2.5.1 Ναυπηγεία Μεταλλικών Σκαφών

Η εισαγωγή του σιδήρου και στη συνέχεια του χάλυβα στη ναυπηγική έθεσε τις βάσεις για την έναρξη μιας νέας εποχής στη ναυπηγική, στη ναυτιλία και στο εμπόριο. Η πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο σε αυτή την κατεύθυνση της ναυπηγικής και το 1843 κατασκευάστηκε το πρώτο πλοίο από σίδηρο στο Μπρίστολ της Αγγλίας, ονόματι Μεγάλη Βρετανία (Great Britain), από τον Isambard Kingdom Brunel (img.co.uk/), έναν από τους πλέον επιδραστικούς μηχανικούς της πρώτης βιομηχανικής επανάστασης. Έως τότε, τα ξύλινα σκάφη είχαν πολλούς κατασκευαστικούς περιορισμούς, όπως αυτόν του μέγιστου μήκους, που δεν μπορούσε να ξεπεράσει τα 80 μέτρα. Με την πάροδο των χρόνων ο χάλυβας κυριάρχησε - από το 1880 και έπειτα - και σε συνδυασμό με την ένταξη των ατμομηχανών και της προπέλας ως μέσων πρόωσης όρισαν τη σύγχρονη μορφή των πλοίων.

Τα ναυπηγεία, αν και ακολουθούν τις τεχνολογικές εξελίξεις, όπως κάθε άλλη βιομηχανία, το κάνουν με αργούς ρυθμούς. Στο παρελθόν η βιομηχανία κατασκευής πλοίων βελτιωνόταν

με την εισαγωγή νέων μηχανημάτων, λογισμικών και εφαρμογή νέων οργανωτικών διαδικασιών. Από το 1940 έως και σήμερα, τα μεταλλικά σκάφη κατασκευάζονται συγκολλητά. Παρά το γεγονός ότι η παραγωγική διαδικασία ειδικά τα τελευταία 50 χρόνια δεν έχει αλλάξει ιδιαίτερα ως προς τα βήματα που ακολουθούνται, μεγάλη προσπάθεια γίνεται για μερική ή ολική αυτοματοποίηση πολλών διαδικασιών εντός των ναυπηγείων προκειμένου να επιταχυνθούν, να γίνουν πιο αξιόπιστες ως προς το αποτέλεσμα τους και πιο ασφαλείς για τους εργαζομένους. Σήμερα οι βασικοί άξονες που χρήζουν βελτίωσης/προσοχής είναι η αποδοτικότητα της παραγωγής, η βελτίωση των συνθηκών εργασίας, η ασφάλεια του πλοίου (τόσο της κατασκευής όσο και των επιβαινόντων), η αποδοτικότητα κόστους και ενέργειας και τέλος η προστασία του περιβάλλοντος.

Κύριες εργασίες που έχουν ήδη ή τείνουν να αυτοματοποιηθούν είναι οι συγκολλήσεις, τα κοψίματα, η αμμοβολή και η μετακίνηση βαρέων φορτίων εντός του ναυπηγείου. Αυτές οι εργασίες μπορούν να γίνουν και με τη χρήση ρομπότ. Πέρα από την χρήση των ρομπότ, πολλές είναι ακόμη οι τεχνολογίες που συμβάλλουν στην αυτοματοποίηση ενός σύγχρονου ναυπηγείου μεταλλικών σκαφών, όπως επισημάνθηκαν και λίγο πιο πάνω. Μάλιστα, τα πλαστικά σκάφη λόγω της πολύπλοκης και λιγότερο τυποποιημένης κατασκευαστικής μεθόδου τους, υπερκαλύπτουν τα μεταλλικά σε ό,τι αφορά τις τεχνολογίες που μπορούν να



Σχήμα 2-15: Τυπική κάτοψη ναυπηγείου (Eyres 2012)

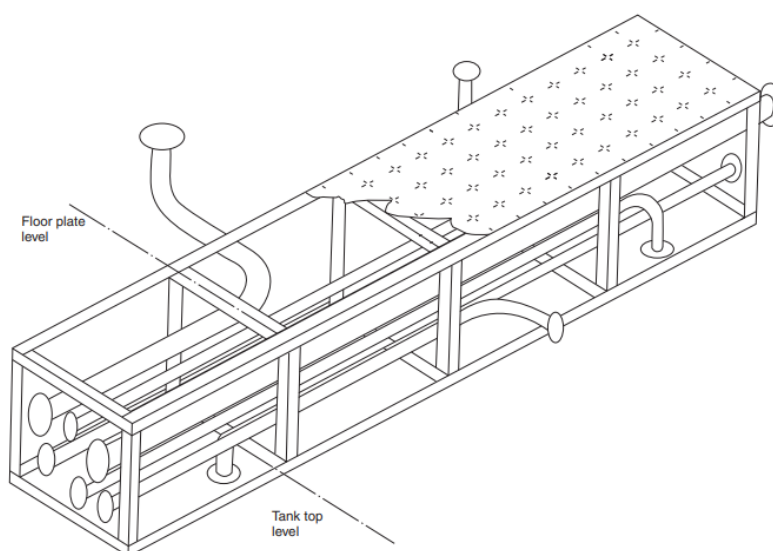
αξιοποιηθούν για την παραγωγή τους και για αυτό το λόγο εκτενής αναφορά σε αυτές θα γίνει στην ενότητα που ακολουθεί, στην οποία και εστιάζει η θεματολογία της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Χρήσιμο είναι να γίνει μια σύντομη αναφορά στη δομή ενός ναυπηγείου που κατασκευάζει μεταλλικά σκάφη καθώς και στη διαδικασία σχεδιασμού και παραγωγής των πλοίων. Μια τυπική μορφή κάτοψης ενός σύγχρονου ναυπηγείου φαίνεται στο Σχήμα 2-15.

Προφανώς η λογική παραμένει ίδια - όσο δύναται - και στα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών. Η αλληλουχία εργασιών έχει ως εξής:

- Κατασκευή μεταλλικών κομματιών [κοψίματα, κολλήματα, κάμψη (στραντζάρισμα) και στρέψη].

- Ανέγερση όπως γάστρας/υπερκατασκευής με την εξής ακολουθία: τεμάχια (π.χ. λαμαρίνες, ενισχυτικά), πάνελ, υποτομείς (subassemblies or sections), τομείς (blocks), τελική συναρμολόγηση τομέων – ολοκλήρωση ανέγερσης πλοίου
- Συναρμολόγηση κομματιών με κλιμακούμενο μέγεθος σε κάθε στάδιο της κατασκευής έως την κατασκευή μίας μονάδας εξοπλισμού, π.χ. σωληνώσεις μέρους του διπύθμενου (Σχήμα 2-16). Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της δημιουργίας σταδιακά κλιμακούμενων κομματιών είναι το γεγονός ότι φτιάχνονται σε σταθμούς εργασίας εκτός του πλοίου, κάτι το οποίο διευκολύνει αρκετά τις εργασίες και τις συγκολλήσεις, που συνήθως είναι μία αυτοματοποιημένη διεργασία. Μια καλή πρακτική για τις συγκολλήσεις σε όλα τα στάδια είναι η μεγιστοποίηση των οριζόντιων συγκολλήσεων, κάτι που απαιτεί σχεδιασμό εκ των προτέρων. Η μονάδα εξοπλισμού συνήθως είναι επαρκώς εξοπλισμένη, λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη εύκολης προσβασιμότητας για περαιτέρω εργασίες.
- Πολλές μονάδες εξοπλισμού μαζί με τους υποτομείς διαμορφώνουν ένα τομέα (block). Η συναρμολόγηση πλοίων σε τομείς έχει πολλά πλεονεκτήματα, όλα όμως έχουν ως αποτέλεσμα τη γρηγορότερη κατασκευή του πλοίου. Οι τομείς, όπως και οι μονάδες, εξοπλίζονται περαιτέρω. Σε αυτό το στάδιο μονάδες εξοπλισμού που είναι ολοκληρωμένες εκ των προτέρων μπορούν να εγκατασταθούν (εξοπλισμός on-unit) ή γίνεται η τοποθέτηση εξοπλισμού στη γάστρα υπό ανέγερση (εξοπλισμός on-board) (Παπάζογλου & Τσούβαλης 2018).



Σχήμα 2-16: Εξοπλισμός ανεξάρτητα από τη γάστρα (εξοπλισμός on-unit). Μονάδα σωληνώσεων έτοιμη για τοποθέτηση σε τομέα [pdf - Ship Construction]

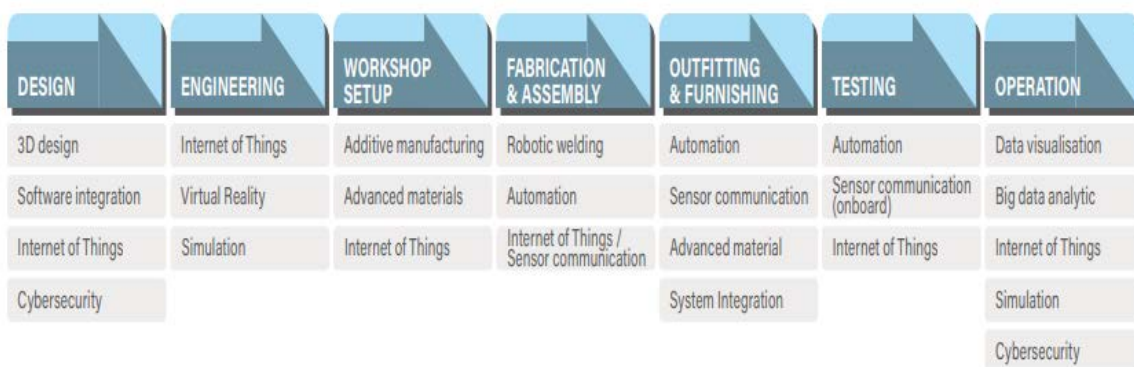
Σημαντικό είναι η αλληλουχία στην τελική συγκόλληση των μπλοκ να είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παραμένουσες τάσεις.

Η παραπάνω πρακτική κατασκευής ενός πλοίου ακολουθεί τη λογική του σχεδιασμού με εστίαση την παραγωγή (DFA – Design for Assembly), η οποία αποτελεί κομμάτι και άλλων

βιομηχανιών, όπως είναι η αυτοκινητοβιομηχανία και συνοψίζεται στα εξής 8 σημεία (Lamb 2003).

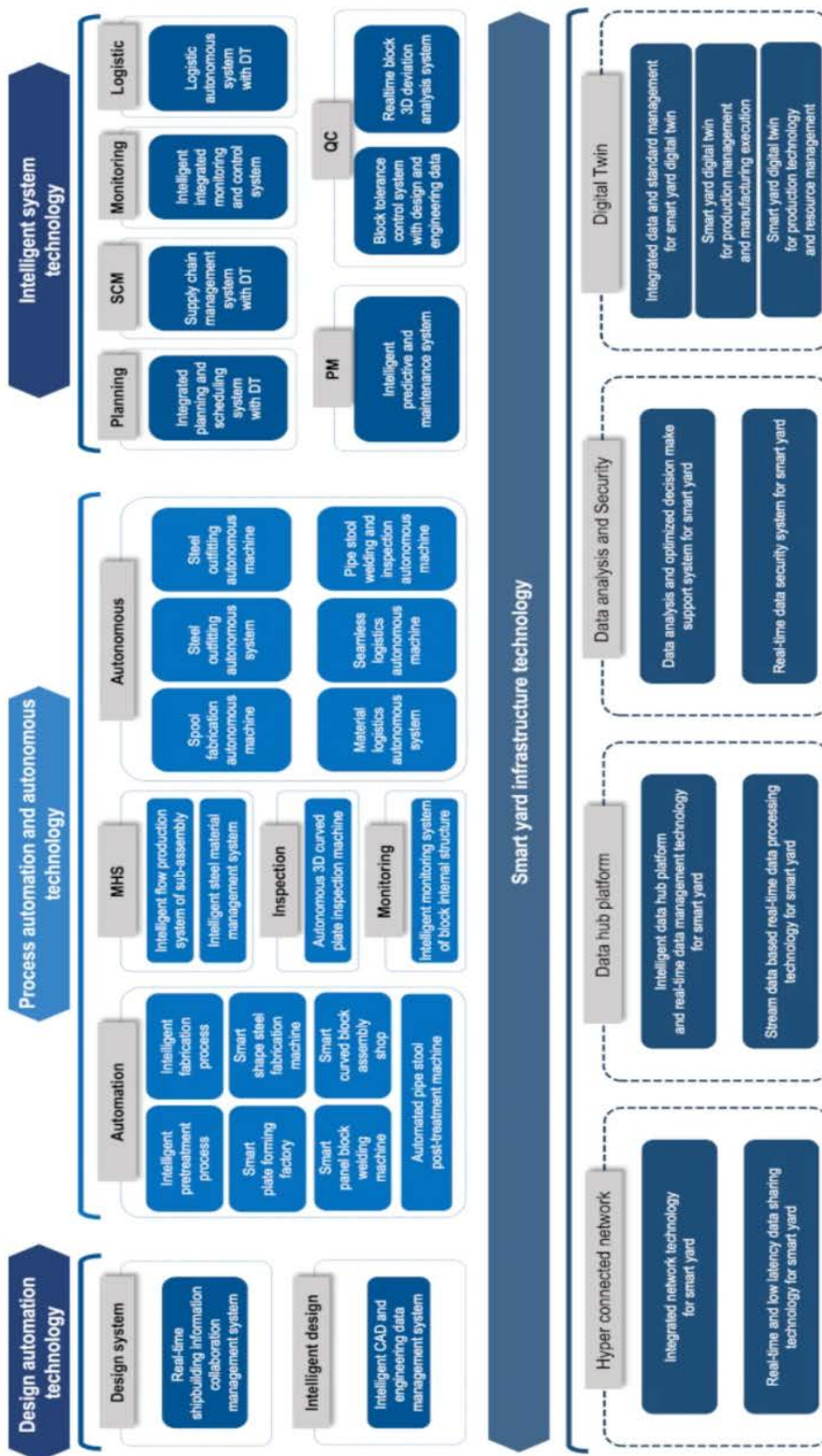
1. Ελαχιστοποίηση αριθμού και τύπου εξαρτημάτων
2. Προσπάθεια για εξάλειψη συναρμολόγησης/προσαρμογών
3. Κομμάτια σχεδίου να είναι αυτο-ευθυγραμμιζόμενα (self-aligning) και η θέση τους στη μονάδα που πρόκειται να τοποθετηθούν να είναι εύκολα εντοπίσιμη (self-locating)
4. Διασφάλιση επαρκούς πρόσβασης και ανεμπόδιστης ορατότητας
5. Εξασφάλιση του εύκολου χειρισμού των κομματιών για τη μετακίνησή τους εντός του χώρου εργασίας
6. Ελαχιστοποίηση της ανάγκης για αναπροσανατολισμό του κομματιού κατά τη διάρκεια της συναρμολόγησης. Να μην χρειάζεται, δηλαδή, να στραφεί σε οποιοδήποτε άξονα για να γίνει η τελική του τοποθέτηση
7. Σχεδιασμός κομματιών ώστε να μη μπορούν να εγκατασταθούν λανθασμένα
8. Μεγιστοποίηση της συμμετρίας των κομματιών ή δημιουργία εμφανούς ασυμμετρίας

Η αλληλουχία εργασιών εντός του ναυπηγείου και ο τρόπος προσέγγισης του σχεδιασμού ενός πλοίου που μόλις αναφέρθηκαν, αποτελούν τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο ναυπήγησης ενός πλοίου. Ένα ναυπηγείο, μικρό ή μεγάλο, που αποσκοπεί στην αυτοματοποίηση της γραμμής παραγωγής του, πρέπει πρώτα να έχει εντάξει αυτές τις πρακτικές στον τρόπο λειτουργίας του. Οι καινοτόμες τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν από ένα ναυπηγείο σε κάθε φάση της κατασκευής – ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού – συνοψίζονται και στο Σχήμα 2-17.



Σχήμα 2-17: Συστήματα και τεχνολογίες του Ναυπηγείου 4.0 (Hasan & Mohamad 2018)

Μια προσέγγιση που εστιάζει στην ψηφιακή διαμόρφωση του Ναυπηγείου 4.0 απεικονίζεται στο Σχήμα 18. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα βρίσκονται στο στάδιο της έρευνας και θα υλοποιηθούν μέσα από μια σειρά Έξυπνων Τεχνολογιών (Smart Technologies), όπως είναι το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, η Τεχνητή Νοημοσύνη, οι τεχνολογίες Μεγάλων Δεδομένων και το Ψηφιακό Δίδυμο.



Σχήμα 2-18: Τεχνολογίες ψηφιοποίησης [mdpi.com]

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει εστίαση στα ναυπηγεία που κατασκευάζουν σκάφη από σύνθετα υλικά και στο πώς μπορούν να αξιοποιήσουν τις αναδυόμενες τεχνολογίες της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης.

3 Κεφάλαιο 3 – Αυτοματοποίηση στα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται αναφορά στην κατασκευή σκαφών από σύνθετα υλικά. Τα ινώδη σύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούν υποκατηγορία των σύνθετων υλικών, είναι υλικά που μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη, που έχουν όμως συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους [Τσούβαλης 1998]. Αποτελούν το αντικείμενο ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αν και η κατασκευή των πρώτων σύνθετων υλικών έγινε λίγα χρόνια πριν τον 2^ο παγκόσμιο πόλεμο, οι μηχανικοί κατά τη διάρκεια του πολέμου αντιλήφθηκαν πολλά από τα πλεονεκτήματά τους και σύντομα έκαναν την εμφάνισή τους οι πρώτες εφαρμογές τους σε διάφορα συστήματα. Τα πιο διακριτά πλεονεκτήματα ήταν το χαμηλό τους βάρος, η υψηλή τους αντοχή, η αντοχή σε διάβρωση, αλλά και η χαμηλή μαγνητική υπογραφή τους.

Τα πρώτα μικρά εμπορικά σκάφη έκαναν την εμφάνισή τους λίγο μετά τον πόλεμο. Η ανάπτυξη, στην αρχή της δεκαετίας του 1950, της μεθόδου επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up) οδήγησε σε γρήγορη ανάπτυξη της βιομηχανίας κατασκευής σκαφών από GRP (Glass Reinforced Plastic) (Παπάζογλου & Τσούβαλης 2018). Έκτοτε έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι, πιο αξιόπιστες, αλλά η μέθοδος επίστρωσης με το χέρι εξακολουθεί να υφίσταται στον τομέα της ναυπηγικής, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους που συνεπάγεται αυτή η διαδικασία.

Οι περισσότερες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των σύνθετων υλικών έχουν προκύψει και εξακολουθούν να προκύπτουν κατά κύριο λόγο από τον τομέα της αεροδιαστημικής βιομηχανίας και αυτό συμβαίνει λόγω των υψηλών απαιτήσεων του τομέα αυτού, κάτι που συνεπάγεται εκτεταμένη έρευνα και εφαρμογή των νέων αυτών τεχνολογιών. Κάποιες από αυτές τις τεχνολογίες έχουν βρει εφαρμογή και στη ναυπηγική, καθώς με τα χρόνια τόσο η τεχνογνωσία όσο και οι οικονομικές απαιτήσεις γίνονταν πιο προσιτές για έναν κλάδο όπως αυτός της κατασκευής μικρών σκαφών. Ένα κλάδο, δηλαδή, με πολύ μικρότερες οικονομικές δυνατότητες.

Η έρευνα και ανάπτυξη πλέον στον τομέα της ναυπηγικής δεν περιορίζεται μόνο στα μικρά και στα πολεμικά πλοία. Ο λόγος που η χρήση των σύνθετων υλικών στη ναυπηγική έχει αυξητική τάση πηγάζει από την ανάγκη της αγοράς για μείωση του βάρους, αύξηση του ωφέλιμου βάρους (payload) και μείωση της κατανάλωσης καυσίμων προκειμένου να ικανοποιούν τους αυστηρότερους κανονισμούς που έρχονται σταδιακά όσον αφορά τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος ενός πλοίου. Πέρα από τη δημιουργία υπερκατασκευών από σύνθετα υλικά, προσπάθεια γίνεται και για τη δημιουργία όλο και περισσότερων σκαφών μεγαλύτερου μήκους των 50 περίπου μέτρων. Αυτό το μήκος είναι ενδεικτικό και προκύπτει από την αγορά των πλαστικών σκαφών έτσι όπως είναι διαμορφωμένη έως σήμερα. Η διαμόρφωση αυτή έχει προκύψει κυρίως από δύο παράγοντες: τη δυνατότητα κατασκευής αυτών των σκαφών από τα ναυπηγεία και την ύπαρξη κατάλληλου θεσμοθετημένου πλαισίου μέσω των νηογνωμόνων που επιτρέπει την απρόσκοπτη άθηση του κατασκευαστικού κλάδου των σκαφών από σύνθετα υλικά. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν κανονισμοί, αλλά ότι πολλές φορές οι

κανονισμοί αυτοί είναι αποτρεπτικοί, κυρίως διότι είναι υπερβολικά συντηρητικοί και ακολουθούν τη λογική κατασκευής μεταλλικών υλικών, χωρίς να λαμβάνουν γρήγορα υπόψη τους τις ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των σύνθετων υλικών.

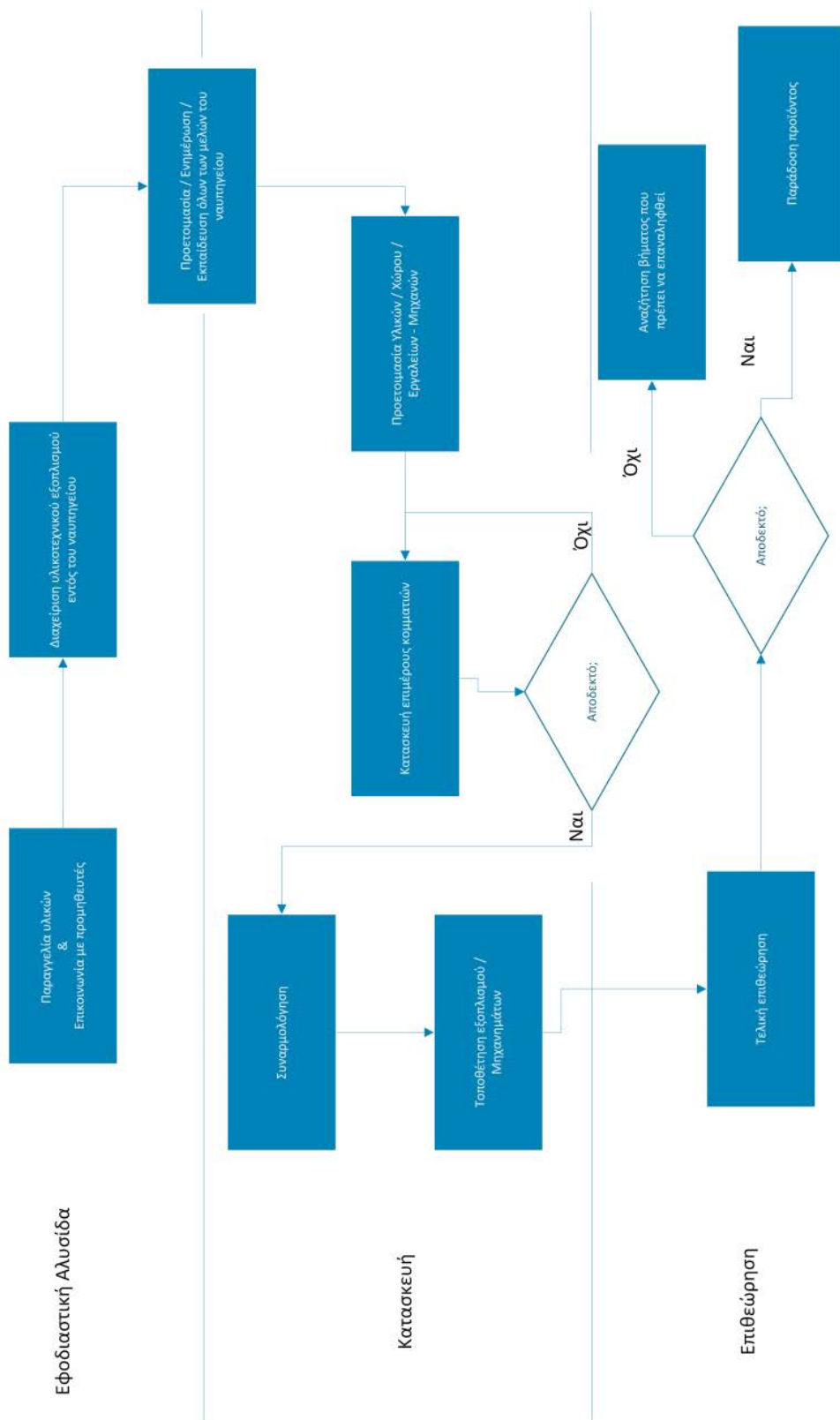
Ένα ναυπηγείο, προκειμένου να μπορεί να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα που έχουν να προσφέρουν τα σύνθετα υλικά, επιβάλλεται να είναι σε θέση να εξυπηρετήσει κάποιους στόχους. Θα πρέπει να μπορεί να σχεδιάσει και να κατασκευάσει κομμάτια ή και ολόκληρες κατασκευές με ακρίβεια εντός κάποιων ορίων, να έχει αποδεκτή απόδοση παραγωγής και οι κατασκευές του να έχουν την απαραίτητη ανθεκτικότητα για τις συνθήκες που θα του υποβάλλονται στο περιβάλλον που θα λειτουργεί. Επιπλέον, θεωρείται αναγκαίο να αναπτυχθούν κατάλληλες διεργασίες για τη σωστή συντήρηση και επισκευή των κατασκευών όσο βρίσκονται σε λειτουργία. Όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση και τον ανταγωνισμό, οδηγούν στην ανάγκη για υιοθέτηση πρακτικών που μπορούν να αυτοματοποιήσουν μέρος ή ολόκληρη την γραμμή παραγωγής.

3.1 Σύγχρονα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών

Τα σύγχρονα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών, ανάλογα με τις απαιτήσεις παραγωγής που έχει το καθένα, έχουν εντάξει λιγότερες ή περισσότερες τεχνολογίες και μεθόδους παραγωγής που τους επιτρέπουν κατά κύριο λόγο μερική αυτοματοποίηση της παραγωγής. Κάθε ναυπηγείο έχει μία γενική μορφή οργάνωσης της παραγωγικής διαδικασίας που προσομοιάζεται μακροσκοπικά από το παρακάτω διάγραμμα ροής διεργασιών (process map Σχήμα 3-1).

Η ροή των εργασιών εντός ενός ναυπηγείου έχει τρεις κύριες διεργασίες, τον εφοδιασμό, την παραγωγή και την επιθεώρηση. Αρχικά γίνεται η παραγγελία των απαραίτητων υλικών, ακολουθεί η διαδικασία της παραγωγής, με τις επιμέρους παραγωγικές της διαδικασίες, όπου άλλες συμβαίνουν παράλληλα και άλλες διαδέχονται τις προηγούμενες ανάλογα με το στάδιο παραγωγής, και τέλος τα ολοκληρωμένα πλέον σκάφη περνάνε από τελική επιθεώρηση πριν παραδοθούν στον πελάτη.

Να σημειωθεί ότι υπάρχει η παραδοχή ότι το βήμα του σχεδιασμού και της δημιουργίας των κατασκευαστικών σχεδίων έχει ολοκληρωθεί στο παραπάνω σχεδιάγραμμα, παρόλα αυτά παρακάτω θα γίνει αναφορά σε τεχνολογίες που προηγούνται της παραγωγικής διαδικασίας και υπεισέρχονται στο κομμάτι του σχεδιασμού και της οργάνωσης της παραγωγής. Αυτό κρίνεται σκόπιμο λόγω της ύπαρξης τεχνολογιών που μπορούν να διευκολύνουν τα βήματα της παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα ροής διεργασιών

3.2 Φάση Σχεδιασμού (Design Phase) και Οργάνωσης της Παραγωγής (Production Planning)

Το συγκεκριμένο στάδιο της παραγωγής δεν αφορά την αυτοματοποίηση κάποιας διαδικασίας στην παραγωγική περιοχή του εργοστασίου (shop floor ή production floor), αλλά αποτελεί κομβικό σημείο για την έκβαση επιθυμητών οικονομικών και ποιοτικών αποτελεσμάτων. Για αυτόν τον λόγο, ένα ναυπηγείο που δεν αφιερώνει εξίσου χρόνο και πόρους σε αυτό το στάδιο, δεν θα μπορέσει να εκμεταλλευτεί στο έπακρο τις τεχνολογίες που αυτοματοποιούν τη γραμμή παραγωγής του.

Ένα ναυπηγικό σχέδιο συνήθως έχει χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα στον εκάστοτε πελάτη (custom build) και αυτό αποτρέπει τον πλήρη έλεγχο τόσο του σχεδίου όσο και της οργάνωσης της παραγωγής προτού τοποθετηθεί η παραγγελία. Ακόμη και όταν το σχέδιο βρίσκεται υπό εξέλιξη και κάποια κομμάτια ενδέχεται να έχουν ήδη μπει στην παραγωγή, συχνά παρουσιάζεται το φαινόμενο αλλαγής μικρών ή μεγάλων επιμέρους στοιχείων του τελικού σκάφους. Φυσικά αυτό το πρόβλημα εντείνεται όσο αυξάνεται και το μέγεθος του σκάφους, καθώς εκεί τα οικονομικά μεγέθη και οι απώλειες μπορεί να αποτελέσουν τροχοπέδη στην αλλαγή των αρχικών σχεδίων.

Προκειμένου να λυθούν τέτοιου είδους προβλήματα, είναι σκόπιμο να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες που να επιτρέπουν στον σχεδιαστή και στον υπεύθυνο μηχανικό παραγωγής να έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν τα σχέδια και την οργάνωση και να επικοινωνούν αυτές τις αλλαγές με το συντομότερο δυνατό τρόπο στο σύνολο των ατόμων που εμπλέκονται στο εκάστοτε έργο. Νέες τεχνολογίες και συστήματα, εκμεταλλευόμενα τις τεχνολογικές εξελίξεις, επιτρέπουν τη στροφή σε μία τέτοιου είδους προσέγγιση της παραγωγής και ελαχιστοποιούν τα κόστη που προηγουμένως επιβάρυναν τα έργα, μικρής ή μεγάλης κλίμακας, και που πολλές φορές οδηγούσαν το ναυπηγείο σε καθυστερήσεις στην παράδοση της παραγγελίας και συγχρόνως το ίδιο το έργο ξέφευγε κατά πολύ του προϋπολογισμού. Αυτά τα προβλήματα προφανώς δεν έχουν λυθεί, και για πολλούς κατασκευαστές εξακολουθούν να αποτελούν ένα σύνθετο πρόβλημα που συχνά αγνοούν.

Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε τεχνολογίες που βελτιστοποιούν αυτά τα στάδια με διάφορους τρόπους.

3.2.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) και Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems)

Για αρχή είναι απαραίτητη η πλήρης ψηφιοποίηση ενός σύγχρονου ναυπηγείου προκειμένου να μεταβεί σε αυτό που ονομάζεται Ναυπηγείο 4.0, όπως έχει προαναφερθεί. Η αξιοποίηση όσο περισσότερων τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (ΔΤΠ), προκειμένου να υπάρχει η απαραίτητη υποδομή, θα επιτρέψει σε δεύτερο χρόνο τη σταδιακή μετατροπή του ναυπηγείου σε ένα σύνολο Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων. Οι τεχνολογίες που αξιοποιεί το Διαδίκτυο των Πραγμάτων είναι κατά βάση τυποποιημένα πρωτόκολλα (standard protocols) και τεχνολογίες διασύνδεσης (networking technologies) με τις πιο βασικές να είναι οι τεχνολογίες RFID (Radio-frequency identification), NFC (Near-field communication), low-

energy Bluetooth, low-energy wireless, low-energy radio protocols, LTE-A (Long Term Evolution Advanced) και WiFi Direct (Internet of things, tutorialspoint.com/).

Συνοπτικά, οι τεχνολογίες αυτές έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- **RFID:**

Αποτελεί μία τεχνολογία ανταλλαγής δεδομένων ασύρματα και ανέπαφα με τη χρήση ετικετών ή καρτών, που μπορούν να αποθηκεύσουν δεδομένα και συνήθως δεν χρειάζονται τροφοδοσία (passive tags). Υπάρχουν βέβαια και τα active tags, τα οποία έχουν δικό τους μέσω τροφοδοσίας και επιτρέπουν τη μεταφορά σήματος έως και 100 μέτρα μακριά, αλλά είναι αρκετά πιο ακριβά. Το σύστημα αποτελείται από την ετικέτα, τη συσκευή ανάγνωσης και μία κεραία. Οι ετικέτες που δεν χρειάζονται τροφοδοσία ενεργοποιούνται και στέλνουν σήμα στην συσκευή ανάγνωσης όταν η κεραία εκπέμψει ένα ραδιοφωνικό σήμα, αλλά η συσκευή ανάγνωσης πρέπει να είναι σε απόσταση λίγων μέτρων για να λάβει το σήμα από τις ετικέτες. Κάποια βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το γεγονός ότι οι συσκευές ανάγνωσης μπορούν να διαβάσουν ταυτόχρονα πολλές ετικέτες, δεν απαιτείται η αγορά άλλου εξοπλισμού και οι ετικέτες προσφέρουν ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο (RFID vs NFC 2022).

- **NFC**

Η τεχνολογία NFC είναι παρόμοια με αυτή των RFID. Αξιοποιεί μικρά τσιπ για την αποθήκευση πληροφοριών και συχνά ενσωματώνονται μέσα σε αυτοκόλλητα ή ετικέτες. Τα περισσότερα κινητά τηλέφωνα σήμερα έχουν τη δυνατότητα ανάγνωσης δεδομένων από ετικέτες NFC. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι επιτρέπει την αμφίδρομη μεταφορά πληροφορίας μεταξύ ετικέτας και συσκευής ανάγνωσης. Σε αντίθεση, όμως, με τις ετικέτες RFID, οι ετικέτες NFC έχουν πολύ μικρή εμβέλεια – της τάξης των μερικών εκατοστών - και απαιτείται συνήθως η άμεση αλληλεπίδραση με το χρήστη της συσκευής ανάγνωσης (RFID vs NFC 2022).

- **Bluetooth Low-Energy (LE)**

Η τεχνολογία Bluetooth αποτελεί μία τεχνολογία που εκμεταλλεύεται το φάσμα μετάδοσης συχνότητας (frequency-hopping spread spectrum) για τη μετάδοση ραδιοφωνικών σημάτων με ταχεία αλλαγή της φέρουσας συχνότητας μεταξύ πολλών συχνοτήτων που καταλαμβάνουν μια μεγάλη φασματική ζώνη. Το Bluetooth λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz. Χρησιμοποιεί για τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων εντός μικρής απόστασης των συσκευών. Με την εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας σε αυτή της Low Energy, οι συσκευές πλέον δεν χρειάζεται να είναι διαρκώς σε σύνδεση, καταναλώνοντας μεγάλα ποσά ενέργειας, αλλά βρίσκονται σε αδράνεια έως ότου χρειαστεί να μεταφερθεί κάποια πληροφορία (Proctor 2021).

- **Low-energy Wireless**

Αποτελεί τεχνολογία που επιτρέπει στην ασύρματη σύνδεση μεταξύ π.χ. αισθητήρων ή άλλων συσκευών με ένα σύστημα, μειώνοντας την απαίτηση σε ενέργεια.

- Low-energy radio protocols

Αποτελούν πρωτόκολλα που επιτρέπουν στην χαμηλή κατανάλωση σε τοπικά δίκτυα και προσφέρουν επιτρέποντας, όμως, σε μεγάλη διακίνηση δεδομένων σε αντίθεση με άλλες αντίστοιχες τεχνολογίες.

- LTE-A

Το LTE αποτελεί ένα πρότυπο για την ασύρματη επικοινωνία συσκευών και τερματικών δεδομένων. Το LTE-A αποτελεί εξέλιξη του LTE και προσφέρει μεγαλύτερη κάλυψη, υψηλότερη διακίνηση δεδομένων και χαμηλότερη καθυστέρηση (latency) στη μεταφορά των δεδομένων.

- WiFi Direct

Η τεχνολογία του WiFi Direct, σε αντίθεση με το WiFi, δεν χρειάζεται ένα σημείο πρόσβασης, αλλά επιτρέπει στην P2P (peer-to-peer) σύνδεση, δηλαδή στην άμεση σύνδεση μεταξύ συσκευών, προσφέροντας ίδιες ταχύτητες με το WiFi, αλλά με μικρότερη καθυστέρηση (latency).

Μέσω αυτών των τεχνολογιών και σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες γίνεται εφικτή η διασύνδεση μεταξύ των φυσικών συστημάτων, όπως για παράδειγμα μιας εργαλειομηχανής, και των υπολογιστικών στοιχείων, διαμορφώνοντας με αυτό τον τρόπο τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα. Να σημειωθεί ότι οι παραπάνω τεχνολογίες μπορούν να αξιοποιηθούν και στη διαχείριση και οργάνωση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Ένα πλήρως συνδεδεμένο ναυπηγείο έχει το πλεονέκτημα της άμεσης ροής όλων των απαραίτητων πληροφοριών, με μορφή αξιοποιήσιμη κάθε φορά. Έτσι, επιτυγχάνεται απρόσκοπτα τόσο η διαδικασία σχεδιασμού του σκάφους και διαμόρφωσης των βημάτων της διαδικασίας παραγωγής όσο και της ίδιας της παραγωγής, χωρίς να υπάρχουν κωλύματα (bottlenecks) σε κανένα από τα προαναφερθέντα στάδια.

Μερικά παραδείγματα χρήσης των παραπάνω τεχνολογιών είναι τα εξής:

- Η ανανέωση του σχεδίου ενός κομματιού από το σχεδιαστικό τμήμα του εργοστασίου, η άμεση μεταφορά της πληροφορίας στην περιοχή κατασκευής του εκάστοτε κομματιού, είτε βρίσκονται στο ίδιο γεωγραφικό σημείο είτε απομακρυσμένα, και τέλος η εμφάνιση αυτής της πληροφορίας σε ένα tablet ή μία οθόνη με τις κατάλληλες οδηγίες για την παρασκευή του.
- Ένας αισθητήρας λαμβάνει την πληροφορία ότι η θερμοκρασία στο δωμάτιο σκλήρυνσης παρουσιάζει πτώση και επενεργεί αυτομάτως στον θερμοστάτη προκειμένου να φέρει τη θερμοκρασία στα προηγούμενα επίπεδα και αν για κάποιο λόγο εξακολουθεί να φαίνεται αυτή η πτωτική τάση στη θερμοκρασία είτε ψάχνει για άλλη αιτία είτε ενημερώνει το κεντρικό σύστημα προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

3.2.2 Ψηφιακά δίδυμα (*Digital Twins – DTs*) και Προσομοίωση (*Simulation*)

Έχοντας ήδη γίνει αναφορά στο 2^ο Κεφάλαιο στα Ψηφιακά Δίδυμα (*Digital Twins*), μπορεί κανείς εύκολα να αντιληφθεί ότι έχουν να προσφέρουν πολλά στον τομέα της ναυπηγικής. Αποτελούν την ψηφιακή αναπαράσταση ενός ατόμου, χώρου ή αντικειμένου και είναι το ένα εκ των δύο συστημάτων που απαρτίζουν τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα, με το άλλο να είναι τα φυσικά συστήματα. Τα Ψηφιακά Δίδυμα απαρτίζονται από πληροφορίες από το πρώτο κατασκευαστικό σχέδιο έως το τέλος της υπηρεσιακής ζωής του φυσικού συστήματός τους, είναι δηλαδή μοντέλα που αναβαθμίζονται και ενημερώνονται διαρκώς. Επιπλέον, έχουν ως βασικό πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν την πραγματοποίηση λεπτομερών και με υψηλή ακρίβεια προσομοιώσεων, αφού δεν προσεγγίζουν την προσομοίωση μόνο ως ένα ψηφιακό μοντέλο, αλλά λαμβάνουν και άμεσες πληροφορίες από το φυσικό περιβάλλον τις οποίες και αξιοποιούν.

Οι προσομοιώσεις μπορεί να αφορούν τα εξής:

- Τη δοκιμή εργονομίας ύστερα από την αλλαγή θέσης ή προσθήκη νέων εργαλείων στο χώρο εργασίας, εξετάζοντας τόσο τις κινήσεις και τους χώρους εργασίας με βάση τα άτομα που δουλεύουν όσο και θέματα ασφάλειας που μπορεί να προκύψουν στην πορεία.
- Τον έλεγχο της απόκλισης μιας πραγματικής κατασκευής ύστερα από μετρήσεις με αισθητήρες, την ανατροφοδότηση της πληροφορίας στο λογισμικό που ελέγχει την αντοχή και απόκριση της κατασκευής (πρόγραμμα FEA) και τέλος την αποδοχή ή όχι της κατασκευής.

3.2.3 Εικονική και Επαυξημένη Πραγματικότητα (*VR & AR*)

Τεχνολογίες Εικονικής και Επαυξημένης Πραγματικότητας ή αλλιώς VR και AR έχουν κάνει την εμφάνισή τους σε διάφορους τομείς. Ο τομέας γύρω από τον οποίο και πάλι γίνεται η περισσότερη έρευνα, όσον αφορά τουλάχιστον τον κατασκευαστικό κλάδο, είναι αυτός της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, όπου οι τεχνολογίες αυτές έχουν βρει ήδη εφαρμογές σε μεγάλους κατασκευαστές. Στον τομέα της ναυπηγικής υπάρχει επίσης έρευνα, αλλά η εφαρμογή δεν έχει γίνει σε ευρεία κλίμακα. Η χρήση των δύο αυτών τεχνολογιών μπορεί να γίνει σε διάφορα στάδια της κατασκευής ενός σκάφους. Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει αναφορά στα στάδια που αφορούν το σχεδιασμό και την οργάνωση της γραμμής παραγωγής.

Η τεχνολογία VR επιτρέπει στον χρήστη μέσω κατάλληλης τεχνολογίας να περιηγηθεί σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο που είτε δεν έχει κατασκευαστεί ακόμη είτε βρίσκεται κάπου μακριά (Willett 2022). Αυτό μπορεί να επιτρέψει στον σχεδιαστή ενός ναυπηγείου να έχει τη δυνατότητα της άμεσης επικοινωνίας του σχεδίου με τον εκάστοτε πελάτη, διευκολύνοντας έτσι την κατανόηση από τη μεριά του πελάτη, της εικόνας και λειτουργίας του τελικού προϊόντος, με αποτέλεσμα τυχόν αλλαγές να γίνονται στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού. Επιπλέον, ο σχεδιαστής μπορεί να έχει μια καλύτερη εικόνα τόσο εργονομικά όσο και σε κατασκευαστικά προβλήματα που μπορεί να προέκυπταν στην πορεία. (Σχετικό [link](#))

Τεχνολογίες Επαυξημένης Πραγματικότητας μπορούν να αξιοποιηθούν στο στάδιο της οργάνωσης της παραγωγής, συνδυάζοντας δεδομένα από τα ψηφιακά μοντέλα και τον χώρο παρασκευής. Αυτό θα μπορούσε να επιτρέψει, για παράδειγμα, στον μηχανικό παραγωγής να προβλέψει γρηγορότερα ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν. Μια ακόμη πολύ χρήσιμη εφαρμογή της τεχνολογίας AR είναι η εκπαίδευση και ενημέρωση του τεχνικού προσωπικού για τυχόν αλλαγές στη γραμμή παραγωγής ή για τη γρηγορότερη εκπαίδευσή τους σχετικά με ένα νέο μηχάνημα ή ένα νέο μοντέλο προς κατασκευή. Τα δεδομένα γίνονται άμεσα διαθέσιμα μέσα από μία βάση δεδομένων στα γυαλιά που φοράει ο τεχνικός σε μορφή κειμένου ή με την οπτική και ηχητική αναπαράσταση ή με συνδυασμό των παραπάνω (Fraga-Lamas et al 2018). (Σχετικό [link](#) για εφαρμογή της τεχνολογίας AR σε οικοδομή)

3.2.4 Μέθοδος Kanban (ή Lean Manufacturing)

Η προέλευση της μεθόδου Kanban ή Lean Manufacturing είναι από την Ιαπωνία και έγινε παγκοσμίως γνωστή από την εφαρμογή της στην αυτοκινητοβιομηχανία της Toyota μέσω του μοντέλου TPS, όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα σύστημα οργάνωσης της ροής των εργασιών που επιτρέπει την αύξηση της αποδοτικότητας και τη μείωση της φύρας μέσα από μια καινοτόμα προσέγγιση της αντίληψης, τόσο των επιμέρους εργασιών που πρέπει να γίνουν όσο και του τρόπου με τον οποίο εργάζεται το σύνολο του ναυπηγείου προς την κατεύθυνση αυτή (kanbantool.com). Η μέθοδος αυτή μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα ναυπηγείο με την ένταξη υπολογιστικού προγράμματος και με την πλήρη και σαφή κατανόηση των βασικών τρόπων λειτουργίας της από τον μηχανικό παραγωγής και την ομάδα του.

Τα βασικά βήματα αυτής της προσέγγισης είναι τα εξής παρακάτω:

1. Οπτικοποίηση της ροής εργασιών

Σε αυτό το στάδιο όλες οι εργασίες, που πρέπει να ολοκληρωθούν προκειμένου να επιτευχθεί το τελικό αποτέλεσμα, οπτικοποιούνται σε έναν πίνακα (φυσικό ή ηλεκτρονικό). Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει διαφάνεια ανάμεσα στην ομάδα που έχει ως στόχο την οργάνωση της παραγωγής και γίνονται σαφή τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν.

2. Οριοθέτηση του αριθμού εργασιών που συμβαίνουν ταυτόχρονα

Χωρίς αυτό να σημαίνει και λιγότερη εργασία, με το να οριοθετούνται οι εργασίες που συμβαίνουν ανά πάσα χρονική περίοδο υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά, καλλιεργείται η κουλτούρα της ολοκλήρωσης μίας εργασίας, ελαχιστοποιείται το ρίσκο του να υπάρχουν ημιτελή προϊόντα που μπορεί εν τέλει να μην αξιοποιηθούν, μειώνεται η απραξία και ελαχιστοποιούνται οι συναντήσεις μεταξύ των μελών της οργανωτικής ομάδας, αφού καθένας έχει μια ξεκάθαρη εργασία χωρίς να εμπλέκεται στην εργασία των άλλων. Επιπλέον, με την προσέγγιση αυτή ελαχιστοποιούνται τόσο τα απορριφθέντα προϊόντα όσο και η ανάγκη για μεγάλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης τελικών προϊόντων, αφού κατασκευάζονται μόνο όσα χρειάζονται. Ειδικά το τελευταίο κομμάτι επηρεάζει ιδιαίτερα τα

ναυπηγεία, αφού τα τελικά προϊόντα είναι μεγάλων διαστάσεων και δύσκολα αποθηκεύονται μαζί.

3. Μέτρηση και διαχείριση της ροής εργασιών

Προκειμένου οι προθεσμίες παράδοσης ενός ναυπηγείου να τηρούνται χρειάζεται να μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και να προβλεφθεί ο χρόνος παρασκευής ενός σκάφους. Για να γίνει αυτό πιο εύκολο, χρειάζεται να είναι ομαλή η μεταβολή από σταθμό σε σταθμό της παραγωγής. Εδώ ο μηχανικός παραγωγής πρέπει να μπορεί να εντοπίσει τυχόν σημεία στα οποία η παραγωγή κολλάει και αυτό επιτυγχάνεται μέσω της παρατήρησης της ροής εργασιών.

4. Δημιουργία πολιτικής παραγωγής σε σαφή πλαίσια

Είναι σημαντικό πριν αρχίσει η παραγωγή ενός νέου σκάφους και των επιμέρους κομματιών που το απαρτίζουν να έχουν τεθεί σαφή πρότυπα ποιότητας και να έχουν διασαφηνιστεί οι κατασκευαστικές πρακτικές που θα ακολουθηθούν. Με αυτόν τον τρόπο, γλιτώνεται χρόνος και στην τελική επιθεώρηση και ελαχιστοποιούνται τα προϊόντα που απορρίπτονται.

5. Αναγνώριση των ευκαιριών για βελτίωση

Τέλος, είναι χρήσιμο να καθιερωθεί η πρακτική της βελτίωσης ως τρόπος λειτουργίας του ναυπηγείου. Πάντα υπάρχει χώρος για βελτιώσεις και αλλαγές τόσο στον τρόπο οργάνωσης όσο και στον τρόπο παραγωγής, αρκεί να έχει καλλιεργηθεί η κουλτούρα που επιτρέπει τη διαρκή εξέλιξη και συμμετοχή όλων προς αυτή την κατεύθυνση.

3.2.5 *Big Data / Data Processing / Cloud Computing / Artificial Intelligence (AI)*

Τεχνολογίες συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, υπολογιστικά νέφη και τεχνητή νοημοσύνη είναι στο επίκεντρο της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης. Αποτελούν κατά βάση το μέσο για να επιτευχθούν τα περισσότερα από όσα έχουν αναφερθεί προηγουμένως στο χώρο της βιομηχανίας και τα ναυπηγεία δεν να αποτελούν εξαίρεση. Το Ναυπηγείο 4.0 είναι ένα πλήρως ψηφιοποιημένο εργοστάσιο παραγωγής σκαφών που εκμεταλλεύεται τις παραπάνω τεχνολογίες, καθώς και άλλες που προκύπτουν από αυτές, προκειμένου να μπορέσει να βελτιστοποιήσει τόσο τη σχεδίαση των σκαφών όσο και την οργάνωση της γραμμής παραγωγής.

3.2.5.1 Big Data / Data Processing και Cloud Computing

Το ναυπηγείο, μέσω των τεχνολογιών ψηφιοποίησης, συλλέγει διαρκώς πληροφορίες σε μορφή δεδομένων. Από την ανανέωση των σχεδίων, την αλλαγή κάποιας παραγγελίας, την ενημέρωση σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση στον χώρο εργασίας και των μηχανημάτων, όλες αυτές οι πληροφορίες είναι αναγκαίο να μπορούν να παρουσιαστούν με κατάλληλο τρόπο και όσο πιο περιεκτικά γίνεται στους ανθρώπους του ναυπηγείου. Επιπλέον, ο όγκος

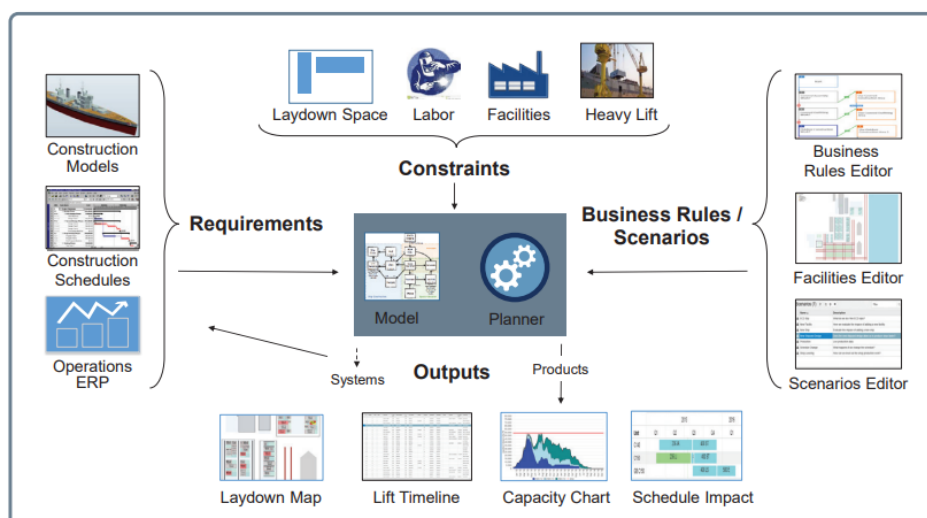
δεδομένων αυξάνεται κατά πολύ και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ανάγκες για συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία να γίνονται ολοένα και μεγαλύτερες. Υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους επιτρέπουν στο ναυπηγείο να μην περιορίζει τις δυνατότητές του ανάλογα με τις υπολογιστικές υποδομές που έχει. Τα τελευταία χρόνια πολλές εταιρίες στο χώρο της τεχνολογίας έχουν δημιουργήσει τα λεγόμενα κέντρα δεδομένων (data centers), τα οποία έχουν ως στόχο την παροχή χώρου αποθήκευσης και υπολογιστικής ισχύος, δίνοντας τη δυνατότητα στα ναυπηγεία να επενδύουν σε αυτές τις υπηρεσίες αντί να αναβαθμίζουν διαρκώς το δικό τους υπολογιστικό κέντρο. Βέβαια, κάποιες πληροφορίες ενδέχεται να είναι «ευαίσθητες» λόγω πνευματικής ιδιοκτησίας, οπότε η αναζήτηση κατάλληλου συνεργάτη (κέντρου δεδομένων) που να διασφαλίζει την προστασία των πληροφοριών είναι καίριας σημασίας.

3.2.5.2 Τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI)

Οι τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης, όπως και διάφορες προεκτάσεις τους (π.χ. μηχανική μάθηση), έχουν ήδη βρει εφαρμογή στον τομέα της οργάνωσης της παραγωγής με τη μορφή εξελιγμένων λογισμικών ERP (Enterprise Resource Planning). Τα λογισμικά αυτά έχουν τη δυνατότητα να συλλέγουν δεδομένα από διάφορα μέρη της παραγωγής (Shipyard AI της ProModel) (promodel.com) ή και να χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα που υπάρχουν στη διάθεση του ναυπηγείου (Floor2Plan της Floororganise) (floororganise.com) και να τα παρουσιάζουν με κατάλληλο και εύκολο για το χρήστη τρόπο. Τα μοντέλα πίσω από αυτά τα λογισμικά έχουν τη δυνατότητα να προβλέψουν τυχόν καθυστερήσεις ή προβλήματα στην παραγωγή, να τρέξουν υποθετικά σενάρια παραγωγής και να εντοπίσουν βελτιστοποιημένες λύσεις.

Στο Σχήμα 3-2 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας του λογισμικού Shipyard AI. Αρχικά ορίζονται οι απαιτήσεις (κατασκευαστικά σχέδια, κατασκευαστικό οργανόγραμμα), οι περιορισμοί (εγκαταστάσεις ναυπηγείου, υλικοτεχνικός εξοπλισμός, εργατικό δυναμικό) και οι κανονισμοί και οι στόχοι του ναυπηγείου. Στη συνέχεια, μέσω του μοντέλου παράγονται δεδομένα για τη διαρρύθμιση και οργάνωση του χώρου παραγωγής και την ίδια τη γραμμή παραγωγής. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να είναι οπτική αναπαράσταση της τρέχουσας κατάστασης στην παραγωγή και ενδεχόμενα προβλήματα που μπορεί να προκύψουν κατά την πορεία ή να αφορούν προσομοιώσεις ένταξης νέας γραμμής παραγωγής (πχ νέο σκάφος) με αναλυτικές πληροφορίες εφικτότητας.

Πέρα από τις προηγούμενες εφαρμογές εταιρειών, υπάρχουν και ανοιχτές πλατφόρμες που προσφέρουν τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης στο ευρύ κοινό. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η ιστοσελίδα os4ml.com (open space for machine learning), η οποία προσφέρει αλγορίθμους μηχανικής μάθησης για χρήστες που δεν έχουν κάποιο υπόβαθρο στην τεχνητή νοημοσύνη. Επιλέγοντας τα δεδομένα που θέλει να αναλύσει καθώς και τον αλγόριθμο που πιστεύει ότι προσεγγίζει καλύτερα το πρόβλημά του, ο χρήστης μπορεί εύκολα και γρήγορα να λάβει λύσεις σε διάφορα θέματα αξιοποιώντας τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του.



Σχήμα 3-2: Λογισμικό Shipyard AI

3.3 Εφοδιαστική Αλυσίδα και Οργάνωση – Logistics

Η διαδικασία της παραγγελίας των απαραίτητων πρώτων υλών ή και κομματιών από τους προμηθευτές καθώς και της οργάνωσης του ναυπηγείου - όσον αφορά τη διαρρύθμιση του χώρου και την οργάνωση των πρώτων υλών και κομματιών που παρασκευάζονται - αποτελεί ένα σημαντικό βήμα που συχνά παραβλέπεται ή γίνεται πρόχειρα στα αρχικά στάδια διαμόρφωσης του ναυπηγείου. Η κατάλληλη διαχείριση εφοδιασμού και οργάνωσης του χώρου και των προϊόντων σε συνδυασμό με τον καλό σχεδιασμό του προϊόντος προς κατασκευή και της σωστής οργάνωσης της γραμμής παραγωγής εξασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία του ναυπηγείου.

Ο εφοδιασμός με τα απαραίτητα υλικά και αναλώσιμα καθώς και η οργάνωση του ναυπηγείου σε θέματα αποθήκευσης πρώτων υλών, κομματιών υπό κατασκευή και τελικών προϊόντων μπορούν πλέον να ενσωματωθούν σε ένα κεντρικό σύστημα που λαμβάνει διαρκώς πληροφορίες από όλα τα στάδια της παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η πλήρης διαφάνεια όλων των διαδικασιών και ελαττώνεται η πιθανότητα λανθασμένων χειρισμών που οδηγούν σε αυξημένους χρόνους παραγωγής ή και σε σπατάλη πρώτων υλών. Οι τεχνολογίες που μπορούν να οδηγήσουν ένα ναυπηγείο σε ένα τέτοιο στάδιο οργάνωσης τόσο της εισερχόμενης (inbound, Κεφ.2) όσο και της εξερχόμενης (outbound) εφοδιαστικής διαδικασίας είναι προηγμένα συστήματα ERP (Enterprise Resource Planning) με τη συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης, των ρομπότ και cobots που επιτρέπουν την εύκολη και αυτόματη διαχείριση και μεταφορά των υλικών εντός του ναυπηγείου και τεχνολογιών καταγραφής, ταυτοποίησης και εντοπισμού (π.χ. RFID), ώστε να διασφαλίζεται η σωστή διαχείριση των πρώτων υλών αλλά και των κομματιών ή εργαλείων και αναλώσιμων.

3.3.1 ERP systems / MES

Σύγχρονα συστήματα ενδοεπιχειρησιακού σχεδιασμού (Enterprise Resource Planning-ERP) και MES (Manufacturing Execution System) μπορούν σε συνδυασμό με τεχνολογίες

του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), Τεχνητής Νοημοσύνης και συστήματα καταγραφής και ταυτοποίησης (Auto-ID systems) να οδηγήσουν σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα καταγραφής της προόδου παραγωγής και των εφοδίων σε πραγματικό χρόνο.

Από τη στιγμή που στη γραμμή παραγωγής μπαίνει ένα νέο σκάφος προς κατασκευή, θα πρέπει να συνυπολογιστούν στον κατάλογο των υλικών (bill of materials - BoM) τόσο οι επιπλέον ποσότητες από υλικά που ήδη παραγγέλνονται, όπως ρητίνες, υφάσματα και αναλώσιμα, όσο και των νέων υλικών και προϊόντων που θα πρέπει να προστεθούν στον υπάρχοντα κατάλογο των υλικών. Η εταιρεία CNB έχει καταφέρει μέσα από την αξιοποίηση τεχνολογιών IoT να συνδέσει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες από το στάδιο της σχεδίασης στο στάδιο της κατασκευής, δημιουργώντας τους καταλόγους υλικών eBoM (engineering Bill of Materials) και mBoM (manufacturing Bill of Materials) (Schuh et al 2020). Ο πρώτος προκύπτει στη φάση του σχεδιασμού, όπου οι μηχανικοί επιλέγουν τον εξοπλισμό που θα μπει πάνω στο σκάφος και στη συνέχεια δημιουργείται αυτομάτως ο δεύτερος, ο οποίος αφορά τους εμπλεκόμενους στην παρασκευή του σκάφους. Έτσι, επιτυγχάνεται απρόσκοπτα και ταυτόχρονα η σύνδεση μεταξύ σχεδιασμού και κατασκευής και αποφεύγονται οι λανθασμένες παραγγελίες. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο εδάφιο, να γίνει προσομοίωση της νέας αυτής προσθήκης με τη χρήση ERP συστημάτων που αξιοποιούν τεχνολογίες AI. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να αναθεωρηθούν οι χώροι αποθήκευσης, τόσο των υλικών όσο και των προϊόντων και η αλληλουχία διαφόρων διαδικασιών, όπως είναι η χρήση ανυψωτικών μηχανημάτων ή η χρήση του χώρου σκλήρυνσης των πολύστρωτων που είναι περιορισμένος, προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

3.3.2 Ρομπότ (Logistic Robots) και Cobots

Τα ρομπότ, αν και αποτελούν τρόπο αυτοματοποίησης της γραμμής παραγωγής εργοστασίων ήδη από την 3^η Βιομηχανική Επανάσταση, τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να αξιοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό σε διαδικασίες αποθήκευσης και μεταφοράς εντός των χώρων εργασίας. Μικρά ναυπηγεία μπορούν να επωφεληθούν από τις εξελίξεις σε αυτό τον τομέα, αφού έχει αρχίσει να γίνεται πιο προσιτός για μεσαίου και μικρού μεγέθους επιχειρήσεις.

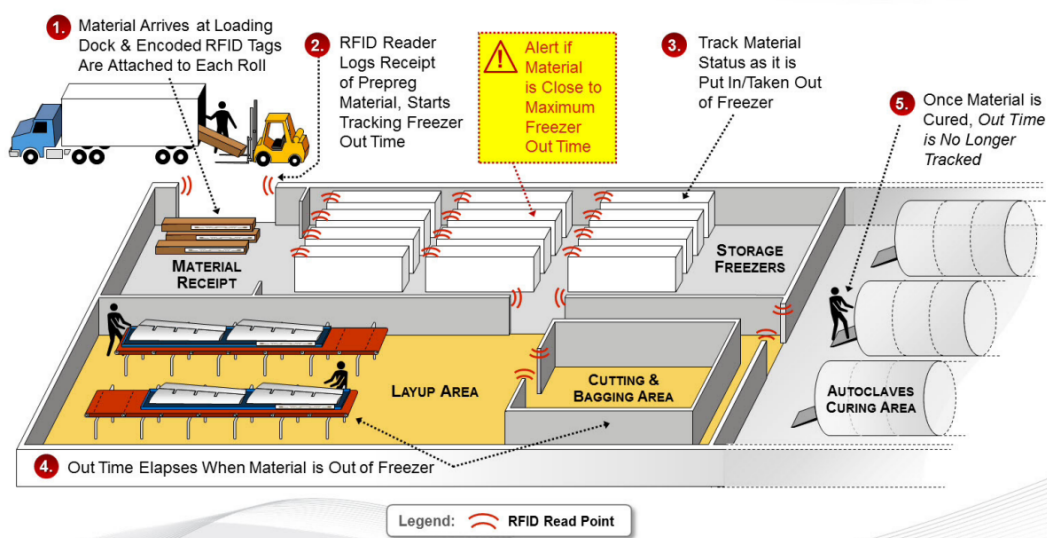
Τόσο η Boston Consulting Group όσο και η McKinsey (Mecalux 2022 interlakemecalux.com/), συμβουλευτικές εταιρείες που ασχολούνται με θέματα τεχνολογίας, προβλέπουν μέσα από τεχνικοοικονομικές εκθέσεις ότι ολοένα και περισσότερες εταιρείες θα αναζητούν λύσεις αυτοματοποίησης της αποθήκευσης και μεταφοράς εντός των αποθηκών και των εργοστασίων. Τα ναυπηγεία μπορούν με τη σειρά τους, αξιοποιώντας ρομπότ, που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην αγορά, να εκμηδενίσουν τα λάθη στη στοιβαγία και να αυξήσουν την αποδοτικότητά τους με την εξάλειψη χρονοβόρων διαδικασιών εύρεσης και μεταφοράς υλικών και εργαλείων.

3.3.3 Τεχνολογίες Καταγραφής, Ταυτοποίησης και Εντοπισμού (Auto-ID Systems & RTLS)

Όπως κάθε άλλη διαδικασία στο Ναυπηγείο 4.0, έτσι και ο εφοδιασμός, η αποθήκευση και η οργάνωση όλων των υλικών εντός του ναυπηγείου θα πρέπει να μπορούν να εντοπίζονται και να καταγράφονται σε μία ψηφιακή πλατφόρμα. Τεχνολογίες εκμεταλλευόμενες την κοντινή ασύρματη σύνδεση (short-range wireless technologies), όπως οι RFID, NFC και Bluetooth δίνουν τη δυνατότητα για τέτοιου είδους καταγραφές. Ανάλογα με το προϊόν, μπορεί να αξιοποιηθεί διαφορετική τεχνολογία προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στο παρακάτω Σχήμα 3-3 απεικονίζεται μια γραμμή παραγωγής που αξιοποιεί τεχνολογίες RFID ώστε να γίνεται η καταγραφή και ο εντοπισμός διαφόρων υλικών και διαδικασιών.

Σημαντικοί παράγοντες που θα πρέπει να εκτιμηθούν πριν από την αξιοποίηση τεχνολογιών RFID είναι οι εξής (Morgan 2021):

- Επιλογή κατάλληλων ετικετών που θα τοποθετούνται στα διάφορα αντικείμενα για την ταυτοποίησή τους.
- Τοποθέτηση των ετικετών σε κατάλληλα σημεία. Διάφορα υλικά ενδέχεται να εμποδίζουν/ανακλούν τα ραδιοσήματα.



Σχήμα 3-3: Αξιοποίηση RFID (https://www.rfidjournal.com/wp-content/uploads/2021/05/115_Jim_Morgan_Presentation.pdf)

- Τοποθέτηση κεραιών σε κατάλληλα σημεία, ώστε να λαμβάνουν επιτυχώς τα σήματα από τις ετικέτες.
- Κατάλληλος προσχεδιασμός και μελέτη της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας RFID, για να διασφαλιστεί η συμβατότητα με το υπάρχον σύστημα οργάνωσης (ERP ή MES)

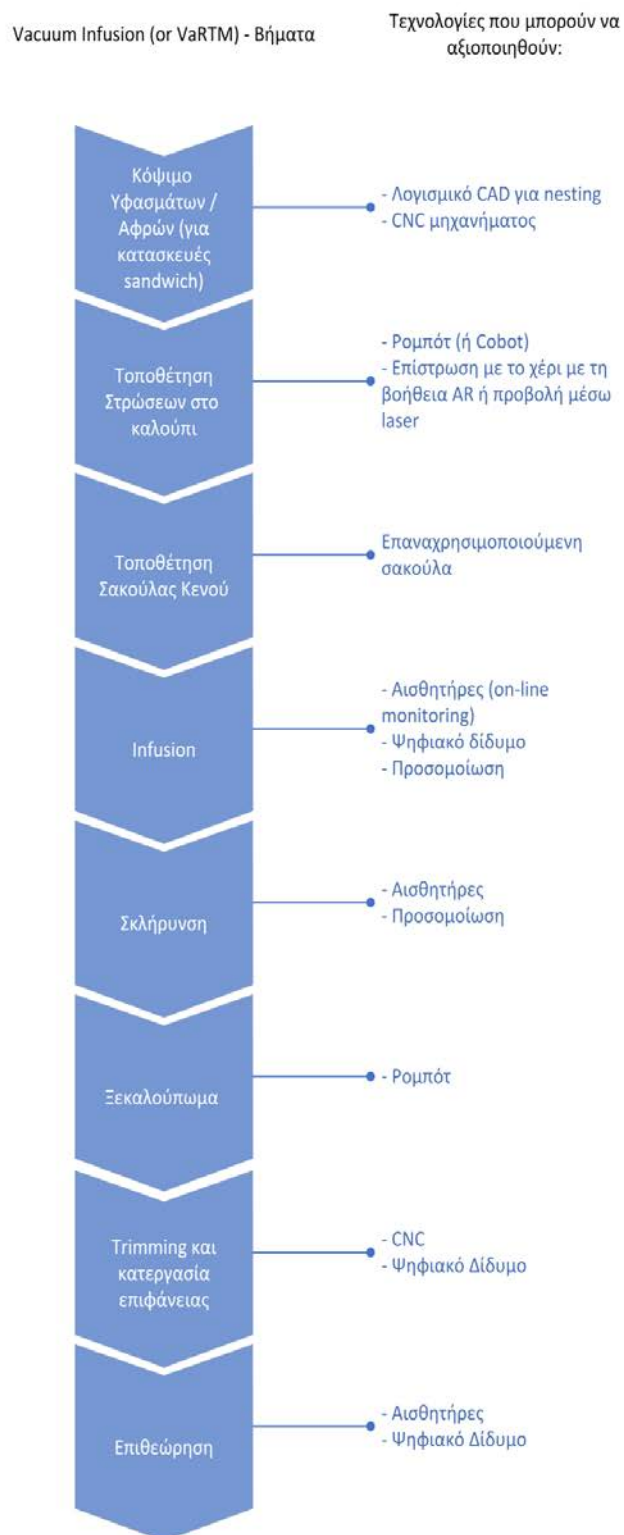
3.4 Στάδιο παραγωγής – Ναυπηγεία πλαστικών σκαφών

Ο συνηθέστερος τρόπος κατασκευής σκαφών από σύνθετα υλικά είναι ο «single skin construction», στον οποίο η γάστρα και το κατάστρωμα είναι δύο πολύστρωτες πλάκες ή/και κελύφη που στη συνέχεια κολλούνται μεταξύ τους (Τσούβαλης 1998). Στο κατάστρωμα, βέβαια, και σε άλλες επίπεδες επιφάνειες, όπως οι φρακτές και οι οροφές, χρησιμοποιείται και η κατασκευή τύπου «sandwich» με τη χρήση ελαφρών πυρήνων και την εξωτερική επίστρωση (2 επιφάνειες) με FRP, επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη ακαμψία και μικρότερο βάρος λόγω του αυξημένου πάχους της κατασκευής. Η κατασκευή των πολύστρωτων στη ναυπηγική σήμερα συνήθως συμβαίνει με δύο τρόπους: είτε με τη μέθοδο της επίστρωσης με το χέρι είτε με τη χρήση της μεθόδου μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ (Vacuum Infusion ή Vacuum assisted Resin Transfer Moulding VaRTM). Η πρώτη μέθοδος απαιτεί εκτεταμένη χειρωνακτική εργασία και εμπειρία του τεχνικού προσωπικού για το βέλτιστο αποτέλεσμα. Από την άλλη μεριά, η δεύτερη μέθοδος (VaRTM) δίνει τη δυνατότητα για υψηλή κατασκευαστική ακρίβεια και επαναληψιμότητα λόγω της δυνατότητας για αυτοματοποίηση μέρους ή ολόκληρης της διαδικασίας. Επιπλέον, κατά την διάρκεια της μεθόδου αυτής οι τεχνίτες δεν περιορίζονται από τον ωφέλιμο για εργασία χρόνο της ρητίνης (pot life), οπότε επιτυγχάνεται καλύτερη τοποθέτηση των στρώσεων στο τελικό σκάφος.

3.4.1 Μορφοποίηση με έγχυση ρητίνης σε κενό

Με γνώμονα τα παραπάνω πλεονεκτήματα της μεθόδου μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ έναντι της κλασικής μεθόδου επίστρωσης με το χέρι, καθώς και τη δυνατότητα αυτοματοποίησης αυτής, θα γίνει εστίαση σε τεχνολογίες που μπορούν να τη συνοδεύσουν και να καταστήσουν τη γραμμή παραγωγής ενός ναυπηγείου πλαστικών σκαφών αυτοματοποιημένη (μερικώς ή ολικώς). Στο παρόν υποεδάφιο θα γίνει αναφορά σε ναυπηγεία και τεχνολογίες που κατασκευάζουν σκάφη με μέγεθος 40-50 μέτρα περίπου, μιας και αυτό αποτελεί το «όριο» που προκύπτει κατασκευαστικά για τα μονολιθικά σκάφη από σύνθετα υλικά. Στο επόμενο εδάφιο θα γίνει αναφορά σε τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν από ναυπηγεία που αποσκοπούν να ναυπηγήσουν μεγαλύτερα σκάφη, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κατασκευής της γάστρας κατά τομείς, που χρησιμοποιείται και στα μεγάλα μεταλλικά σκάφη. Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιείται εκτενώς προς το παρόν στην κατασκευή πλοίων από σύνθετα υλικά και για αυτό λόγο κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθεί σε ξεχωριστό εδάφιο.

Στο παρακάτω Σχήμα 3-4 φαίνονται αριστερά τα βήματα μιας τυπικής γραμμής παραγωγής ενός ναυπηγείου πλαστικών σκαφών που αξιοποιεί τη μέθοδο μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ και δεξιά αναγράφονται τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν για την αυτοματοποίηση του εκάστοτε βήματος. Ακολουθεί περιγραφή του τρόπου αξιοποίησης αυτών των τεχνολογιών.



Σχήμα 3-4: Βήματα διαδικασίας της μεθόδου μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ – Vacuum Infusion

3.4.1.1 Κόψιμο υφασμάτων

Η παραγωγή ενός πλαστικού σκάφους ξεκινάει με το κόψιμο των υφασμάτων στις κατάλληλες διαστάσεις προκειμένου να δημιουργηθούν τα διάφορα πολύστρωτα (π.χ. γάστρα, κατάστρωμα, φρακτές, ενισχυτικά τύπου καπέλου κ.ά.). Η διαδικασία συνήθως γίνεται χειρωνακτικά με τη χρήση ψαλιδιών. Αυτό συμβαίνει επειδή τα στεγνά υφάσματα (dry fabrics), που χρησιμοποιούνται κατά βάση στη δημιουργία πολύστρωτων, μπορούν να παραμορφωθούν κατά τη διάρκεια της κοπής τους. Τα στεγνά υφάσματα θεωρούνται ασταθή κατά το κόψιμο, διότι οι δυνάμεις κοπής μπορούν να κάμψουν και να εκτοπίσουν τα νήματα από τα οποία αποτελούνται. Μόλις κοπεί ένα ύφασμα, χάνει την ευστάθεια στις άκρες που κόπηκε και μπορεί εύκολα να ξεφτίσει. Η κατάλληλη σταθεροποίηση και το ράψιμο μερικά χιλιοστά εσωτερικά του πλαισίου κοπής μπορεί να ελαχιστοποιήσει την εμφάνιση ατελειών στο ύφασμα (Snape et al 2018).

Πλέον, υπάρχουν προγράμματα CAD, που μπορούν να διαμορφώσουν το λεγόμενο «nesting» στις εκάστοτε διαστάσεις υφάσματος, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της φύρας. Τα ίδια λογισμικά υπάρχουν και στα ναυπηγεία μεταλλικών σκαφών για το κόψιμο των λαμαρινών. Με τη χρήση ειδικού μηχανήματος CNC, που λαμβάνει τις οδηγίες για κόψιμο από το CAD λογισμικό, γίνεται το κόψιμο των υφασμάτων. Το κόψιμο των στεγνών υφασμάτων συμβαίνει κυρίως με ειδικά μηχανήματα κοπής που χρησιμοποιούν ως κοπτικό μέσο μία λεπίδα που κινείται είτε κατακόρυφα είτε περιστροφικά (λιγότερο συνηθισμένη λύση) όπως φαίνονται και στο Σχήμα 3-5.



Σχήμα 3-5: Κοπτικά εργαλεία σύνθετων (stylecnc.com/)

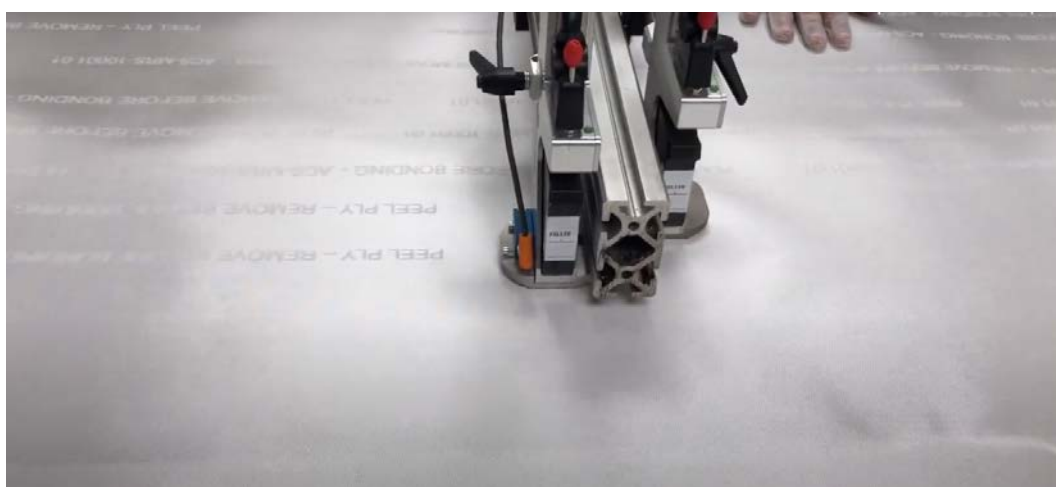
Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές κοπτικών μέσων οι οποίες, ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται, κρίνονται καταλληλότερες. Στο Σχήμα 3-6 που ακολουθεί φαίνονται δύο διαφορετικά κοπτικά εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το κόψιμο υφασμάτων. Το εργαλείο αριστερά κρίνεται κατάλληλο για την κοπή υφασμάτων από γυαλί και αραμίδιο

και μπορεί να λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ταχύτητες, ανάλογα με το υλικό που πρέπει να κόψει, ενώ το εργαλείο δεξιά είναι κατάλληλο για την κοπή υφασμάτων από ίνες γυαλιού ή ίνες άνθρακα αξιοποιώντας κοπτικό δίσκο που περιστρέφεται σε υψηλές στροφές.



Σχήμα 3-6: Κοπτικά εργαλεία (stylecnc.com/)

Μαζί με το κόψιμο των υφασμάτων μπορεί να συνδυαστεί και η τοποθέτηση κάποιου είδους ετικέτας. Αυτή η ετικέτα μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη καταγραφή όλης της διαδικασίας, την εύρεση των κομμένων υφασμάτων και την αξιοποίησή τους σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα που μπορεί να υποδεικνύει στον εκάστοτε χειριστή, τη θέση και τον προσανατολισμό που πρέπει να έχει το ύφασμα όταν τοποθετείται στο καλούπι (π.χ. PlyMatch, Κεφ.2). Η τεχνολογία Thermal Inkjet Printing έχει ήδη εφαρμοστεί για την εκτύπωση λέξεων πάνω σε υφάσματα γυαλιού (Σχήμα 3-7) και μια παραλλαγή της θα μπορούσε να είναι η εκτύπωση ενός 1D ή 2D κώδικα, όπως τα Barcodes ή τα QR codes και με τη χρήση ενός σκάνερ να εμφανίζονται οι πληροφορίες σε μία οθόνη και ταυτόχρονα να ενημερώνεται το πρόγραμμα MES για το στάδιο στο οποίο βρίσκεται.



Σχήμα 3-7: Εκτύπωση γραφικών χαρακτήρων με τη χρήση τεχνολογίας Thermal Inkjet Printing (codetechcorp.com/)

3.4.1.2 Πριν την τοποθέτηση των υφασμάτων στο καλούπι

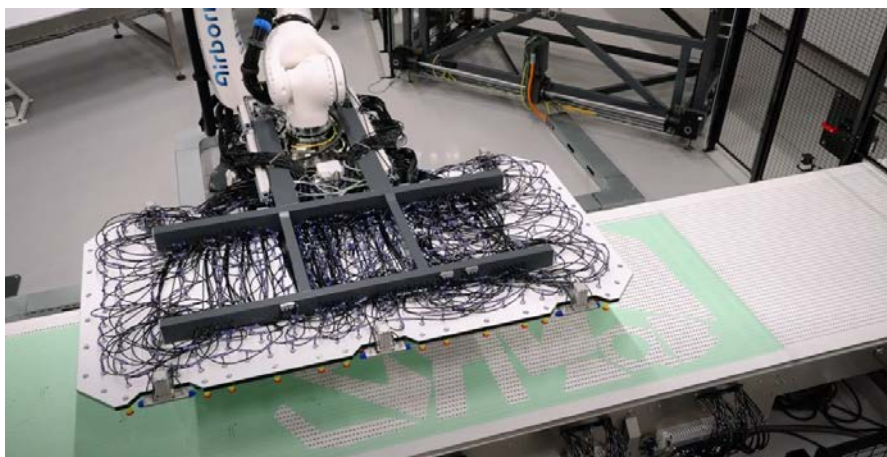
Μία άλλη λύση σε αυτό το στάδιο της παραγωγής είναι η αξιοποίηση της τεχνικής kitting, που ήδη εφαρμόζεται στον τομέα της αεροδιαστημικής βιομηχανίας σε γραμμή παραγωγής προϊόντων από σύνθετα υλικά. Η μέθοδος kitting στον κατασκευαστικό τομέα είναι διαδικασία της λήψης και παράδοσης όλων των απαραίτητων κομματιών για τη συναρμολόγηση του τελικού προϊόντος, η παράδοση ουσιαστικά ενός kit με όλα τα απαραίτητα υλικά. Παρακάτω θα γίνει αναφορά σε δύο εταιρείες που έχουν δημιουργήσει τέτοιες λύσεις.

Η εταιρία Airborne έχει δημιουργήσει το σύστημα Automated Kitting, με σκοπό την εξάλειψη των ανθρώπινων λαθών, την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση της φύρας (airborne.com/). Το σύστημα της αποτελείται από τρία στάδια:

1. Κοπή υφασμάτων σε δικό τους μηχάνημα (Σχήμα 3-8)
2. Τη μεταφορά των κομμένων υφασμάτων από το μηχάνημα κοπής με τη χρήση cobots (Σχήμα 3-9)
3. Την τοποθέτηση των υφασμάτων στο κατάλληλο kit ανάλογα με την αλληλουχία που θα δημιουργηθεί το πολύστρωτο (Σχήμα 3-10)



Σχήμα 3-8: Κοπή υφασμάτων



Σχήμα 3-9: Μεταφορά κομμένων υφασμάτων με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα



Σχήμα 3-10: Τοποθέτηση κομμένων υφασμάτων στο κατάλληλο kit

Στη συνέχεια, ο τεχνικός μπορεί να παραλάβει το ολοκληρωμένο kit και με τη χρήση μηχανήματος που προβάλλει την αρίθμηση με την οποία πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα κομμένα υφάσματα (Σχήμα 3-11), να αρχίσει να τα τοποθετεί επάνω στο καλούπι.



Σχήμα 3-11: Προβολή αρίθμησης πάνω στα υφάσματα με τη χρήση προτζέκτορα

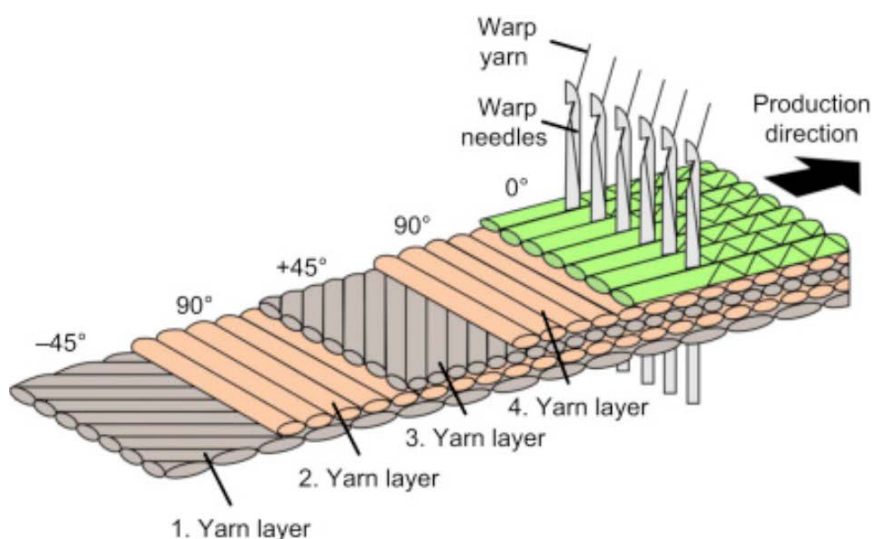
Η εταιρία Loop Technologies ενσωματώνει αντίστοιχες διεργασίες στο σύστημα kitting της και επιτρέπει τα εξής ακόλουθα να ολοκληρωθούν αυτόματα (looptechnology.com/)

1. Τροφοδοσία του μηχανήματος κοπής
2. Μηχάνημα κοπής της εταιρείας
3. Αποθήκευση των κομμένων υφασμάτων
4. Ικανότητα για εντοπισμό των κομμένων υφασμάτων μέσω οπτικού συστήματος

Οι δύο παραπάνω εταιρίες προσφέρουν ολοκληρωμένες λύσεις για ολόκληρη την γραμμή παραγωγής, οπότε θα γίνει ξανά αναφορά σε αυτές και παρακάτω.

Η εταιρία SAERTEX, που εξειδικεύεται στα υφάσματα NCF (Non-Crimp Fabric), έχει τη δυνατότητα να παρασκευάσει η ίδια τα κομμένα υφάσματα (preforms) στις ανάγκες του πελάτη και να τα αποστείλει (kitting), στοχεύοντας πάλι στη μείωση της φύρας και την αύξηση της παραγωγικότητας του πελάτη (saertex.com/). Τα Non-Crimp Fabrics (Σχήμα 3-12) αποτελούνται από μία ή περισσότερες στρώσεις ινών με διαφορετικούς προσανατολισμούς και συγκρατούνται μεταξύ τους με ένα δευτερεύον νήμα που δεν προσφέρει στην κατασκευαστική αντοχή, αλλά επιτρέπει τη διατήρηση των στρώσεων στη σωστή θέση, χωρίς να υπάρχουν δηλαδή εκτοπίσεις ινών ή στρώσεων.

Η εταιρία SP-High Modulus, που ανήκει στην Gurit, έχει δημιουργήσει επίσης μία υπηρεσία kitting, το πρόγραμμα B³ SmartPac. Η υπηρεσία αυτή προσφέρει σε πακεταρισμένη μορφή (kit) τα υφάσματα και τα ενισχυτικά υλικά του πυρήνα κομμένα στο σχήμα που απαιτείται και με τις απαραίτητες ενδείξεις πάνω για τη θέση και τον προσανατολισμό τους (Rush 2017).



Σχήμα 3-12: Διάταξη Non-Crimp Fabric (Schrank 2017)

Ένα ναυπηγείο μικρού και μεσαίου μεγέθους μπορεί να επωφεληθεί από μία υπηρεσία kitting εκμεταλλευόμενο τα εξής πλεονεκτήματα (gurit.com/)

- Μειωμένους χρόνους χρήσης του καλουπιού, αφού η τοποθέτηση γίνεται πιο γρήγορα
- Μειωμένα κόστη σε εργασίες

- Μειωμένη φύρα
- Μειωμένα κόστη υλικών

3.4.1.3 Τοποθέτηση Υφασμάτων στο καλούπι

Η τοποθέτηση υφασμάτων στο καλούπι μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ρομπότ, ώστε να υπάρξει περαιτέρω αυτοματοποίηση της διαδικασίας. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, καθώς και σε άλλους τομείς της βιομηχανίας σύνθετων, όπως είναι η παραγωγή ανεμογεννητριών, γίνεται αρκετή προσπάθεια για αυτοματοποίηση της διαδικασίας τοποθέτησης υφασμάτων, προκειμένου να εξαλειφθεί ο ανθρώπινος παράγοντας.

Η χρήση των ρομπότ για αυτή τη διαδικασία απαιτεί κυρίως δύο πράγματα. Πρώτον, την ύπαρξη κατάλληλου μηχανισμού (τελικού τελεστή – end effector), όπως έχει γίνει ήδη αναφορά στο 2^ο Κεφάλαιο, καθώς και του κατάλληλου λογισμικού που μπορεί να ελέγχει ότι τα υφάσματα δεν παραμορφώνονται κατά τη διάρκεια τοποθέτησής τους. Προς το παρόν, δεν υπάρχει κάποιο σύστημα αρκετά ανεπτυγμένο και σε στάδιο εμπορικής χρήσης που να μπορεί να αξιοποιηθεί σε ναυπηγεία πλαστικών σκαφών, αλλά δεδομένων των τεχνολογικών εξελίξεων είναι θέμα χρόνου να γίνουν και οι πρώτες εφαρμογές.

Χρήση τεχνολογιών Επαυξημένης Πραγματικότητας (AR)

Μία εναλλακτική λύση, πολύ πιο προσιτή στην παρούσα φάση για ένα ναυπηγείο, είναι η αξιοποίηση τεχνολογιών επαυξημένης πραγματικότητας (AR). Η εταιρία Anaglyph, που κατασκευάζει το λογισμικό PlyMatch, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, θα αποτελούσε μια πολύ καλή και οικονομική λύση για ένα ναυπηγείο μεσαίου και μεγάλου μεγέθους που αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας των σκαφών και ταυτόχρονα στην ελαχιστοποίηση του χρόνου που απαιτείται για τη σωστή τοποθέτηση των υφασμάτων. Η παραπάνω τεχνολογία γίνεται απαραίτητη, αν απαιτείται υψηλή ποιότητα στο τελικό πολύστρωτο, αλλά δεδομένου ότι η ναυπηγική εξακολουθεί να χρησιμοποιεί μεγάλους συντελεστές ασφάλειας στις κατασκευές, ίσως να την καθιστά περιττή προς το παρόν.

3.4.1.4 Τοποθέτηση σακούλας

Η μέθοδος μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ για την παρασκευή πολύστρωτων απαιτεί τη χρήση πολλών αναλώσιμων, ένα εκ των οποίων είναι και το διαφανές ελαστικό διάφραγμα ή μεμβράνη (vacuum bag) που καλύπτει όλο το πολύστρωτο για τη δημιουργία του κενού. Μια εταιρία παρασκευής πλαστικών ιστιοπλοϊκών σκαφών ονόματι Fulcrum στην Αμερική έχει καταφέρει να ενσωματώσει επιτυχώς στη γραμμή παραγωγής της επαναχρησιμοποιούμενες μεμβράνες από σιλικόνη (silicone bags) (Σχήματα 3-13 έως 3-16) για τη διαδικασία της μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ. Με αυτόν τον τρόπο έχει καταφέρει να μειώσει κοντά στο 90% τη χρήση αναλωσίμων που χρειάζονται για αυτή τη διαδικασία, όπως είναι η μεμβράνη και οι σωλήνες τροφοδοσίας (infusion lines) (Σχήμα 3-14) αλλά και αναρρόφησης (suction lines), όπου δημιούργησαν κατάλληλες διαμορφώσεις

(κοιλότητες) εντός της μεμβράνης, καθώς και την κολλητική ταινία, όπου χρησιμοποίησαν πολλαπλές πένσες τύπου grip (Grips) περιμετρικά του καλουπιού για να διασφαλίσουν τη στεγανότητα του συστήματος. Τα καλούπια παρουσιάζουν μια πιο πλατιά διαμόρφωση στη φλάντζα τους προκειμένου οι πένσες να κάνουν καλή επαφή. (Porter 2020)



Σχήμα 3-13: Μεμβράνη από σιλικόνη ενώ είναι σηκωμένη μέσω κατάλληλης διάταξης



Σχήμα 3-14: Κάτοψη της μεμβράνης: αριστερά φαίνονται οι πένσες grip και η διάταξη για την ανύψωση της μεμβράνης, κεντρικά και δεξιά φαίνονται τα διαμήκη κανάλια που επιτρέπουν τη ροή της ρητίνης



Σχήμα 3-15: Διαδικασία ανοίγματος των σωλήνων τροφοδοσίας



Σχήμα 3-16: Έλεγχος των σωλήνων τροφοδοσίας και διακοπή ροής όπου χρειάζεται, ανάλογα με το μέτωπο της ρητίνης

Η διαδικασία ένταξης όλων των παραπάνω στη γραμμή παραγωγής είναι αρκετά χρονοβόρα και απαιτεί τεχνογνωσία και μεγάλο αρχικό κόστος. Οι τεχνίτες που ασχολούνται με την συγκεκριμένη διεργασία πρέπει να είναι άρτια καταρτισμένοι και εξοικειωμένοι με τη διαδικασία για το εκάστοτε καλούπι, το οποίο φέρει τις δικές του ιδιαιτερότητες. Επιπλέον, η κατασκευή της μεμβράνης πρέπει να γίνει πάνω στο καλούπι για να μην προκύψουν λάθος διαστάσεις. Αν και τα αρχικά τα μειονεκτήματα φαίνονται αρκετά και ίσως αποτρεπτικά για ένα ναυπηγείο, τα πλεονεκτήματα σε δεύτερο χρόνο έρχονται για να αναπληρώσουν την αρχική δαπάνη χρόνου και κεφαλαίου. Τα έξοδα για αναλώσιμα μειώνονται δραστικά και στο τέλος καθίσταται μία πιο οικονομική λύση, αρκετά πιο φιλική προς το περιβάλλον. Η μεμβράνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοντά 300 φορές, δεν περιορίζεται από την ύπαρξη φρακτών, ενισχυτικών ή γωνιών και δημιουργεί καλύτερη επιφάνεια (στην πλευρά που ακουμπάει) από τις συνηθισμένες μεμβράνες (mositesrubber.com/) Επίσης, ο χρόνος προετοιμασίας για τη διαδικασία μειώνεται αισθητά.

3.4.1.5 Διαδικασία έγχυσης της ρητίνης

Η διαδικασία έγχυσης της ρητίνης έως το πέρας του πολυμερισμού και συνακόλουθα της σκλήρυνσής (curing) της αποτελεί το πιο σημαντικό βήμα της διαδικασίας και απαιτεί

ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου το τελικό αποτέλεσμα να είναι το επιθυμητό και να μην υπάρχουν αστοχίες. Μία τεχνική που μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την πρόοδο της έγχυσης ρητίνης είναι η χρήση τεχνολογιών, όπως αισθητήρων συνεχούς ρεύματος DC, για την παρακολούθηση της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο (Online Process Monitoring), όπως έχει ήδη αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2. Οι αισθητήρες αυτοί βρίσκονται εντός του πολύστρωτου και ενώ αυτό εμποτίζεται αντλούν χρήσιμες πληροφορίες, τόσο για το μέτωπο της ρητίνης και το ιξώδες της όσο και για το επίπεδο πολυμερισμού της, παράγοντες που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο. Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν οι αισθητήρες διηλεκτρικής ανάλυσης (DEA) έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 2.4.4. Αυτή η διαδικασία μπορεί να γίνει τις πρώτες φορές που ένα νέο μοντέλο εντάσσεται στη γραμμή παραγωγής ενός ναυπηγείου. Με αυτό τον τρόπο καταγράφονται τυχόν ιδιαιτερότητες του εκάστοτε καλουπιού και σε συνδυασμό με τεχνολογίες Ψηφιακών Διδύμων αλλά και τη χρήση αρχικών προσομοιώσεων μπορεί να καταστεί πλέον πιο εύκολη η διαδικασία, χωρίς να απαιτεί την διαρκή παρουσία ενός έμπειρου τεχνίτη ή μηχανικού και αυτοματοποιώντας τα χρονικά σημεία ανοίγματος-κλεισίματος παροχών ρητίνης.

3.4.1.6 Σκλήρυνση ρητίνης

Για την σκλήρυνση της ρητίνης, όπως και για την έγχυσή της, μπορούν να αξιοποιηθούν τεχνολογίες αισθητήρων για online process monitoring. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν επίσης να τροφοδοτούνται στο ψηφιακό δίδυμο της διαδικασίας μορφοποίησης με έγχυση ρητίνης εν κενώ και να ψηφιοποιούν περαιτέρω τη διαδικασία, επιτρέποντας τόσο την επίβλεψη της διαδικασίας αποκεντρωμένα και όχι αναγκαστικά στον ίδιο χώρο όσο και τη βελτιστοποίησή της, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες της ρητίνης και κατ'επέκταση του πολύστρωτου.

3.4.1.7 Ξεκαλούπωμα

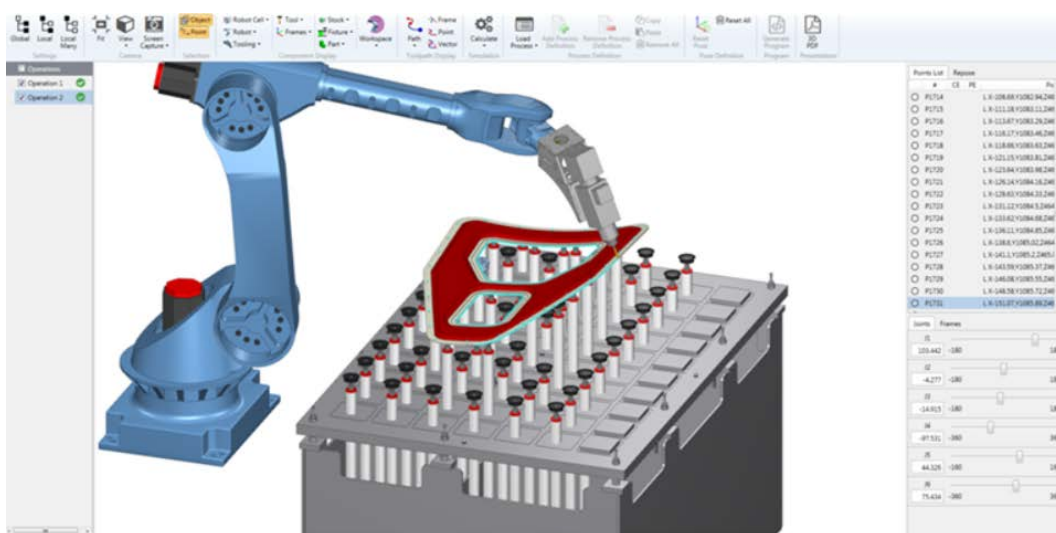
Για το ξεκαλούπωμα χρησιμοποιούνται ήδη γερανογέφυρες, ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλα κομμάτια όπως οι γάστρες. Μικρότερες κατασκευές θα μπορούσαν να ξεκαλουπώνονται με τη χρήση ρομπότ ή cobots εξοπλισμένων με τους κατάλληλους τελικούς τελεστές.

3.4.1.8 Τριμάρισμα (Κόψιμο – Trimming) και τελική διαμόρφωση

Τα πολύστρωτα (όπως η γάστρα και το κατάστρωμα), αφού πολυμεριστούν πλήρως, χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία προτού προχωρήσουν στη γραμμή παραγωγής για την τελική συναρμολόγηση.

Το κόψιμο του περιττού υλικού περιφερειακά του πολύστρωτου είναι μια διαδικασία που μπορεί να ολοκληρωθεί με τη βοήθεια μίας CNC φρέζας. Ο κώδικας που αξιοποιεί η φρέζα μπορεί να παραχθεί αυτόματα από ένα λογισμικό CAD/CAM και στη συνέχεια - με

κατάλληλη τοποθέτηση εντός του χώρου της φρέζας, ώστε να είναι γνωστή η σχετική θέση του πολύστρωτου (καλιμπράρισμα) - μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία κοπής (Σχήμα 3-17). Με τον ίδιο τρόπο, πάλι με τη χρήση λογισμικού CAD/CAM μπορούν να δοθούν αυτομάτως οδηγίες στη φρέζα για τα απαραίτητα ανοίγματα που πρέπει να δημιουργηθούν στο κομμάτι (π.χ. φινιστρίνια, ανοίγματα για τη διέλευση καλωδίων ή σωληνώσεων). Η διαδικασία αυτή μπορεί πέρα από μηχανικό τρόπο, μέσω φρέζας, να γίνει και με τη χρήση μηχανήματος υδροκοπής. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τη διάρκεια κοπής του πολύστρωτου, γιατί μπορεί να οδηγήσει σε απόρριψη της κατασκευής αν υπάρξει αποκόλληση των στρώσεων (delamination) ή καταστροφή της επιφάνειας.

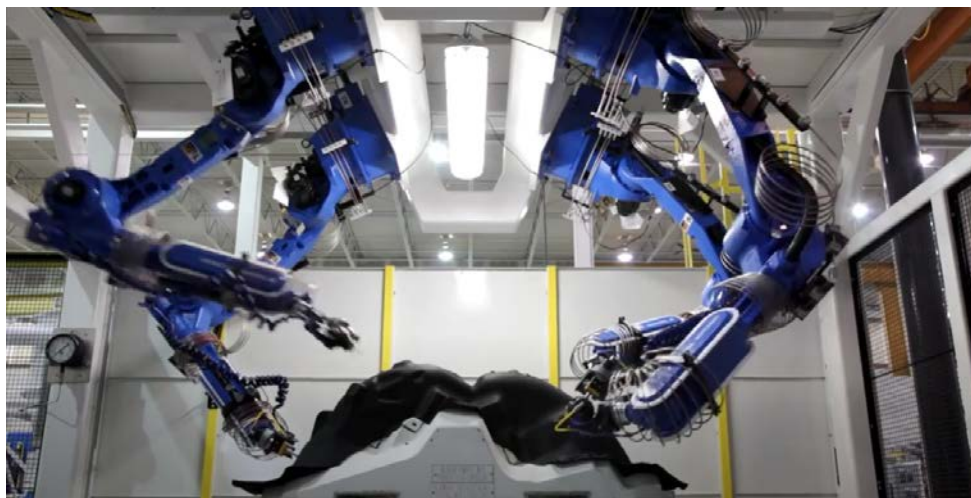


Σχήμα 3-17: Προσομοίωση κοπής πολύστρωτου σε CAM πρόγραμμα (robotmaster.com/)

Μία άλλη τεχνική που έχει αρχίσει να αξιοποιείται στη βιομηχανία και θα μπορούσε να εφαρμοστεί και σε ναυπηγεία, είναι αυτή της net-edge trimming. Με τη μέθοδο αυτή, κομμάτια που είναι εκτός της τελικής γεωμετρίας κόβονται πριν εμποτιστούν με ρητίνη (solvay.com/). Έτσι ελαχιστοποιείται η ανάγκη για επεξεργασία του πολύστρωτου αφού έχει πολυμεριστεί και καθίσταται δυνατή και η ανακύκλωση των ινών, κάτι που δεν θα ήταν δυνατό αν είχαν εμποτιστεί με θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (thermosetting resins), που συνήθως χρησιμοποιούνται στις ναυπηγοκατασκευές.

Η εταιρεία KMT Robotic Solutions έχει δημιουργήσει ένα ρομποτικό βραχίονα εξοπλισμένο με μηχανήμα υδροκοπής (waterjet) το οποίο εγκαθίσταται πάνω από τον πάγκο κοπής. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-18 που ακολουθεί, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης άνω του ενός ρομποτικού βραχίονα για αύξηση της παραγωγικότητας. Με τη χρήση αυτού του συστήματος υδροκοπής, η εταιρία Ranger Boats κατάφερε να μειώσει το χρόνο κοπής (trimming) και δημιουργίας ανοιγμάτων από 25 λεπτά με 4 τεχνίτες σε 16 λεπτά και 1 ρομποτικό βραχίονα. Η κοπή με συμβατικούς τροχούς, επίσης, δημιουργεί πολύ σκόνη, κάτι το οποίο εξαλείφεται με τη χρήση της υδροκοπής. Το σύστημα της KMT έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει τις αποκλίσεις που έχουν υπεισέλθει από τη διαδικασία της παραγωγής και να αντισταθμίσει τις αποστάσεις και τις θέσεις κοπής αναλόγως. (kmtwaterjet.com). Ένα ακόμη πλεονέκτημα της υδροκοπής είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχουν τα υψηλά κόστη συντήρησης

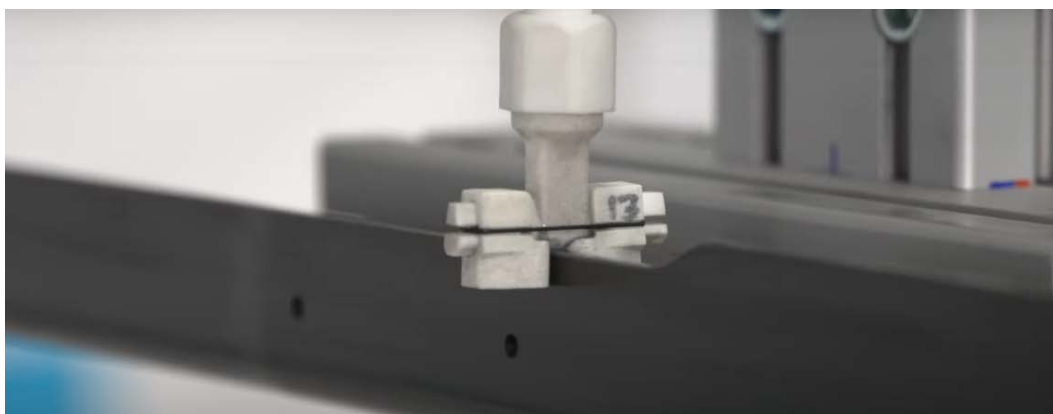
και αντικατάστασης των συμβατικών εργαλείων κοπής και συγχρόνως, με το ίδιο μηχάνημα, μπορεί να κοπεί μια μεγάλη γκάμα από διαφορετικά υλικά. Έτσι, ένα ναυπηγείο μπορεί να το αξιοποιήσει για κοπή μετάλλων, πυρήνων για την κατασκευή sandwich και άλλων υλικών.



Σχήμα 3-18: Ρομποτικοί βραχίονες της KMT Robotic Solutions (kmtwaterjet.com)

3.4.1.9 Αυτόματη στεγανοποίηση ακμών (Automated edge sealing)

Μία σημαντική διεργασία για τη διατήρηση της ακεραιότητας του πολύστρωτου μετά την επεξεργασία του με μηχανήματα κοπής είναι η στεγανοποίηση των ακμών του. Το σόκορο, που τοποθετείται στη λεπτή επιφάνεια κατά το πάχος του πολύστρωτου, προστατεύει την κατασκευή από την εισχώρηση υγρασίας κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει σε σταδιακή εμφάνιση βλάβης. Η εταιρεία Airborne έχει στη διάθεσή της σύστημα με ρομποτικό βραχίονα (Σχήμα 3-19) και κατάλληλο τελικό τελεστή που του επιτρέπει να κάνει αυτή τη διαδικασία αυτόματα, χωρίς να περιορίζεται από τις αλλαγές στη γεωμετρία, όπως η αλλαγή πάχους του πολύστρωτου.



Σχήμα 3-19: Μηχάνημα στεγανοποίησης ακμών (airborne.com)

Αν και αυτή η τεχνολογία προς το παρόν χρησιμοποιείται σε μικρά κομμάτια, σύντομα θα μπορούσε να επεκταθεί και σε μεγαλύτερα και να μπορεί να καλύψει τις όποιες ανάγκες των ναυπηγείων.

3.4.2 Συναρμολόγηση και Εξοπλισμός

Δύο τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν στο στάδιο της συναρμολόγησης των κομματιών (πολύστρωτα) και του εξοπλισμού του σκάφους είναι η χρήση cobots και η τεχνολογία επαυξημένης πραγματικότητας.

Η χρήση των cobots μπορεί να επιτρέψει τη συνεργασία ρομποτικών βραχιόνων με τους τεχνίτες που κάνουν τη συναρμολόγηση και εξοπλίζουν το σκάφος, για την ελαχιστοποίηση του χρόνου τοποθέτησης και την αύξηση της ακρίβειας. Επίσης, με τον τρόπο αυτό μεγάλο μέρος της επιβάρυνσης των τεχνητών αποφεύγεται (Wang 2022). Απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή προσαρμογή αυτής της τεχνολογίας στη γραμμή παραγωγής είναι η δημιουργία μιας σειράς από βήματα συναρμολόγησης, τα οποία είναι επαναλαμβανόμενα. Πρέπει, δηλαδή, να δημιουργηθεί μία αλληλουχία συγκεκριμένων κινήσεων (μετάφραση αυτών σε γλώσσα που χρησιμοποιούν τα ρομπότ). Τα cobots, με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων (τελικών τελεστών), μπορούν να αξιοποιηθούν στη δημιουργία των ανοιγμάτων στα πολύστρωτα και στην τοποθέτηση βίδων και άλλων εξαρτημάτων κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης (universal-robots.com/). Η χρήση αυτών των ρομπότ μπορεί να είναι αρκετά ευκίνητη, μιας και υπάρχουν κινητές μονάδες ρομποτικών βραχιόνων, κάτι που τους επιτρέπει μόλις τελειώνει μία διεργασία να μπορούν να αξιοποιούνται σε μία άλλη. Για παράδειγμα, μπορεί ένα cobot να τοποθετεί τα ενισχυτικά και ένας τεχνίτης να εφαρμόζει την κόλλα και τα υφάσματα για τη δημιουργία δεσμού και στη συνέχεια το ίδιο cobot να αξιοποιείται στη μεταφορά σωληνώσεων, δίδων καλωδίων και ταγκιών προς τοποθέτηση στον επόμενο σταθμό της κατασκευής ή στη δημιουργία ανοιγμάτων και στην τοποθέτηση και στο σφίξιμο βιδών.

Η εμπειρία ενός τεχνικού μπορεί να συνδυαστεί με την αμεσότητα και την απλή αναπαράσταση της πληροφορίας μέσω τεχνολογιών επαυξημένης πραγματικότητας (AR) και να οδηγήσει στην ελαχιστοποίηση των λαθών και την αύξηση της παραγωγικότητας (Fraga-Lamas et al 2018). Μία ακόμη χρήση της τεχνολογίας AR μέσω tablet είναι η τοποθέτηση ψηφιακών σημειώσεων σε κομμάτια υπό κατασκευή που μπορούν να χρησιμεύουν ως μέσο επικοινωνίας μεταξύ των τεχνικών που ασχολούνται με το εκάστοτε κομμάτι (Flatt et al 2015). Οι σημειώσεις αυτές είναι τύπου γεωαναφοράς (geo-referenced) (Σχήμα 3-20) και ακολουθούν το κομμάτι σε όλη την κατασκευαστική του πορεία. Αυτό δημιουργεί και ένα ιστορικό της πορείας κατασκευής που μπορεί να φανεί χρήσιμο κατά την πορεία κατασκευής, εάν προκύψουν προβλήματα.



Σχήμα 3-20: Σημειώσεις γεωαναφοράς – απεικόνιση σε γυαλιά AR (Fraga-Lamas et al 2018)

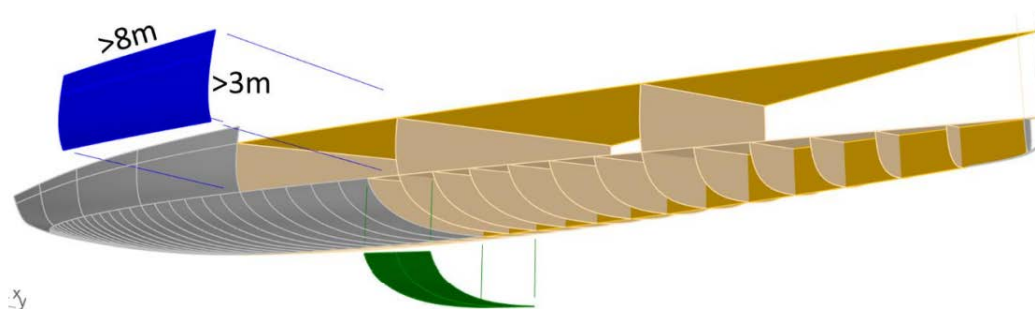
3.5 Ναυπήγηση μεγάλων πλοίων από σύνθετα υλικά

Η ναυπήγηση πλοίων από σύνθετα υλικά αποτελεί ένα διαρκώς εξελισσόμενο κλάδο. Προσπάθεια καταβάλλεται για τη βελτίωση τόσο των ίδιων των υλικών όσο και των κατεργασιών με τις οποίες κατασκευάζονται τα πλοία. Όσον αφορά το μέγεθος των πλοίων που κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά, όμως, έχουν υπάρξει διάφοροι ανασταλτικοί παράγοντες που περιορίζουν το μέγεθός τους, παρά την ύπαρξη πλοίων έως και 80m περίπου που παραμένει σαν άνω κατασκευαστικό όριο. Μία εργασία των Lowde et al (2022), σχετικά με την κατασκευή του πλοίου 100m από σύνθετα υλικά συνοψίζει την έρευνα που έχει γίνει γύρω από διάφορα ζητήματα που πρέπει να λυθούν πριν επιτευχθεί αυτό το ορόσημο. Προς το παρόν, η κατασκευή μεγάλων πλοίων από σύνθετα υλικά (άνω των 50m) περιορίζεται κυρίως σε πλοία του πολεμικού ναυτικού. Ο κλάδος κατασκευής πολεμικών πλοίων από σύνθετα υλικά δεν περιορίζεται από κανονισμούς νηογνομόνων και οικονομικούς παράγοντες και επιτρέπει την άνθιση τεχνολογιών και τεχνικών που επιτρέπουν τέτοιες κατασκευές. Στον ιδιωτικό τομέα οι περιορισμοί είναι περισσότεροι, με κύριους τους αυστηρούς και συντηρητικούς κανονισμούς των νηογνομόνων, τις υψηλές οικονομικές απαιτήσεις και την έλλειψη τεχνογνωσίας.

Τα τελευταία χρόνια οι προσπάθειες για τη θεσμοθέτηση ενός πλαισίου που θα επιτρέψει τέτοιες κατασκευές εντείνονται. Τα πλεονεκτήματα σε θεωρητικό επίπεδο έχουν υπολογιστεί και τα κυριότερα είναι η μείωση του άφορτου πλοίου, του εκτοπίσματος και των λειτουργικών εξόδων. Από ανάλυση εφικτότητας που έγινε από το πολεμικό ναυτικό των ΗΠΑ για την κατασκευή ενός σκάφους από σύνθετα υλικά μήκους 85m και εκτοπίσματος 1200t προέκυψαν τα εξής στοιχεία: μείωσης του βάρους της κατασκευής έως και 30%, η μείωση του εκτοπίσματος από 7 έως 21% και κατ' επέκταση η μείωση στα λειτουργικά έξοδα έως και 15% (Geuskens et al 2019). Η ανάγκη για πιο οικονομικά σε λειτουργικό επίπεδο και ελαφριά πλοία, που μεταφράζεται σε περισσότερο ωφέλιμο φορτίο (payload), διαρκώς αυξάνεται και μια λύση στο μέλλον θα ήταν η κατασκευή ολόκληρων πλοίων από σύνθετα υλικά. Ωστόσο, πρέπει να υπερκεραστούν κάποιοι παράγοντες έως την επίτευξη αυτού του στόχου.

Παρακάτω γίνεται προσέγγιση των τεχνολογιών που ήδη αξιοποιούνται ή που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σύντομα από ναυπηγεία που έχουν τη δυνατότητα κατασκευής τέτοιου μεγέθους σκαφών. Η ανάλυση των περιορισμών δεν αποτελεί αντικείμενο ενδιαφέροντος για το παρόν σύγγραμμα.

Σε αντίθεση με τα μικρότερου μεγέθους σκάφη, όπου η τελική κατασκευή αποτελείται από συνεχή διακριτά τμήματα, όπως η γάστρα, το κατάστρωμα και η υπερκατασκευή, για την κατασκευή μεγάλου μεγέθους πλαστικών σκαφών είναι αναγκαία η υιοθέτηση ενός αντίστοιχου τρόπου κατασκευής πλοίων, όπως αυτός της κατασκευής κατά τομείς (blocks) που συναντάται στα μεταλλικά πλοία. Παράδειγμα μιας τέτοιας κατασκευαστικής προσέγγισης φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 3-21, όπου υιοθετείται η μέθοδος κατασκευής μέσω συναρμολόγησης πολύστρωτων πάνελ. Αυτή η ανάγκη προκύπτει κυρίως λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από τον εξοπλισμό των ίδιων των ναυπηγείων, όπως γερανοί, καλούπια κ.ά., αλλά και λόγω των διεργασιών και των μεθόδων με τις οποίες γίνονται αυτές οι κατασκευές, όπως η έγχυση ρητίνης εν κενώ (Vacuum infusion ή VaRTM) και η χρήση καλουπιών.



Σχήμα 3-21: Συναρμολόγηση πολύστρωτων πάνελ (Geuskens et al 2019)

Η μέθοδος συναρμολόγησης πολύστρωτων πάνελ (composite panel assembly) προτείνει τη συναρμολόγηση πάνελ πάνω σε ένα «σκελετό» από φρακτές και καταστρώματα. Αυτή η κατασκευαστική προσέγγιση ήδη αξιοποιείται από το ναυπηγείο Baltic Yachts για την κατασκευή ιστιοπλοϊκών. Στο Σχήμα 3-22 που ακολουθεί φαίνεται το υπό κατασκευή σκάφος Pink Gin VI με τη χρήση αυτής της μεθόδου.



Σχήμα 3-22: Κατασκευή S/Y Pink Gin VI με τη μέθοδο συναρμολόγησης panel. Διακρίνεται ο σκελετός πάνω στον οποίο τοποθετείται το πλευρικό πολύστρωτο πάνελ. (Geuskens et al 2019)

Τα μεταλλικά σκάφη κατασκευάζονται από ομογενή υλικά (χάλυβας και αλουμίνιο) και υπάρχει γνώση και κατασκευαστική εμπειρία πολλών δεκαετιών που επιτρέπει την ευκολία κατασκευής τους, χωρίς να επηρεάζονται οι τελικές τους ιδιότητες από τη διαδικασία παραγωγής. Από την άλλη, οι ιδιότητες των πλαστικών σκαφών λόγω της ετερογενούς φύσης τους, εξαρτώνται πλήρως από τη διαδικασία παρασκευής των πολύστρωτων, κάτι που όσο αυξάνεται το μέγεθος τόσο αυξάνει και το οικονομικό ρίσκο.

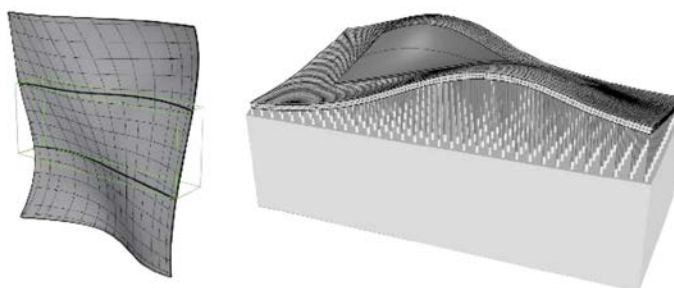
Οι τεχνολογίες που μπορούν να βοηθήσουν στην κατασκευή τέτοιων σκαφών και να αυτοματοποιήσουν εν μέρη την κατασκευή τους είναι αυτές που έχουν ήδη αναφερθεί κατά βάση, αλλά αλλάζει κυρίως η στρατηγική οργάνωσης της παρασκευής και ενισχύεται η ανάγκη για πλήρη έλεγχο των διαδικασιών κατασκευής των πολύστρωτων. Τεχνολογίες οργάνωσης της παραγωγής με αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης (AI) θα μπορέσουν να διασφαλίσουν την ομαλή ροή των εργασιών, τη λύση προβλημάτων που προκύπτουν και την προσομοίωση νέων κατασκευαστικών σεναρίων. Τα ρομπότ και cobots θα διενεργούν όλες τις απαραίτητες μετακινήσεις των κατασκευών και θα φέρουν τελικούς τελεστές για τη μετακίνηση και τοποθέτηση υφασμάτων, τη διενέργεια επιθεώρησης, την κοπή και την κατεργασία κομματιών (trimming και machining). Η ύπαρξη αισθητήρων θα βοηθήσει στον έλεγχο της διαδικασίας έγχυσης και πολυμερισμού των ρητινών, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού πολύστρωτου και να αποφευχθεί η απόρριψη μεγάλων κομματιών που απαιτούν μεγάλες ποσότητες πρώτων υλών (υφασμάτων και ρητινών). Επίσης, στην επόμενη παράγραφο γίνεται αναφορά σε αισθητήρες που τοποθετούνται σε σημεία υψηλής καταπόνησης και θα καταστήσουν εφικτή την παρακολούθηση της κατασκευής καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας της (τεχνολογίες Structural Health Monitoring – SHM).

Πολύ σημαντικό ρόλο για την επίτευξη της κατασκευής μεγάλων πλαστικών σκαφών μπορεί να διαδραματίσουν καινοτόμες εφαρμογές στον τομέα των καλουπιών. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το καλούπι της εταιρίας Curveworks, το οποίο είναι ένα καλούπι μεταβλητής γεωμετρίας (adaptive mould) (Σχήμα 3-23). Η κίνηση του καλουπιού ορίζεται μέσα από σύστημα CAD (Σχήμα 3-24). Με τη χρήση ενός τέτοιου καλουπιού, τα ναυπηγεία θα απαλλαγούν από τα υπέρογκα κόστη κατασκευής και διατήρησης πολλαπλών καλουπιών για την κατασκευή ενός μεγάλου πλοίου με τη μέθοδο κατασκευής κατά τομείς ή

πάνελ. Επίσης, πέρα από το οικονομικό κομμάτι, θα ήταν αδύνατο για ένα ναυπηγείο να διατηρεί σε κάποιο χώρο αποθήκευσης ξεχωριστά καλούπια όλων των διαφορετικών πάνελ/τομέων, γιατί αυτό θα απαιτούσε χώρο ίσο ή μεγαλύτερο από το συνολικό μέγεθος ενός μόνο σκάφους. Αν αλλάξει το σχέδιο ή βγει καινούριο τελείως διαφορετικό μοντέλο, αυτομάτως όλα τα καλούπια καθίστανται άχρηστα.



Σχήμα 3-23: Το καλούπι της Curveworks ενώ παρουσιάζει καμπύλη μορφή

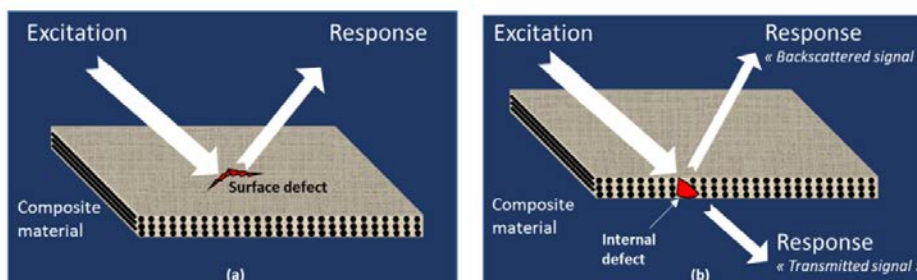


Σχήμα 3-24: Ο υπολογισμός της αλλαγής του σχήματος του καλουπιού με τη χρήση CAD προγράμματος

Μία τεχνολογία που επίσης θα μπορούσε να αλλάξει τον τρόπο κατασκευής μεγάλων πολύστρωτων κατασκευών και άρα να καταστήσει εφικτή τη δημιουργία μεγάλων σκαφών από σύνθετα υλικά είναι η τεχνολογία 3D εκτύπωσης (3D printing) για την οποία θα γίνει αναφορά παρακάτω (Κεφ. 3.7).

3.6 Επιθεώρηση των Πολύστρωτων (Inspection)

Η επιθεώρηση των πολύστρωτων κομματιών ενός σκάφους συνήθως γίνεται αμέσως μετά το πέρας του πολυμερισμού τους και το ξεκαλούπωμά τους. Σε αυτό το στάδιο είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το κατασκευασμένο κομμάτι είναι καλής ποιότητας και δεν έχει επιφανειακές ή εσωτερικές ατέλειες που μπορεί να το οδηγήσουν σε αστοχία της τελικής κατασκευής. Η επιθεώρηση συμβαίνει με μια σειρά από μεθόδους μη καταστρεπτικού ελέγχου (Non-Destructive Testing - NDT), που ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε κατασκευαστή ως προς την ποιότητα, μπορούν να εφαρμοστούν. Τυπική αναπαράσταση του τρόπου εύρεσης ατελειών στα πολύστρωτα φαίνεται στο Σχήμα 3-25 που ακολουθεί, όπου υπάρχει μία διέγερση μέσω του μηχανήματος και μία απόκριση της κατασκευής, η οποία στη συνέχεια ερμηνεύεται και εντοπίζονται τυχόν ατέλειες.



Σχήμα 3-25: Αριστερά: NDT για επιφανειακές ατέλειες. Δεξιά: NDT για εσωτερικές ατέλειες (Chaki & Krawczak 2022)

Η διαδικασία μη καταστρεπτικού ελέγχου των σύνθετων υλικών σε μία γραμμή παραγωγής εν γένει είναι μια διαδικασία που απαιτεί εμπειρία, διότι δεν βασίζεται πάντοτε σε μεθόδους που δίνουν σίγουρα αποτελέσματα για την ακεραιότητα της κατασκευής. Αυτό συμβαίνει λόγω της ετερογενούς φύσης των σύνθετων υλικών που κάνει πιο δύσκολο τον εντοπισμό και την περιγραφή των ατελειών που έχουν προκύψει κατά την παραγωγή. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι τεχνικές που αξιοποιούνται, σε ερευνητικό επίπεδο κατά κύριο λόγο, για την εύρεση ατελειών εξωτερικά (Πίνακας 3-1) και εσωτερικά (Πίνακας 3-2) του πολύστρωτου. Σε αυτούς τους πίνακες απαριθμούνται οι τεχνικές, οι ατέλειες που μπορούν να εντοπίσουν, τα πλεονεκτήματα της κάθε μίας καθώς και οι περιορισμοί τους.

Πίνακας 3-1: Μέθοδοι εύρεσης επιφανειακών ατελειών: τύποι ατελειών, πλεονεκτήματα και περιορισμοί κάθε μεθόδου (Chaki & Krawczak 2022)

NDT Techniques	Sought Flaws						Advantages	Limitations
	Porosity	Fibre Misalignment	Matrix Cracks	Fibre Breakage	Delamination	Impact Damage		
Visual inspection	☺	☺	☺	☹	☺	☺	Inexpensive Simple and rapid	Depth indication missing
Dye penetrant (liquid penetrant)	☹	☹	☺	☹	☺	☺	Inexpensive Simple and rapid	Depth indication missing Chemical wastewater
Infrared thermography	☺	☹	☺	☹	☺	☺	Eco-friendly Contactless inspection	Expensive Depth indication missing
Shearography	☹	☹	☺	☹	☺	☺	Contactless inspection High sensitivity	Expensive Roughness surface sensitive
Digital image correlation	☹	☹	☺	☹	☺	☺	Contactless inspection Full-field measurement	Speckle pattern needed Light conditions sensitive

☺: Application proved. ☹: Application limited. ☹: Not applicable.

Πίνακας 3-2: Μέθοδοι εύρεσης εσωτερικών ατελειών: τύποι ατελειών, πλεονεκτήματα και περιορισμοί κάθε μεθόδου (Chaki & Krawczak 2022)

NDT Techniques	Sought Flaws						Advantages	Limitations
	Porosity	Fibre Misalignment	Matrix Cracks	Fibre Breakage	Delamination	Impact Damage		
Ultrasonic waves	☺	☹	☹	☹	☺	☺	Detection, localisation, sizing One side is sufficient Real-time	Strong attenuation Complex interpretation
Acoustic Emission	☹	☹	☺	☺	☺	☺	Detection, localisation Structural health monitoring Reliability	Only growing flaws Need of loading Global method
X-ray radiography	☺	☹	☹	☹	☺	☺	Imaging method Reliability	Expensive Ionising radiation
X-ray tomography	☺	☺	☺	☺	☺	☺	Imaging method 3D analysis	Expensive Ionising radiation Semi-destructive Laboratory method

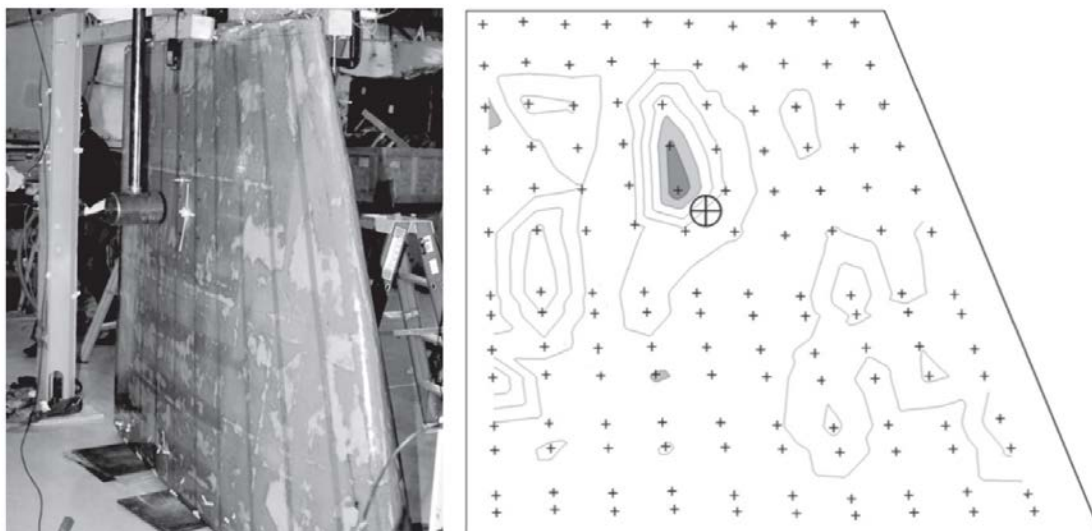
☺: Application proved. ☹: Application limited. ☹: Not applicable.

Όπως γίνεται φανερό, καμία μέθοδος δεν είναι κατάλληλη για την εύρεση όλων των τύπων ατελειών. Για αυτόν το λόγο υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν δύο ή και παραπάνω μεθόδους αποτελούν τη βέλτιστη λύση. Οι παραπάνω τεχνικές, αν και αποτελούν τους τρόπους μέσω των οποίων μπορούν να εντοπιστούν οι ατέλειες στα πολύστρωτα, δεν είναι λύσεις που μπορούν να εξετάσουν συνήθως τα ναυπηγεία, κυρίως λόγω κόστους, απαίτησης χρόνου και εξειδίκευσης για τη σωστή διενέργειά τους.

Η μέθοδος Robotic Laser UT (Ultrasonic Testing), που προέρχεται από τον κλάδο της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, είναι μια αρκετά ώριμη τεχνολογία η οποία θα μπορούσε να βρει εφαρμογή και στη ναυπηγική. Πιο συγκεκριμένα, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τον εντοπισμό αστοχίας του δεσμού περιβλήματος-πυρήνα (skin-to-core debonding) σε κατασκευές sandwich (Graham-Jones & Summerscales 2016).

Μία σύγχρονη προσέγγιση του ποιοτικού ελέγχου αποτελεί η τεχνική Online Non-Destructive Inspection ή Online NDI, που αποτελεί συνέχεια του Online Monitoring για το οποίο έγινε αναφορά και στο Κεφάλαιο 2. Είναι μια τεχνική που αναπτύσσεται κυρίως στον κλάδο της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, όπου οι κανονισμοί είναι ιδιαίτερα αυστηροί και υπάρχει η ανάγκη για καλύτερο ποιοτικό έλεγχο σε συντομότερο χρόνο. Ως τεχνική αξιοποιεί τεχνολογίες σε όλα τα στάδια της παρασκευής των πολύστρωτων, ώστε να εντοπίζονται γρηγορότερα οι ατέλειες (Cuevas-Aguado et al 2015).

Επίσης, η τάση στις μη καταστρεπτικές μεθόδους είναι η παρακολούθηση της δομικής υγείας των πολύστρωτων (Structural Health Monitoring – SHM), όπου τα πολύστρωτα έχουν ενσωματωμένους αισθητήρες (sensors). Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να οριστούν κατάλληλα οι θέσεις, ο αριθμός και ο τύπος των αισθητήρων καθώς και ο κατάλληλος τρόπος ενσωμάτωσης αυτών στο πολύστρωτο (Chaki & Krawczak 2022). Η μελλοντική τάση του SHM, μέσω του οποίου θα συμπεριλαμβάνεται και ο ποιοτικός έλεγχος της κατασκευής, είναι η χρήση όλο και περισσότερων ασύρματων αισθητήρων για την απόκτηση ενός συνόλου δεδομένων, τα οποία θα τα διαχειρίζονται τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων και θα αναλύονται από αλγόριθμους Τεχνητής Νοημοσύνης για διάγνωση σε πραγματικό χρόνο και προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance). Το παραπάνω θα αποτελεί μέρος του Ψηφιακού Διδύμου του σκάφους. Μία καινοτόμα τεχνολογία που εντάσσεται στην κατηγορία αισθητήρων για τη διενέργεια SHM είναι οι αισθητήρες FBGs (fibre-Bragg gratings), οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν μέσα σε οπτικές ίνες και να συσχετίσουν τοπικά την παραμόρφωση με τη αλλαγή στην ανάκλαση ή διάδοση του φωτός εντός της οπτικής ίνας (Graham-Jones & Summerscales 2016). Στο παρακάτω Σχήμα 3-26 φαίνεται αριστερά ένα πηδάλιο από GFRP με ενσωματωμένους επιφανειακά αισθητήρες FBGs κατά τη διάρκεια δοκιμής πρόσκρουσης (impact damage test) και δεξιά φαίνεται ο δείκτης αλλαγής της δυσκαμψίας του πολύστρωτου πάνω στην γεωμετρία του πηδαλίου (πλάγια όψη).



Σχήμα 3-26: Αριστερά διάταξη δοκιμής πρόσκρουσης σε πηδάλιο από GFRP με ενσωματωμένους αισθητήρες FBGs. Δεξιά δείκτης αλλαγής δυσκαμψίας μετά την επιβολή κρουστικού φορτίου.

Μελλοντική τάση στον τομέα SHM είναι η αξιοποίηση αισθητήρων σε περιοχές υψηλής καταπόνησης ως συνήθης κατασκευαστική πρακτική. Ειδικά όσο τα σκάφη από σύνθετα υλικά μεγαλώνουν σε διαστάσεις και εμφανίζονται καινοτόμα σχέδια, τόσο περισσότερο θα αξιοποιούνται. Η διάδοση αυτής της τεχνολογίας στις κατασκευές από σύνθετα υλικά, εν τέλει, θα οδηγήσει στη λεπτομερή περιγραφή της εναπομένουσας αντοχής τους ύστερα από μερική βλάβη μέσω της αξιοποίησης δεδομένων από ποσοτική 3D NDT (Quantitative 3D NDT) και ανάλυση του μοντέλου σε πρόγραμμα FEA (Graham-Jones & Summerscales 2016).

Προς το παρόν, η αυτοματοποίηση αυτής της διαδικασίας είναι πιο πίσω σε σχέση με άλλα στάδια της διαδικασίας παραγωγής σύνθετων υλικών. Έμφαση δίνεται κυρίως στην πιο προσεκτική και αυτόματη διαδικασία κατασκευής, που επιτρέπει την επαναληψιμότητα και άρα την ελαχιστοποίηση λαθών, καθώς και στην παρακολούθηση των διαδικασιών προκειμένου να εντοπίζονται εγκαίρως τα λάθη και οι ατέλειες, όταν και αν προκύψουν.

3.7 Διαδικασίες Συντήρησης και Επισκευής

Οι διαδικασίες συντήρησης και επισκευής μπορεί να αφορούν οποιοδήποτε μέρος του σκάφους, είτε αυτό είναι πολύστρωτο, κάποιο δίκτυο ή κάποιο εξάρτημα, είτε κάποιο μηχάνημα (π.χ. οι μηχανές). Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει αναφορά στην επισκευή και συντήρηση των μερών που κατασκευάζονται (πολύστρωτα) από το ναυπηγείο και δεν αφορούν κάποιο προμηθευτή/κατασκευαστή.

3.7.1 Κύριες αστοχίες και βλάβες στα σκάφη από σύνθετα υλικά

Τα μικρά πλαστικά σκάφη έχουν χρόνο ζωής συνήθως κοντά στα 20 χρόνια, αλλά με σωστή συντήρηση αυτός ο αριθμός μπορεί να ξεπεραστεί κατά πολύ. Γενικά ένα καλά κατασκευασμένο σκάφος από σύνθετα υλικά ενδέχεται να αντιμετωπίσει λίγα προβλήματα κατά τη διάρκεια της ζωής του, κυρίως εκ των οποίων είναι η ώσμωση, η οποία ακόμη και από την εμφάνισή της χρειάζεται πολύς καιρός για να αποτελέσει σοβαρό πρόβλημα. Αυτό γίνεται κυρίως λόγω του γεγονότος ότι τα πλαστικά σκάφη βγαίνουν εκτός νερού για ένα διάστημα το χειμώνα, κάτι που επιτρέπει στη γάστρα να «στεγνώσει» και η τυχόν απορροφημένη υγρασία να απομακρυνθεί. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ο αποχωρισμός των στρώσεων (delamination), κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του πολύστρωτου. Αυτή η αστοχία, η οποία «αδυνατίζει» τη γάστρα τοπικά στο σημείο εμφάνισής της μπορεί να προκύψει λόγω ώσμωσης ή κάποιας κατασκευαστικής αστοχίας. Το πρόβλημα στα σύνθετα υλικά έγκειται στην απουσία πλαστικής παραμόρφωσης, σε αντίθεση με τα μεταλλικά υλικά. Οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων είναι περίπου μια ευθεία γραμμή από το μηδέν έως τη θραύση, δηλαδή τα σύνθετα υλικά είναι πλήρως ελαστικά και για αυτόν τον λόγο συγχωρούν λιγότερα λάθη σε σχέση με τα μεταλλικά υλικά (Παπάζογλου & Τσούβαλης 2018).

3.7.2 Τρόποι αυτοματοποίησης επισκευής

Τα μέρη που επισκευάζονται στα πλαστικά σκάφη, σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω, συνήθως είναι μέρη που έχουν αστοχήσει πλήρως και όχι μέρη που δείχνουν να τείνουν προς την αστοχία. Αφού εντοπιστεί η περιοχή που έχει αστοχήσει, ακολουθεί η προετοιμασία της επιφάνειας και η επίστρωση υφασμάτων (μπαλώματος). Προς το παρόν υπάρχουν μηχανήματα, που αν και βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο, μπορούν να αυτοματοποιήσουν τη διαδικασία προετοιμασίας της επιφάνειας και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα. Στο ένα η διαδικασία προετοιμασίας γίνεται με μηχανικό τρόπο με τη χρήση φρέζας (MobileBlock), ενώ στην άλλη περίπτωση γίνεται η χρήση υδροκοπής (Reply.5) (Σχήμα 3-27). Το μηχάνημα MobileBlock έχει ενσωματωμένο επάνω του και ένα σύστημα laser που του επιτρέπει να κάνει ακριβείς μετρήσεις της γεωμετρίας. Ακολούθως υπολογίζεται η επιφάνεια που πρέπει να αφαιρεθεί (Halm 2020). Και οι δύο τεχνολογίες έχουν τους περιορισμούς τους και έχουν κατασκευαστεί για χρήση σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική. Εξέλιξη αυτών των μηχανημάτων, με κύριο χαρακτηριστικό την εναπόθεσή τους πάνω σε επιφάνειες με μεγάλη καμπυλότητα και αλλαγές στη γεωμετρία (π.χ. ακμές,

αντιδιαβροχικές λωρίδες), όπως οι επιφάνειες που συναντώνται στα σκάφη, θα μπορούσε να επιτρέψει την αυτόματη ετοιμασία των επιφανειών ύστερα από κάποια αστοχία. Έως σήμερα η προετοιμασία τόσο της επιφάνειας, αλλά και η εναπόθεση νέων στρώσεων στην περιοχή της αστοχίας αποτελεί μια δουλειά αρκετής λεπτομέρειας και το αποτέλεσμα βασίζεται κυρίως στην εμπειρία του εκάστοτε τεχνίτη.



Σχήμα 3-27: Αριστερά: MobileBlock της εταιρίας DMG MORI
Δεξιά: Reply.5 της εταιρίας Bayab

Στη συνέχεια, το μάλωμα μπορεί να τοποθετηθεί χειρωνακτικά ή με κάποιο ρομποτικό βραχίονα με κατάλληλα διαμορφωμένο τελικό τελεστή που να εναποθέτει είτε προεμποτισμένα ή στεγνά υφάσματα, είτε ίνες ή ταινίες σύνθετων υλικών (τύπου AFP και ATL όπως θα γίνει αναφορά παρακάτω). Δεν υπάρχει ακόμη αναφορά για αυτοματοποιημένη τοποθέτηση υφασμάτων σε πολύστρωτα, όμως εφόσον το MobileBlock που αναφέρθηκε παραπάνω έχει την ικανότητα να καταγράψει με ακρίβεια την περιοχή που χρειάζεται να κοπεί, θα μπορούσε ως επακόλουθο αυτήν την ψηφιακή αναπαράσταση της κομμένης περιοχής να τη λαμβάνει ένα λογισμικό που να υπολογίζει στρώσεις, τύπο υφασμάτων και προσανατολισμό με βάση τα κατασκευαστικά σχέδια του υπάρχοντος προϊόντος και στη συνέχεια να δίνει τις κατάλληλες οδηγίες σε ένα μηχάνημα ή σε έναν τεχνίτη (μέσω χρήσης γυαλιών ή tablet και την αξιοποίηση της Επαυξημένης Πραγματικότητας) για τη σωστή τοποθέτηση των υφασμάτων-μπαλωμάτων. Αυτό αποτελεί μια μορφή χρήσης του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) του σκάφους, το οποίο όσο δίνεται περισσότερη βάση από τους κατασκευαστές σε τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και αισθητήρων (για Structural Health Monitoring - SHM) τόσο θα εμπλουτίζεται η ψηφιακή ταυτότητα του προϊόντος και θα επιτρέπει σε πιο ακριβείς επεμβάσεις στα πολύστρωτα, όταν αυτά επισκευάζονται.

Με τη βελτίωση των τεχνολογιών μη καταστρεπτικού ελέγχου (NDTs) θα μπορούσε επίσης να βελτιωθεί ο χαρακτηρισμός και ο εντοπισμός των αστοχιών που ενδέχεται να προκύψουν.

3.8 Άλλες τεχνολογίες που μπορούν να αξιοποιηθούν στο μέλλον

Αυτή τη στιγμή αναπτύσσονται τεχνολογίες σε άλλους κλάδους, όπως για παράδειγμα στην αεροδιαστημική βιομηχανία, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την αυτοκινητοβιομηχανία που σύντομα θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή και στη ναυπηγική. Αν και έχει ήδη γίνει αναφορά σε κάποιες εξ αυτών, χωρίς να βρίσκουν ήδη εφαρμογή, στο παρόν εδάφιο θα γίνει αναφορά σε τεχνολογίες που μπορούν να αλλάξουν τελείως τις κατασκευαστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Παραλλαγές αυτόματης τοποθέτησης ινών ή υφασμάτων (AFP/ATL/Automated ply placement/Automated dry fiber placement) και η προσθετική παρασκευή ή αλλιώς 3D εκτύπωση (Additive Manufacturing ή αλλιώς 3D Printing) θα μπορούσαν να αλλάξουν πλήρως την μορφή των σύγχρονων ναυπηγείων, καθιστώντας τα σχεδόν πλήρως αυτοματοποιημένες γραμμές παραγωγής. Να σημειωθεί ότι προκειμένου να επιτευχθεί η σχεδόν πλήρης αυτοματοποίηση θα πρέπει και άλλες τεχνολογίες να εξελιχθούν σε σημαντικό βαθμό και κύριο ρόλο θα διαδραματίσει η τεχνητή νοημοσύνη. Αυτό αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για έναν κλάδο όπως αυτό της ναυπήγησης πλαστικών σκαφών, όπου είναι έντονο το φαινόμενο της προσαρμογής μέρους του προϊόντος στις απαιτήσεις του αγοραστή.

3.8.1 Τεχνολογίες αυτόματης τοποθέτησης σύνθετων υλικών (ίνες ή ολόκληρα υφάσματα)

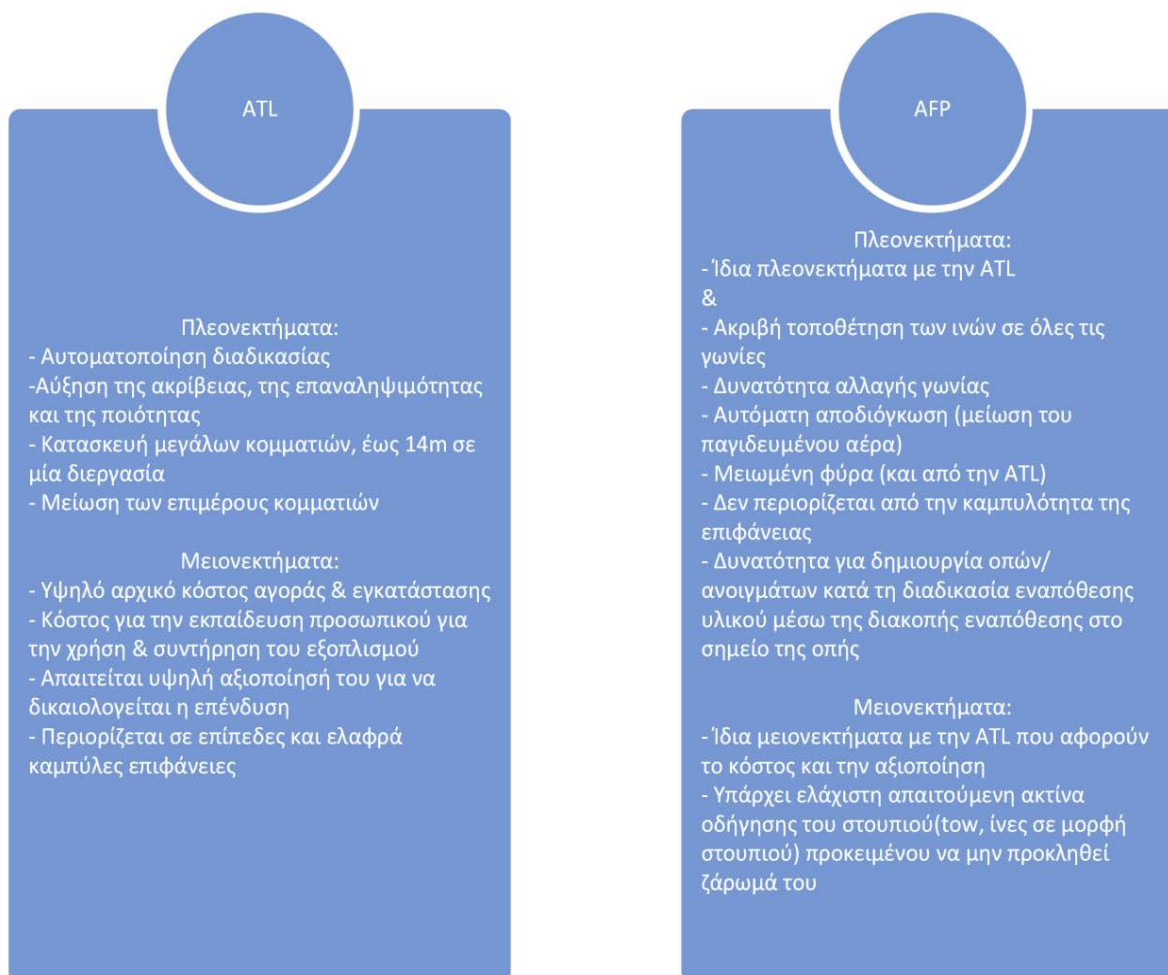
Παρακάτω γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες AFP, ATL και τις πιο σύγχρονες παραλλαγές αυτών, όπως η αυτόματη τοποθέτηση στρώσης (Automated ply placement) και η αυτόματη τοποθέτηση στεγνών ινών (Automated dry fiber placement).

3.8.1.1 Automated Tape Laying (ATL) & Automated Fibre Placement (AFP)

Οι δύο αυτές μέθοδοι ATL και AFP αναπτύχθηκαν τις δεκαετίες του '60 και του '70 αντίστοιχα. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην αεροναυπηγική έχοντας κάποια διακριτά πλεονεκτήματα έναντι της επίστρωσης με το χέρι. Στον παρακάτω Πίνακα 3-3 γίνεται αναφορά των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων αυτών των δύο μεθόδων σε σχέση με τη μέθοδο της επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up). Οι λόγοι που δεν έχουν βρει ακόμη εφαρμογή αυτές οι τεχνολογίες στον χώρο της ναυπηγικής εύκολα διακρίνονται στα μειονεκτήματά τους, με κυρίαρχο ρόλο να έχει το υψηλό κόστος. Όσο βελτιώνονται, όμως, αυτές οι τεχνολογίες και προκύπτουν και άλλες παρεμφερείς, τόσο θα γίνονται πιο ελκυστικές για άλλους κλάδους της βιομηχανίας, όπως τα μεσαίου μεγέθους ναυπηγεία μικρών σκαφών. Υβριδικές λύσεις που συνδυάζουν την τεχνολογία AFP στεγνών ινών (dry fibres) με τη διαδικασία έγχυσης ρητίνης σε κενό έχει επίσης μελετηθεί από τους Liu et al (2019) και παρουσίασαν τόσο τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά που επιτεύχθηκαν όσο και των προκλήσεων που προέκυψαν, όπως η μειωμένη διαπερατότητα κάτι που παρέτεινε τον χρόνο

έγχυσης κατά πολύ. Η έρευνα έγινε με τη χρήση UD ινών από carbon και τη χρήση εποξικής ρητίνης.

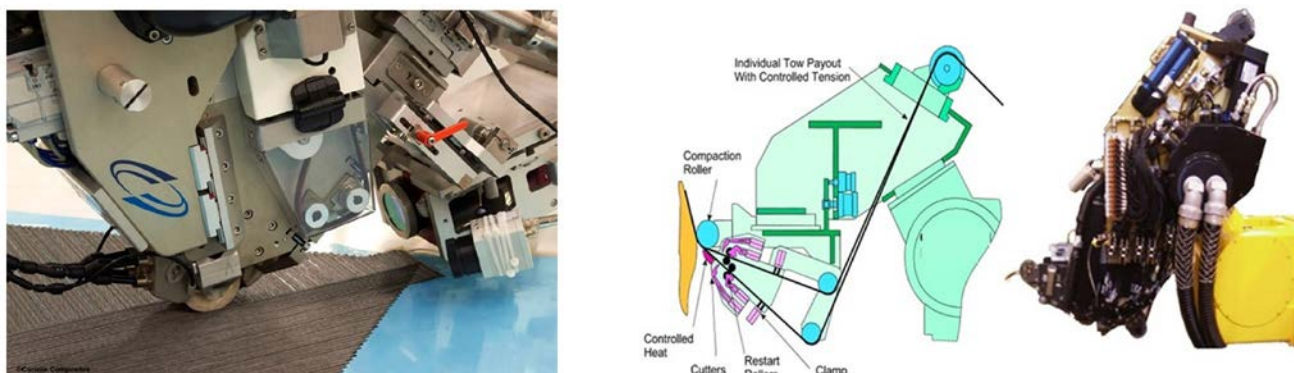
Πίνακας 3-3: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ATL και AFP.



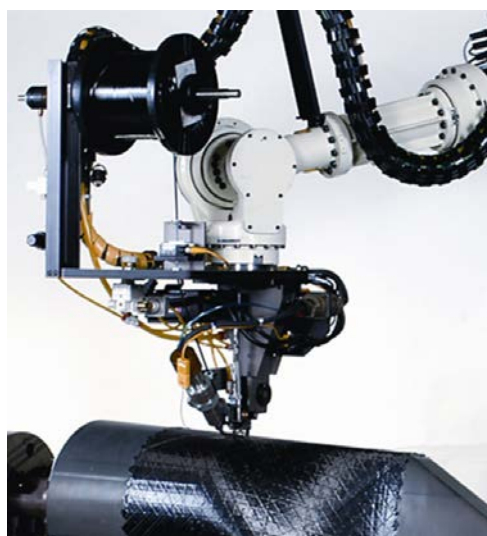
Οι δύο αυτές τεχνολογίες αξιοποιούν συχνά μεθόδους πρόσδοσης θερμότητας στην κεφαλή που εναποθετεί τα υλικά (ίνες με ρητίνη) πάνω στο καλούπι για δύο λόγους. Πρώτον, όταν ρητίνη είναι θερμοσκληρυνόμενη (thermosetting) ή χρησιμοποιούνται προεμποτισμένες ίνες (pre-pregs), για να γίνει πιο κολλώδης η ρητίνη και να επιτρέψει στην καλύτερη σύνδεση των υλικών πάνω στο υπάρχον πολύστρωτο ή καλούπι και δεύτερον, όταν η ρητίνη είναι θερμοπλαστική (thermoplastic) για να λιώσει και να μπορεί να μορφοποιηθεί κατάλληλα μαζί με τις ενισχυτικές ίνες. Στις θερμοπλαστικές ρητίνες αξιοποιούνται οι εξής μέθοδοι πρόσδοσης θερμότητας: άζωτο σε υψηλή θερμοκρασία (975°C), φλόγα, υπέρυθρες, επαγωγή και laser, το οποίο και αποτελεί τη πιο ενδιαφέρουσα λύση λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (μπορεί να προσδώσει θερμότητα στοχευμένα). Αφότου έχει ολοκληρωθεί η εναπόθεση όλων των στρώσεων ακολουθεί η διαδικασία της σκλήρυνσης (curing), η οποία δεν διαφέρει από την κατασκευή πολύστρωτων με άλλες μεθόδους (όπως με το χέρι). Οι δύο πιο διαδεδομένες μέθοδοι, ιδιαίτερα σε κλάδους υψηλών απαιτήσεων όπως αυτός της αεροδιαστημικής, είναι ο θερμαινόμενος θάλαμος πίεσης (autoclave) και ο φούρνος

(clave). Άλλες μέθοδοι είναι η χρήση δωματίου στο οποίο ελέγχεται η θερμότητα μέσω κατάλληλων διατάξεων (π.χ. θερμαντικά σώματα, λάμπες υπεριώθρων), η χρήση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) ή πιο σύγχρονες μέθοδοι οι οποίες στοχεύουν στην ανάπτυξη θερμότητας εσωτερικά του σύνθετου υλικού λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της «ευαισθησίας» στον ηλεκτρομαγνητισμό που παρουσιάζει (λόγω της ρητίνης, όταν αυτή βρίσκεται ακόμη σε υγρή μορφή) και είναι η χρήση συνεχούς ρεύματος, μικροκυμάτων, επαγωγής και ραδιοκυμάτων (Collinson et al 2022).

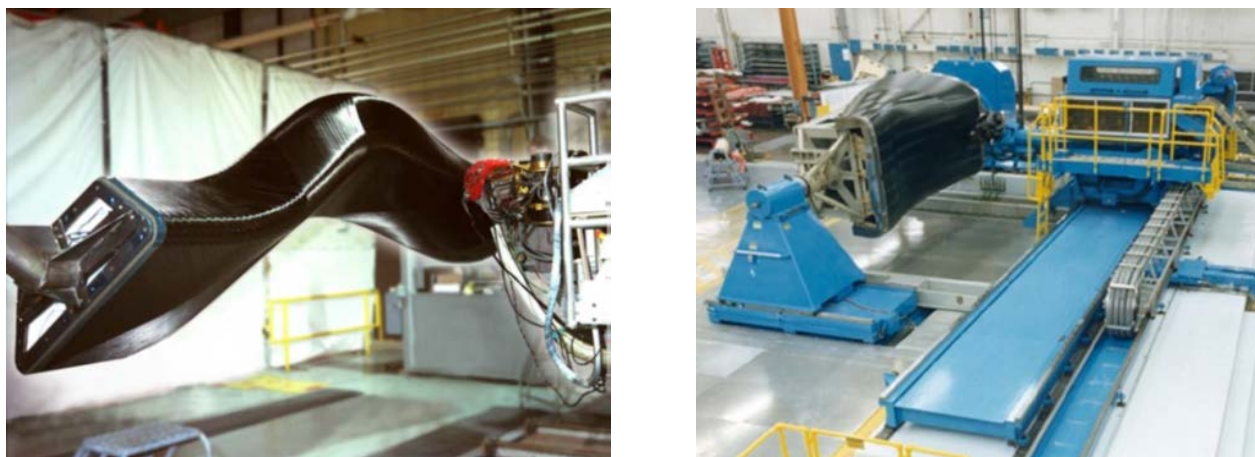
Παρακάτω απεικονίζεται ένα μηχάνημα ATL (Σχήμα 3-28) και ακολουθεί ένα μηχάνημα AFP (Σχήμα 3-29 & 3-30) (Broughton – Lecture). Στο Σχήμα 3-31 απεικονίζεται η διαφορά στη φύρα που μπορεί να επιτευχθεί στις δύο μεθόδους, με την AFP να έχει σαφές πλεονέκτημα, μιας και μπορεί να κατασκευάσει προϊόντα με μικρές αποκλίσεις από τις τελικές διαστάσεις (near net-shape).



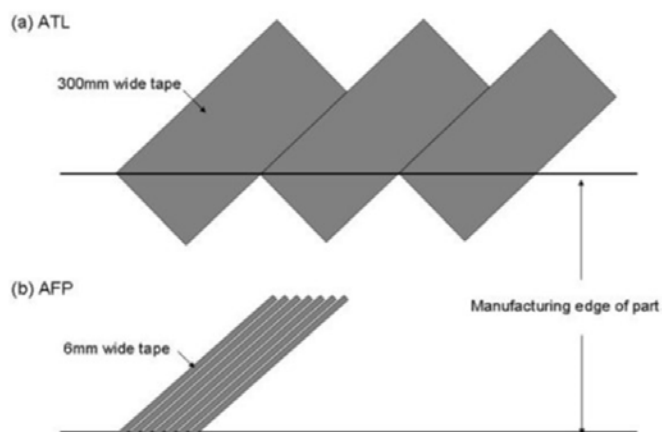
Σχήμα 3-28: Κεφαλή CNC πολλαπλών αξόνων για εναπόθεση ταινιών σύνθετου υλικού (ATL).



Σχήμα 3-29: Κεφαλή CNC (10-αξόνων) για εναπόθεση ινών σύνθετου υλικού (AFP).



Σχήμα 3-30: Διάφορες παραλλαγές ενός συστήματος AFP. Δυνατότητα περιστροφής του καλουπιού, τεχνική που προέρχεται από τη μέθοδο περιέλιξης ινών (filament winding).



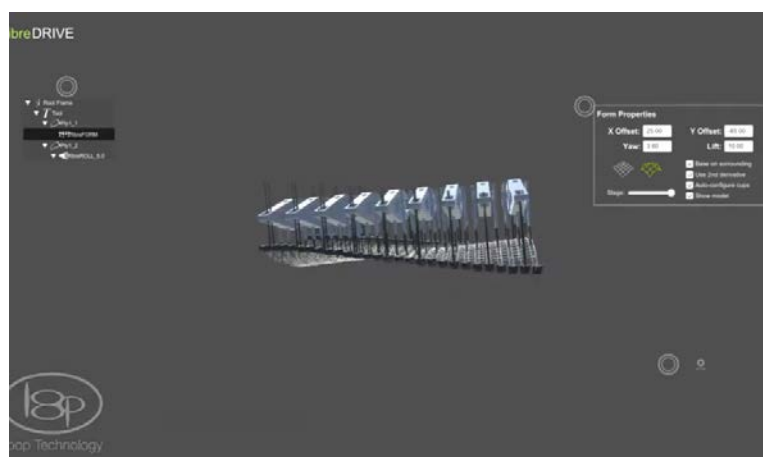
Σχήμα 3-31: Διαφορά της ποσότητας φύρας (scrap) στις δύο τεχνικές. Η ATL χρησιμοποιεί πολύ πιο παχές ταινίες, ενώ η AFP μπορεί να χρησιμοποιήσει στουπιιά (tows) ινών μερικών χιλιοστών έως μερικών εκατοστών, ανάλογα την εφαρμογή.

3.8.1.2 Automated ply placement & Automated dry fibre placement

Σχετικά με την τεχνολογία αυτόματης εναπόθεσης υφασμάτων (automated ply placement), εταιρείες όπως η Airborne (Σχήμα 3-32) και η Loop Technology (Σχήμα 3-33 & 3-34) έχουν δημιουργήσει τα δικά τους συστήματα. Για το σύστημα της Airborne δεν γίνεται σαφής αναφορά στους περιορισμούς της γεωμετρίας της επιφάνειας που μπορεί να στρώσει. Από την άλλη μεριά, το σύστημα της Loop Technology μπορεί να εναποθέσει τα υφάσματα σε καλούπια με διπλή καμπυλότητα. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την αυτόματη τοποθέτηση διαφόρων τύπων υφασμάτων και υλικών πάνω σε επιφάνειες. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι ρομποτικοί βραχίονες με τους κατάλληλους τελικούς τελεστές για τη μεταφορά και τοποθέτηση των υφασμάτων στα καλούπια ή τις μελαμίνες με σκοπό την παρασκευή πολύστρωτων.



Σχήμα 3-32: Διάταξη τοποθέτησης υφασμάτων από τον πάγκο κοπής (δεξιά) στον πάγκο που θα γίνει η έγχυση της ρητίνης (Airborne) (Nehls 2022)

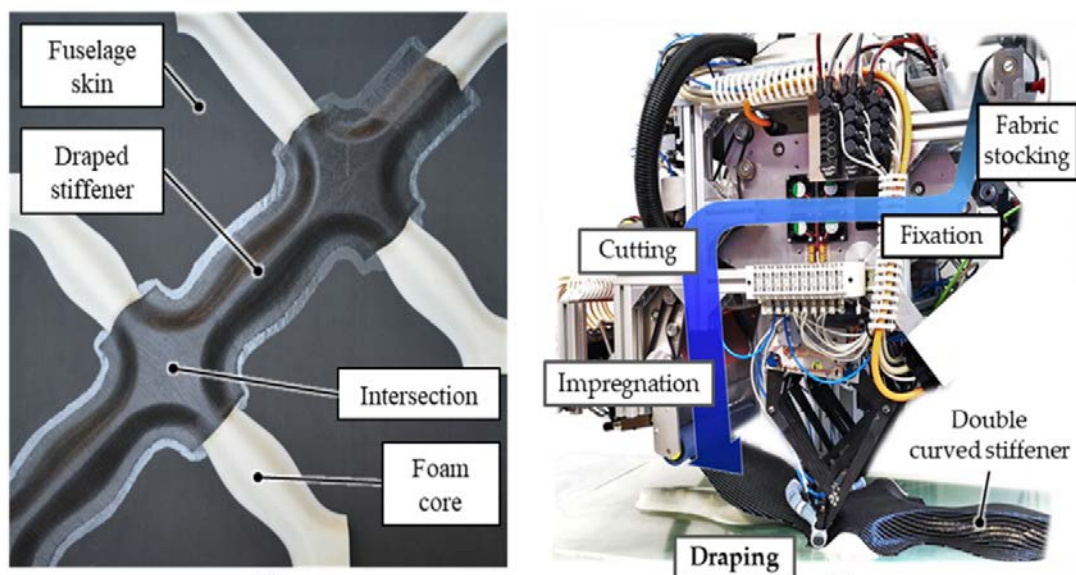


Σχήμα 3-33: Το CAD πρόγραμμα της Loop Technology που υπολογίζει τη γεωμετρία του τελικού τελεστή προκειμένου να τοποθετήσει το ύφασμα.

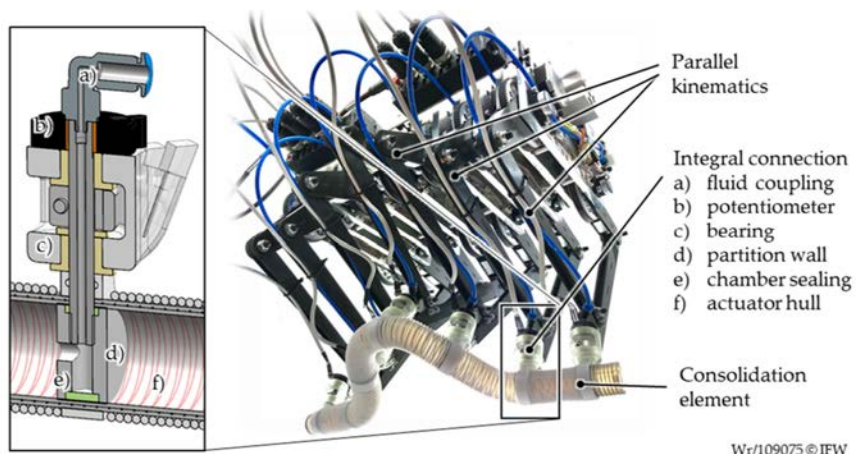


Σχήμα 3-34: Ο τελικός τελεστής FibreFORM[®] της Loop Technology ενώ αλλάζει μορφή σύμφωνα με τις οδηγίες από το CAD πρόγραμμα

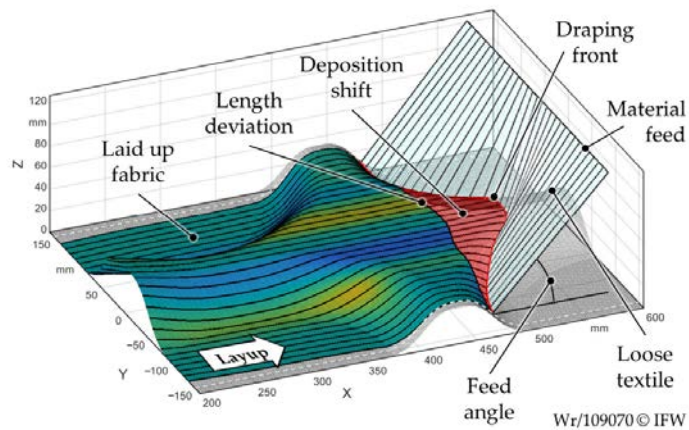
Η τεχνολογία αυτόματης τοποθέτησης στεγνών υφασμάτων, στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως APP (Advanced Ply Placement Process) έχει ήδη αναφερθεί στο 2^ο κεφάλαιο. Αποτελεί μία εξέλιξη των μεθόδων AFP και ATL, εκμεταλλευόμενη την ικανότητα της AFP να απλώνει υλικό πάνω σε επιφάνειες με διπλή καμπυλότητα και την μεγάλη παραγωγική ικανότητα της ATL. Μέσω του προγράμματος FlexProCFK κατασκευάστηκε και μελετήθηκε μια μονάδα που εναποθέτει αυτόματα υφάσματα πάνω στο καλούπι (Σχήμα 3-35) και φέρει ένα μηχανισμό (drapping unit) (Σχήμα 3-36) που του επιτρέπει να εξισορροπεί τις τάσεις στο ύφασμα καθώς και να το σταθεροποιεί διαρκώς ενώ απλώνεται. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, μελετήθηκε και δημιουργήθηκε ένα μοντέλο που υπολογίζει το μέτωπο επίστρωσης (Σχήμα 3-37) (draping front) προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αλλαγές στο μήκος και η διάτμηση των υφασμάτων όταν εναποτίθενται σε επιφάνειες με διπλή καμπυλότητα. Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του μετώπου επίστρωσης πάνω σε ενισχυτικό αφρό με διπλή καμπυλότητα (Σχήμα 3-38), επιτρέποντας έτσι τη βέλτιστη άσκηση πίεσης στο ύφασμα, ελαχιστοποιώντας την παραμόρφωσή του (Denkema et al 2021).



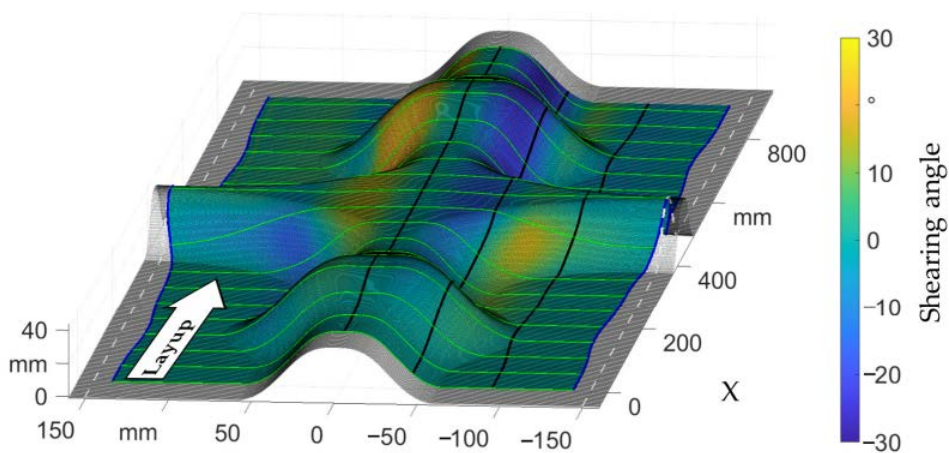
Σχήμα 3-35: Αριστερά φαίνεται η κάτοψη του ενισχυτικού αφρού που έχει ντυθεί με ύφασμα. Δεξιά φαίνεται η διάταξη του μηχανήματος εναπόθεσης του υφάσματος.



Σχήμα 3-36: Μηχανισμός σταθεροποίησης του υφάσματος. Δημιουργεί το μέτωπο επίστρωσης ασκώντας πίεση στα κατάλληλα σημεία.



Σχήμα 3-37: Προσομοίωση της επίστρωσης του υφάσματος.



Σχήμα 3-38: Υπολογισμός της παραμόρφωσης με τη χρήση λογισμικού FEA

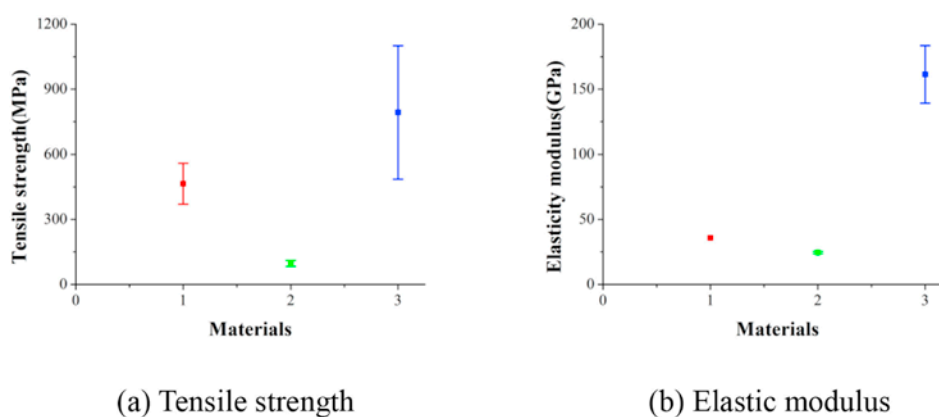
3.8.2 Τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης σύνθετων υλικών (3D Printing)

Η εμφάνιση της 3D εκτύπωσης τα τελευταία χρόνια έχει ανοίξει το δρόμο για καινοτόμες λύσεις σχεδόν σε όλους τους κατασκευαστικούς τομείς. Τα υλικά που μπορούν να εκτυπωθούν είναι πολλά και δεν θα αναλυθούν όλα τα διαθέσιμα υλικά στην παρούσα διπλωματική. Τα υλικά που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα τη ναυπηγική, και πιο συγκεκριμένα τον κλάδο ναυπήγησης πλαστικών σκαφών, είναι τα ίδια υλικά που χρησιμοποιούνται έως σήμερα κατά βάση, με μόνη διαφορά ότι αλλάζει τόσο η μέθοδος παρασκευής τους όσο και οι τελικές τους ιδιότητες. Οπότε οι εφαρμογές και τεχνολογίες στις οποίες θα γίνει αναφορά παρακάτω εστιάζουν κυρίως σε θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (thermosetting resins) και στις συνήθεις ενισχυτικές ίνες γυαλιού (glass), άνθρακα (carbon) και αραμιδίου (aramid). Οι θερμοπλαστικές ρητίνες, παρόλο που έχουν βρει μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών σε τεχνολογίες 3D εκτύπωσης εξαιτίας της εγγενούς ικανότητάς τους να μπορούν να διαμορφώνονται επανειλημμένα με τη χρήση θερμότητας, δεν έχουν βρει ακόμη εφαρμογές σε μεγάλα κομμάτια ναυπηγικών κατασκευών (Παπάζογλου & Τσούβαλης 2018). Επίσης, δεδομένου ότι οι θερμοπλαστικές ρητίνες δεν προσκολλώνται καλά με τις θερμοσκληρυνόμενες και τα πλαστικά σκάφη κατασκευάζονται κατά βάση με τις τελευταίες, δεν κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά σε τεχνολογίες κατασκευής 3D εκτυπωμένων κομματιών με τη χρήση θερμοπλαστικών ρητινών. Να σημειωθεί ότι οι τεχνολογίες AFP, ATL και οι άλλες εκδοχές αυτών, αν και ανήκουν στον ευρύτερο κλάδο της προσθετικής κατασκευής (additive manufacturing) όπως και η 3D εκτύπωση, διαφέρουν κυρίως στο ότι χρειάζονται καλούπι για την ολοκλήρωση της κατασκευής και δεν μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα από αυτό. Αντιθέτως, ένας εκτυπωτής 3D μπορεί να κατασκευάσει ένα προϊόν στις 3 διαστάσεις χωρίς τη χρήση κάποιου καλουπιού που να το περιορίζει στον χώρο.

Παρά το γεγονός ότι ήδη διάφορες εταιρείες έχουν καταφέρει να κατασκευάσουν γάστρες αξιοποιώντας εξ ολοκλήρου τεχνολογίες 3D εκτύπωσης, όπως η εταιρεία 3Dirigo σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Maine όπου κατέχει και το ρεκόρ για το μεγαλύτερο εκτυπωμένο σκάφος έως σήμερα με ολικό μήκος 7.62 m, οι γάστρες και οι τεχνολογίες που αξιοποιούνται αποτελούν ακόμη αντικείμενο έρευνας και όχι εφαρμογές που βρίσκουν εμπορική χρήση. Θεωρητικά ο κλάδος της 3D εκτύπωσης, μόλις ωριμάσει αρκετά, θα μπορούσε να αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τα σκάφη. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι τεχνολογίες και τα υλικά της 3D εκτύπωσης να εδραιωθούν και να υποστηριχθούν με την απαραίτητη έρευνα και στη συνέχεια να αποτελέσουν μία οικονομική λύση για τους ναυπηγοκατασκευαστές. Επιπλέον, όπως ήδη αναφέρθηκε, απαιτείται τελείως διαφορετική προσέγγιση κατασκευαστικού σχεδιασμού (structural design) μιας και εδώ τα κομμάτια εκτυπώνονται και άρα τα πάχη και οι διαμορφώσεις, τόσο οι εσωτερικές όσο και οι εξωτερικές, που συμβάλλουν στην ακαμψία της κατασκευής πρέπει να διερευνηθούν εκ νέου για να προκύψουν κατασκευές με ιδιότητες αντίστοιχες με αυτές των υπάρχοντων σκαφών.

Σε μικρότερη κλίμακα, όμως, εφαρμογές 3D εκτύπωσης μπορούν στο άμεσο μέλλον να αντικαταστήσουν μέρος των κομματιών των πλαστικών σκαφών ή και να αλλάξουν την

κατασκευαστική μέθοδο που ακολουθείται σε κάποια βήματα της παραγωγής. Προφανώς δεν θα γίνει αναφορά σε πλαστικά κομμάτια που κατασκευάζονται για αισθητικούς λόγους, αλλά σε αυτά που θα αποτελούσαν κατασκευαστικό μέλος. Για αυτόν τον λόγο θα γίνει αναφορά μόνο σε μεθόδους εκτύπωσης σύνθετων υλικών, που παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε μελέτη που έγινε από τους Hao et al. (2018) υπολογίστηκε το όριο αντοχής και το μέτρο ελαστικότητας μια εκτυπωμένης πλάκας αξιοποιώντας συνεχείς ενισχυτικές ίνες άνθρακα (Continuous Fibre Manufacturing – CFM) διαστάσεων 250 x 25 x 3 (mm) και από τα εξής υλικά: εποξική ρητίνη E54 και δέσμη ινών άνθρακα HF10. Οι τιμές που προέκυψαν είναι: όριο διαρροής 792.8 MPa και μέτρο ελαστικότητας 161.4 GPa. Στο παρακάτω Σχήμα 3-39 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της πλάκας που μόλις αναφέρθηκε με μία πλάκα (αριστερά – κόκκινη γραμμή) που εκτυπώθηκε χρησιμοποιώντας πάλι συνεχή ίνα άνθρακα, αλλά με θερμοπλαστική ρητίνη και μία πλάκα με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη και κομμάτια ινών άνθρακα (μέση – πράσινη γραμμή).



Σχήμα 3-39: Αριστερά: Όριο αντοχής (από αριστερά προς τα δεξιά) – συνεχή ίνα άνθρακα με μήτρα θερμοπλαστικής ρητίνης, μικρές ίνες άνθρακα με μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης, συνεχής ίνα άνθρακα με μήτρα θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης
Δεξιά: Μέτρο ελαστικότητας των αντίστοιχων υλικών

Η υπεροχή της κατασκευασμένης πλάκας των Hao et al. είναι εμφανής και οι τιμές είναι συγκρίσιμες με υλικά που ήδη αξιοποιούνται στη ναυπηγική.

Η εταιρεία Moi Composites χρησιμοποίησε την παραπάνω μέθοδο, η οποία ονομάζεται Κατασκευή με Συνεχείς Ίνες (CFM) για την κατασκευή του μεγαλύτερου έως σήμερα εκτυπωμένου σκάφους από ίνες γυαλιού. Το μήκος και το πλάτος του σκάφους είναι 6.5m και 2.5m (Σχήμα 3-40). Αξίζει να σημειωθεί, βέβαια, ότι δεν εκτυπώθηκε ως ένα ενιαίο κομμάτι, αλλά ως πολλά επιμέρους που στη συνέχεια κολλήθηκαν μεταξύ τους.



Σχήμα 3-40: Αριστερά αφότου έχουν κολληθεί τα εκτυπωμένα κομμάτια και δεξιά το τελικό σκάφος βαμμένο (3dnatives.com)

Μία τεχνολογία που χρησιμοποιεί θερμοπλαστικές ρητίνες και θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από τα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών σε ευρεία κλίμακα, έχοντας ήδη χρησιμοποιηθεί είναι η Large Scale Additive Manufacturing (LSAM), τεχνολογία που έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Thermwood. Ο συγκεκριμένος 3D εκτυπωτής αποτελεί ένα υβρίδιο προσθετικής και αφαιρετικής τεχνολογίας, προκειμένου να είναι πιο ευέλικτος (amfg.ai/). Με τη χρήση αυτού του εκτυπωτή κατασκευάστηκαν διάφορα κομμάτια ενός καλουπιού από ένα σκάφος μήκους 51 ft (Σχήμα 3-41 & 3-42).



Σχήμα 3-41: Μηχάνημα LSAM της Thermwood εκτυπώνει κομμάτι καλουπιού για την κατασκευή πλαστικού σκάφους μήκους 51 ft. (3dnatives.com)



Σχήμα 3-42: Κομμάτι του καλουπιού ολοκληρωμένο (3dnatives.com)

Μελλοντικά ένα ναυπηγείο θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί σχεδόν εξ ολοκλήρου τη γραμμή παραγωγής του αξιοποιώντας τεχνολογίες 3D εκτύπωσης. Μόνο στο στάδιο μετά την κατασκευή του κάθε κομματιού (post-processing) θα χρειαζόταν να επέμβει ένας άνθρωπος.

Ανασκόπηση τεχνολογιών

Στο Κεφάλαιο 3 έχει γίνει αναφορά σε ένα πλήθος τεχνολογιών και μεθόδων παρασκευής που αφορούν τα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών. Κάποιες είναι ώριμες και έχουν ήδη ενταχθεί σε κάποια, κάποιες αξιοποιούνται σε άλλους κλάδους και είναι σε μία διαδικασία ένταξης και στον κλάδο της ναυπηγικής και κάποιες είναι σε ερευνητικό στάδιο. Όλες, όμως, διαμορφώνουν από τώρα μία εικόνα για το πώς θα μπορούσε να είναι ένα ναυπηγείο στο εγγύς μέλλον. Αν και ο κλάδος, λόγω οικονομικού μεγέθους και υψηλής εξατομίκευσης των προϊόντων δεν είναι τόσο ευέλικτος, οι τεχνολογικές εξελίξεις σύντομα θα τον κατακλύσουν. Τεχνολογίες ψηφιοποίησης, τεχνητής νοημοσύνης, διαδικτύου των πραγμάτων κ.ά. θα διαμορφώσουν το Έξυπνο Ναυπηγείο πολύ σύντομα, επιτρέποντας τις εταιρείες να εκμεταλλευτούν πλήρως τα μέσα που διαθέτουν, όπως χώρο, τεχνογνωσία, μηχανήματα και ανθρώπινο δυναμικό.

4 Κεφάλαιο 4 – Case Study

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες που θα μπορούσε σταδιακά, ένα ναυπηγείο πλαστικών σκαφών μεσαίου μεγέθους στην Ελλάδα, να εντάξει στη γραμμή παραγωγής του. Η μελέτη, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω, αφορά ένα υπάρχον ναυπηγείο και οι πληροφορίες παραχωρήθηκαν από τον έναν εκ των ναυπηγών της παραγωγής. Αρχικά, στην εισαγωγή που ακολουθεί περιγράφεται η δομή του ναυπηγείου, τα μοντέλα σκαφών που κατασκευάζει και ο όγκος παραγωγής του. Στη συνέχεια αναφέρονται τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ένα ναυπηγείο πριν ξεκινήσει τις διαδικασίες για την είσοδό του στο Ναυπηγείο 4.0. Ακολουθεί περιγραφή των σταδίων της γραμμής παραγωγής του έτσι όπως έχουν σήμερα και παράλληλα σε ξεχωριστά υποκεφάλαια επισημαίνονται οι αλλαγές που μπορούν να γίνουν τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, με γνώμονα την αυτοματοποίηση της γραμμής παραγωγής.

Το ναυπηγείο για το οποίο θα γίνει η παρακάτω μελέτη παρουσιάζει τα τελευταία χρόνια αλματώδη αύξηση στον ετήσιο όγκο παραγωγής του, κάτι που οδήγησε τους διαχειριστές του να προβούν σε επένδυση σε νέες σύγχρονες εγκαταστάσεις, δίπλα από τις παλιές. Τον τελευταίο ενάμιση χρόνο η γραμμή παραγωγής και το τελικό μοντάρισμα έχουν μεταφερθεί στις νέες αυτές εγκαταστάσεις, οι οποίες αποτελούνται από δύο μεγάλα πανομοιότυπα κτίρια. Στο 1^ο κατασκευάζονται τα πλαστικά (FRP) και γίνεται το αρχικό στάδιο σύνδεσης των κομματιών (Joining of FRPs) και στο 2^ο κτίριο γίνεται η εγκατάσταση του εξοπλισμού (outfitting) και το τελικό μοντάρισμα (assembly). Και τα 2 κτίρια έχουν τέτοια διαμερισματοποίηση που εξυπηρετεί τις συνολικές ανάγκες της γραμμής παραγωγής. Το 1^ο κτίριο αποτελείται από χώρους παρασκευής πλαστικών, τον χώρο της σύνδεσης των επιμέρους κομματιών που έχουν παρασκευαστεί, τον χώρο του τελικού φινιρίσματος και επισκευής, το ξυλουργείο, τον χώρο κοπής υφασμάτων, τον χώρο κοπής υλικών με χρήση CNC-router (κοπή κυρίως αφρών, ξύλων και άλλων πλαστικών), τον χώρο 5-αξονικού CNC (το οποίο κυρίως αξιοποιείται για την κατασκευή νέων καλουπιών διαμορφώνοντας αφρούς) και τον αποθηκευτικό χώρο. Το 2^ο κτίριο αποτελείται από τον χώρο μονταρίσματος και τον χώρο αποθήκευσης του εξοπλισμού.

Έως σήμερα, το ναυπηγείο αυτό ασχολείται αποκλειστικά με την κατασκευή φουσκωτών σκαφών (RIBs) υψηλών προδιαγραφών. Τα σκάφη που κατασκευάζει σήμερα κυμαίνονται σε μήκη από 8 έως σχεδόν 15 m. Κάθε μοντέλο διαθέτει πολλές παραλλαγές διαμόρφωσης χώρων και εξοπλισμού, κάτι που καθιστά το κάθε παραγόμενο σκάφος σχεδόν μοναδικό. Η παραγωγή του ναυπηγείου φέτος θα ξεπεράσει κατά πολύ τα 100 σκάφη και η ανοδική αυτή πορεία προβλέπεται να συνεχιστεί όσο βελτιώνεται η παραγωγική διαδικασία.

Έχοντας ως στόχο, λοιπόν, την αύξηση της παραγωγικότητας και ταυτόχρονα τη διατήρηση της ποιότητας, η οποία το κατέστησε ένα από τα πλέον ανταγωνιστικά ναυπηγεία στον τομέα του παγκοσμίως, η αυτοματοποίηση κάποιων παραγωγικών διαδικασιών αποτελεί φυσικό επακόλουθο. Η ναυπηγική ανέκαθεν αποτελούσε έναν αρκετά χρονοβόρο

κατασκευαστικό τομέα με πολύ έντονη παρουσία χειρωνακτικής εργασίας. Ένα ναυπηγείο που θέλει να αυξήσει σημαντικά τον όγκο παραγωγής και να ανταπεξέλθει σε έναν κλάδο, όπως αυτός των πλαστικών σκαφών όπου διαρκώς νέες τεχνολογίες και υλικά κάνουν την εμφάνισή τους, πρέπει να έχει ως στόχο τη διαρκή εξέλιξη του προκειμένου να παραμένει ανταγωνιστικό.

Τέλος, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει καλύτερα τις ιδέες που θα αναφερθούν παρακάτω για τεχνολογίες και τρόπους αξιοποίησής τους, είναι σημαντικό να ανατρέξει προηγουμένως στα κεφάλαια που προηγήθηκαν, στα οποία γίνονται εκτενείς περιγραφές αυτών των τεχνολογιών, καθώς και άλλων που ενδεχομένως να μην αναφέρονται εδώ.

4.2 Βήματα προς το Ναυπηγείο 4.0

Πριν γίνει αναφορά στο συγκεκριμένο ναυπηγείο, στον τρόπο λειτουργίας του σήμερα καθώς και στις δυνατότητές του να εφαρμόσει καινοτόμες τεχνολογίες βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, θα προηγηθεί μία σύντομη αναφορά στα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ένα οποιοδήποτε ναυπηγείο πριν προχωρήσει σε πρακτικές αναβάθμισης και αυτοματοποίησης της γραμμής παραγωγής του. Όπως σε κάθε εταιρεία, έτσι και τα ναυπηγεία πρέπει να προετοιμάσουν το έδαφος για τις αλλαγές που επιθυμούν να πραγματοποιήσουν προκειμένου να αυξήσουν την παραγωγή τους. Πρακτικές που αυτοματοποιούν μία διαδικασία δεν σημαίνει *a priori* την αύξηση του όγκου παραγωγής, αν αυτές δεν συνοδεύονται από μία κατάλληλη προετοιμασία.

Αρχικά, πρέπει να διασαφηνιστεί ο στόχος του ναυπηγείου, τόσο άμεσα όσο και σε βάθος χρόνου. Με το που καταστεί αυτό σαφές, πρέπει να τεθούν τα ακόλουθα ερωτήματα από την πλευρά της διοίκησης και των υπεύθυνων παραγωγής:

- ποια είναι η κουλτούρα που έχει υιοθετήσει έως σήμερα η εταιρεία ως προς την εξέλιξη και αναβάθμιση,
- τι ανάγκες έχει σε ανθρώπινο δυναμικό για να πετύχει τους στόχους της
- τι σχέση έχει με τους εργαζόμενούς της
- πόσο είναι διατεθειμένη να επενδύσει σε βάθος χρόνου σε αυτούς
- ποια είναι τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει προκειμένου να φτάσει στους στόχους της
- τι είναι διατεθειμένη να «θυσιάσει»
- τι ποσό να επενδύσει.

Απαντώντας σε αυτά τα ερωτήματα και σε όποια άλλα προκύψουν στην πορεία, μπορεί να διαμορφωθεί ένα πλαίσιο μέσα στο οποίο μπορεί να κινηθεί με πιο σαφή όρια προς το τελικό στόχο. Δεδομένου ότι κάθε ναυπηγείο ασχολείται με διαφορετικού είδους προϊόντα και διαθέτει διαφορετική προσέγγιση της αγοράς, δεν υπάρχει μία και μοναδική λύση του προβλήματος.

Πριν περιγραφούν τα βήματα παραγωγής και οι τεχνολογίες και πρακτικές που μπορούν να εφαρμοστούν σε κάθε επιμέρους βήμα, θα γίνει μία γενική περιγραφή των τεχνολογιών που θα αξιοποιήσει το ναυπηγείο του μέλλοντος. Η είσοδος στην αυτοματοποίηση ξεκινάει από την πλήρη ψηφιοποίηση του ναυπηγείου, που θα επιτρέψει την απρόσκοπτη ροή

πληροφορίας μεταξύ των συστημάτων και των ανθρώπων που εργάζονται σε αυτό. Προκειμένου να καταστεί αυτό δυνατό, όπως έχει ήδη γίνει αναφορά στο 2^ο Κεφάλαιο, θα αξιοποιηθούν τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), Συλλογής και Επεξεργασίας Δεδομένων (Big Data/ Data Processing), Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing) και Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence). Με την είσοδο αυτών των τεχνολογιών και την αξιοποίηση αισθητήρων και φυσικών συστημάτων, όπως είναι τα διάφορα μηχανήματα και τα ρομπότ, θα δημιουργηθούν τα λεγόμενα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems), αποτελούμενα από το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) και το φυσικό σύστημα (Φυσικό Δίδυμο). Αυτές, εν συντομία, είναι οι τεχνολογίες που αλλάζουν ριζικά τον τρόπο λειτουργίας όλων των βιομηχανιών. Με τη συνεργασία αυτών, με τεχνολογίες που ήδη αξιοποιούνται από τα ναυπηγεία, θα επιτευχθεί σταδιακά η αυτοματοποίηση διαφόρων τμημάτων της παραγωγής.

4.3 Στάδια παραγωγής

Τα στάδια της παραγωγής σήμερα για το συγκεκριμένο ναυπηγείο, που στη βάση τους αποτελούν τη συνήθη πρακτική των περισσότερων ναυπηγείων, είναι τα ακόλουθα:

1. Σχεδιασμός μοντέλων / Προετοιμασία σχεδίων προς παραγωγή
2. Οργάνωση παραγωγής και προμήθεια υλικών/ εξοπλισμού
3. Παραγωγή πολύστρωτων κομματιών (προϊόντων και καλουπιών)
4. Συναρμολόγηση και τοποθέτηση εξοπλισμού

Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από την κατασκευή κάποιων ανοξείδωτων κομματιών, σχεδόν όλα τα επιμέρους κομμάτια του τελικού σκάφους κατασκευάζονται από το ίδιο το ναυπηγείο, δεν γίνεται δηλαδή εξωτερική ανάθεση (outsourcing). Παρακάτω περιγράφονται τα βήματα, όπως αυτά διαμορφώνονται σήμερα στο ναυπηγείο και δίνονται προτάσεις για τεχνολογίες που μπορούν βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα να ενταχθούν σε κάθε ένα από αυτά. Ως βραχυπρόθεσμα θα θεωρηθεί το χρονικό διάστημα 1–2 ετών για την εισαγωγή της τεχνολογίας/μεθόδου, ενώ ως μακροπρόθεσμα θα θεωρηθεί ένα διάστημα από 5 και πάνω έτη.

4.3.1 Σχεδιασμός μοντέλων και προετοιμασία σχεδίων προς παραγωγή

Σήμερα

Ο σχεδιασμός των γαστρών γίνεται με τη χρήση προγράμματος CAD. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα επιτρέπει τον παραμετρικό σχεδιασμό, κάτι που μειώνει αρκετά τον χρόνο αλλαγής των σχεδίων. Οι ανθρωπόμορφες που χρειάζονται ανά καινούριο μοντέλο (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο υδροδυναμικός σχεδιασμός της γάστρας) είναι κατά μέσο όρο 1000. Αρχικά, γίνεται μία έρευνα της αγοράς προκειμένου να αποφασιστεί τι θα κατασκευαστεί και αποφασίζεται ο τύπος του φουσκωτού, με τις κατηγορίες να είναι δύο: σπορ ή τουριστικό. Τα

σπορ εν γένει είναι πιο ελαφριά και διαθέτουν λιγότερο εξοπλισμό, ενώ τα τουριστικά είναι κατασκευασμένα για να μεταφέρουν περισσότερο κόσμο. Ύστερα, συνυπολογίζοντας διάφορες παραμέτρους (π.χ. κανονισμούς, διαστάσεις, απαιτήσεις αγοραστή) ξεκινάει ο παραμετρικός σχεδιασμός του μοντέλου. Μόλις οι κύκλοι σχεδιασμού ολοκληρωθούν επιτυχώς και το σχέδιο εγκριθεί από τον συνεργαζόμενο νηογνώμονα, τότε δημιουργείται ένα CAD αρχείο για την κατασκευή των καλουπιών, ελαφρώς διαφορετικό ως προς τις διαστάσεις από το αρχικό σχέδιο.

Βραχυπρόθεσμα

Σε επίπεδο τεχνολογίας, τα CAD προγράμματα είναι ακόμη η πρώτη λύση για το σχεδιασμό. Όσο εξελίσσονται διάφορα CAD προγράμματα, ενισχύεται η διασυνδεσιμότητά τους και καθίσταται πιο εύκολη η μετάδοση της πληροφορίας από πρόγραμμα σε πρόγραμμα. Αυτό σημαίνει ότι πλέον μπορεί να υιοθετηθεί ένα σύστημα μετάδοσης της σχεδιαστικής πληροφορίας χωρίς να χρειάζονται αλλαγές ή μετατροπές αυτού. Ένα 3D σχέδιο δεν θα χρειάζεται να μετατρέπεται σε 2D προκειμένου να το αξιολογήσει ο νηογνώμονας ή να το αξιοποιήσουν οι τεχνίτες σαν κατασκευαστικό οδηγό. Η συγκεκριμένη προσέγγιση, ως προς το σχεδιασμό, επιτεύχθηκε για πρώτη φορά τον Ιανουάριο του 2023 για ένα σκάφος βυθοκόρησης 2500m³. Αποτελεί αποτέλεσμα της συνεργασίας μεταξύ των Damen Engineering (Θυγατρική εταιρία της Damen Group, ναυπηγικές υπηρεσίες), Bureau Veritas (BV – Γαλλικός Νηογνώμονας) και της NAPA (εταιρίας παροχής ναυπηγικών λογισμικών). Με τη χρήση κοινής μορφής αρχείου 3D, κάτι που επέτρεψε το λογισμικό της NAPA, το ναυπηγικό γραφείο της Damen να ήταν διαρκώς σε άμεση επαφή με τον νηογνώμονα, ο οποίος μπορούσε να αξιοποιήσει το ίδιο αρχείο για τα σχόλιά του, οπότε δεν χρειάστηκε ποτέ να μετατραπεί το 3D σχέδιο σε 2D. Με αυτόν τον τρόπο εξοικονομείται χρόνος και ελαχιστοποιούνται τα λάθη, που ενδεχομένως να προέκυπταν κατά τη μετατροπή των σχεδίων (marine-offshore.bureauveritas.com/, 2023). Αυτή είναι μία στρατηγική, η οποία θα μπορούσε να εφαρμόσει το ναυπηγείο σε συνεργασία με έναν νηογνώμονα στο προσεχές μέλλον.

Μακροπρόθεσμα

Κύριες τεχνολογίες που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε βάθος χρόνου είναι η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), η Εικονική Πραγματικότητα (VR) και τα Ψηφιακά Δίδυμα / Προσομοιώσεις (Digital Twins / Simulations).

Αρχικά, η τεχνολογία AI όσο εξελίσσεται θα εντάσσεται σε ακόμη περισσότερα προγράμματα και μηχανήματα. Σύντομα, ένα πρόγραμμα που αξιοποιεί τεχνολογία AI θα μπορούσε να «εκπαιδευτεί» για να δημιουργεί νέα μοντέλα με βάση τις αρχικές παραμέτρους που του ζητήθηκαν. Αν αυτή τη στιγμή χρειάζονται 1000 ώρες για τη σχεδίαση ενός πλήρους μοντέλου CAD, μαζί με όλες τις παραλλαγές του (κάθε μοντέλο-φουσκωτό έχει διάφορες παραλλαγές από τις οποίες μπορεί να επιλέξει ο πελάτης), αυτό θα μπορούσε να γίνει σε μερικά λεπτά με την κατάλληλη υπολογιστική ισχύ. Σε μία τέτοια περίπτωση, ο σχεδιαστής-

ναυπηγός καλείται στο post-process να αλλάξει απλά τις περιοχές που δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τεχνολογία AI έχει ήδη αξιοποιηθεί και από τη NASA προκειμένου να κατασκευάσει ελαφριά κομμάτια για χρήση σε διαστημόπλοια. Τα κομμάτια αυτά αναφέρονται και ως «εξελιγμένες δομές» (evolved structures) και θα μπορούσαν να αλλάξουν ριζικά τη σχεδίαση των ενισχυτικών μερών ενός σκάφους FRP (interestingengineering.com).

Η τεχνολογία VR στο στάδιο της σχεδίασης θα μπορούσε σύντομα να επιτρέψει σε μία τελείως διαφορετική προσέγγιση τη δημιουργία νέων μοντέλων. Η εργονομία και η αίσθηση που θα δώσει στον χρήστη το σκάφος, αφού κατασκευαστεί, θα μπορεί να επιτευχθεί από τα πρώτα βήματα σύλληψής του ως ιδέα. Με αυτόν τον τρόπο, οι αλλαγές που ενδέχεται να προκύψουν σε ένα σχέδιο παρουσιάζονται πολύ νωρίτερα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική μείωση του χρόνου κατασκευής του σκάφους. Επίσης, μειώνεται και η φύρα μιας και δεν κατασκευάζονται μέρη που δεν θα αξιοποιηθούν στην τελική κατασκευή.

Με την αρωγή και άλλων τεχνολογιών (enabling technologies), σύντομα η ιδέα των Digital Twins θα ξεκινάει ήδη από τα πρώτα σχέδια νέων σκαφών και θα εμπλουτίζεται καθ'όλη τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας τους. Με τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου μέσω του 3D σχεδίου θα ξεκινάει παράλληλα και η δημιουργία του Ψηφιακού Διδύμου. Το Ψηφιακό Δίδυμο θα μπορέσει να δώσει περισσότερα δεδομένα για τη δημιουργία προσομοιώσεων, κυρίως λόγω της σύγκρισης που θα υπάρχει μεταξύ του αρχικού σχεδίου και της τελικής κατασκευής. Ένα ναυπηγείο θα μπορεί να αντλεί χρήσιμες πληροφορίες μέσω των Digital Twins των κατασκευασμένων μοντέλων και να τις αξιοποιεί για περαιτέρω βελτίωση τόσο των σχεδίων, όσο και των κατασκευαστικών πρακτικών που ακολουθεί.

4.3.2 Οργάνωση παραγωγής και προμήθεια υλικών / εξοπλισμού

Σήμερα

Τα στάδια της παραγωγής προκύπτουν από τα σχέδια προς παραγωγή. Οι χρόνοι παραγωγής και τα βάρη έχουν προκύψει από την αρχική μελέτη και επαληθεύονται μέσα από τα πρώτα μοντέλα που κατασκευάζονται. Πληροφορίες σχετικά με τους χρόνους και την πρόοδο της γραμμής παραγωγής καταγράφονται σε υπολογιστικά φύλλα excel.

Με παρόμοιο τρόπο γίνεται και η καταγραφή των υλικών. Από τα αρχικά σχέδια έχει δημιουργηθεί το BoM (Bill of Materials) του κάθε μοντέλου. Για τα αναλώσιμα, τα εργαλεία και τον εξοπλισμό που χρειάζονται χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ERP (Enterprise Resource Planning) της SAP. Η αποθήκη του ναυπηγείου έχει μια γενική κατηγοριοποίηση των αναλώσιμων και εργαλείων που χρησιμοποιούνται. Δηλαδή, για παράδειγμα, τα εργαλεία όλα βρίσκονται στον κωδικό «εργαλεία», χωρίς να υπάρχει συγκεκριμένη υποκατηγορία του τύπου εργαλείου ή των ανταλλακτικών του. Αντίθετα τα αναλώσιμα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σκαφών έχουν διακριτή κατηγοριοποίηση.

Βραχυπρόθεσμα

Αρχικά, το ναυπηγείο μπορεί να αξιοποιήσει τεχνολογίες Internet of Things για να επιτρέψει την εύκολη μεταφορά της πληροφορίας μεταξύ των ανθρώπων αλλά και των μηχανημάτων του ναυπηγείου. Με τη χρήση κάποιας τεχνολογίας RTLS (Real Time Location System), όπως κωδικών RFID και σε συνδυασμό με τεχνολογίας Wi-Fi, αισθητήρων και καμερών, μπορεί να διαμορφωθεί το πλαίσιο πάνω στο οποίο θα βασιστούν πολλές λειτουργίες του ναυπηγείου. Επιπλέον, άμεσα μπορούν να ενσωματωθούν στο κομμάτι της οργάνωσης της παραγωγής τα tablet, όπου μέσω του τοπικού δικτύου θα επικοινωνούν με τους κεντρικούς υπολογιστές για να λαμβάνουν και να στέλνουν πληροφορίες. Με αυτό τον τρόπο ο ναυπηγός – υπεύθυνος παραγωγής απαλλάσσεται από εργασίες καταγραφής των φάσεων της παραγωγής (φασεολόγιο) που συμπληρώνουν οι επικεφαλής κάθε κατασκευαστικής ομάδας. Όλη η οργάνωση μπορεί να δομηθεί ψηφιακά και δεν υπάρχει απαίτηση για διαρκή συνεννόηση μεταξύ υφισταμένων και προϊσταμένων, γιατί η ροή των εργασιών εμφανίζεται στο tablet της κάθε περιοχής, για τον καθένα ξεχωριστά. Για να υλοποιηθεί μία τέτοια ιδέα, υπάρχουν εταιρείες που παρέχουν τόσο τον απαραίτητο εξοπλισμό όσο και το λογισμικό που μπορεί να υποστηρίξει τις ανάγκες του ναυπηγείου. Συνήθως, οι εταιρείες που παρέχουν συστήματα ERP υποστηρίζουν τέτοιες υπηρεσίες. Μέσω των tablet ή οθονών αφής σε διάφορα σημεία του ναυπηγείου θα μπορούν οι τεχνίτες να λαμβάνουν όλες τις χρήσιμες πληροφορίες που χρειάζονται για τις εργασίες που πρέπει να ολοκληρωθούν, αλλά και να σημειώνουν τυχόν θέματα που προκύπτουν κατά την πορεία. Αυτά τα δεδομένα μπορούν αυτομάτως να συλλέγονται για την περαιτέρω αξιολόγηση της γραμμής παραγωγής και μεταγενέστερα ίσως να αξιοποιούνται και από αλγορίθμους για τη βελτιστοποίησή της. Στο 2^ο και 3^ο κεφάλαιο έχει γίνει ήδη αναφορά για τις χρήσεις tablet, συστημάτων χρήσης κωδικών RFID και αισθητήρων. Προφανώς, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τη στρατηγική που θέλει να ακολουθήσει το ναυπηγείο μπορεί να τις εντάξει και διαφορετικά στη γραμμή παραγωγής του.

Μακροπρόθεσμα

Δύο τεχνολογίες που σταδιακά θα μπορούσαν στο μέλλον να ενταχθούν στη γραμμή παραγωγής του συγκεκριμένου ναυπηγείου είναι ένα ERP σύστημα που να αξιοποιεί τεχνολογία AI για τη δομή και οργάνωση της παραγωγής, καθώς και η τεχνολογία AR, η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί είτε σε tablet είτε σε ειδικά γυαλιά που μπορούν να προβάλλουν πληροφορίες στον χρήστη.

Ήδη υπάρχουν εταιρείες που παρέχουν συστήματα ERP των οποίων διάφορες δυνατότητες υποστηρίζονται από τεχνολογίες AI, όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο Κεφάλαιο. Το ERP σύστημα του ναυπηγείου στο μέλλον θα έχει τη δυνατότητα μέσα από μία τεράστια συλλογή δεδομένων, παλιών και νέων, να υπολογίζει τη βέλτιστη λύση για τα δεδομένα του ναυπηγείου, βελτιώνοντας έτσι τους χρόνους σε κάθε στάδιο της παραγωγής και επιτρέποντας την απρόσκοπτη λειτουργία όλης της παραγωγικής διαδικασίας.

Η τεχνολογία AR σύντομα θα μπορούσε να αποτελεί το μέσο επικοινωνίας όλων των απαραίτητων πληροφοριών για τους τεχνίτες του ναυπηγείου. Με τη χρήση κατάλληλου μέσου οπτικοποίησης της πληροφορίας (γυαλιά ή tablet) θα γίνεται γνωστό στον τεχνίτη το επόμενο βήμα της παραγωγικής διαδικασίας μεταξύ άλλων χρήσιμων πληροφοριών. Τέτοια συστήματα θα μπορούσαν να ενταχθούν στο σύνολο των παραγωγικών διαδικασιών και να αποτελέσουν αναπόσπαστο στοιχείο αυτών. Παράδειγμα χρήσης αυτής της τεχνολογίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Οδηγίες σε tablet με χρήση AR [AR for manufacturing]

4.3.3 Παραγωγή πολύστρωτων προϊόντων και καλουπιών

Σήμερα

Για την παραγωγή των πολύστρωτων κομματιών κατασκευάζονται καλούπια για όλα τα κομμάτια που απαρτίζουν ένα σκάφος. Ο αριθμός των κομματιών για τις γάστρες που κατασκευάζονται κυμαίνονται από 17 έως 33, για τα οποία πρέπει να κατασκευαστούν πάνω από ένα καλούπια για το κάθε κομμάτι. Αυτό συμβαίνει διότι ανά μερικούς κατασκευαστικούς κύκλους χρειάζονται συντήρηση (3 έως 7 μέρες εκτός παραγωγής), οπότε προκειμένου να μη σταματάει η γραμμή παραγωγής, υπάρχει πάντοτε και ένα δεύτερο ίδιο καλούπι.

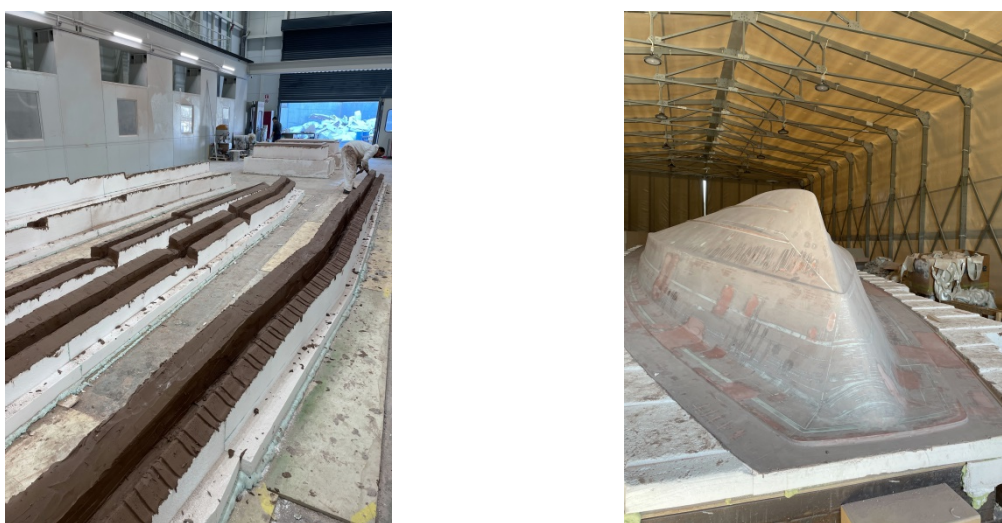
Τα καλούπια κατασκευάζονται πλέον εντός του ναυπηγείου, διότι διαθέτει 5-αξονικό CNC κοπής αφρού. Η διαδικασία κατασκευής ενός καλουπιού περιγράφεται παρακάτω. Αρχικά, τοποθετούνται και κολλώνται μεταξύ τους μπλοκ αφρού (Σχήμα 4-2), όπου διαμορφώνουν έναν όγκο, που στο σύνολό του είναι μεγαλύτερος του τελικού θηλυκού μέρους του καλουπιού (μήτρα-plug), το οποίο αποτελεί και την πρώτη φάση κατασκευής. Η κοπή του αφρού γίνεται λίγα χιλιοστά περισσότερο από την τελική διάσταση του καλουπιού, διότι από πάνω τοποθετούνται και άλλα υλικά. Το πρώτο υλικό που τοποθετείται είναι μία ειδική

πάστα, χρώματος καφέ (Σχήμα 4-3), που θα χρησιμεύει ως υπόστρωμα για την βαφή και το gel coat (Σχήμα 4-4) που θα τοποθετηθούν από πάνω. Έως σήμερα, για τη σωστή τοποθέτηση αυτής της πάστας απαιτούνται περίπου 160 εργατοώρες, αφού μερικά χιλιοστά παράνω σε κάποιο σημείο θα μπορούσαν να τραυματίσουν τη μήτρα του αφρού, λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας που θα αναπτυχθεί τοπικά (εξώθερμη αντίδραση η στερεοποίησή της).



Σχήμα 4-2: Μπλοκ αφρού πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) από την κοπή

Το ναυπηγείο έχει ήδη προχωρήσει σε αγορά ενός μηχανήματος εναπόθεσης της πάστας (extruder), το οποίο - μόλις εγκατασταθεί στη γραμμή παραγωγής - προβλέπεται να μειώσει τις απαιτούμενες εργατοώρες σε μόλις 16 (90% μείωση χρόνου). Μετά την τοποθέτηση της πάστας, το 5-αξονικό CNC κόβει την περίσσεια αυτής και διαμορφώνει την τελική γεωμετρία. Για την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης τοποθετείται από πάνω μία ειδική βαφή και το gel coat. Στη δεύτερη φάση, η μήτρα ντύνεται με πολλές στρώσεις από υφάσματα γυαλιού, τοποθετούνται ενισχυτικά σε διάφορα σημεία για να διασφαλίσουν την ακεραιότητα του καλουπιού και στο τέλος εγκαθίσταται μία μεταλλική βάση, πάνω στην οποία είναι συνδεδεμένο το καλούπι και επιτρέπει τη μεταφορά του εντός του ναυπηγείου.

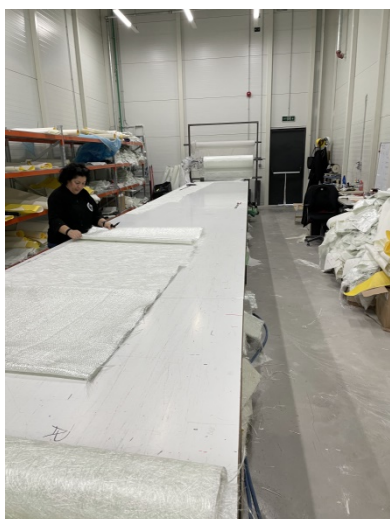


Σχήμα 4-3: Τοποθέτηση πάστας (αριστερά) και διαδικασίες φινιρίσματος στην πάστα (δεξιά)



Σχήμα 4-4: Gel coat σε καλούπι υπό κατασκευή

Η κοπή των υφασμάτων συμβαίνει σε ξεχωριστό χώρο χειρωνακτικά (Σχήμα 4-5). Πατρών έχουν διαμορφωθεί για όλες τις στρώσεις που είναι να τοποθετηθούν σε κάθε κομμάτι για όλα τα μοντέλα φουσκωτών. Τα μηχανήματα κοπής είναι απλά ψαλίδια και ηλεκτρικά ψαλίδια. Επιπλέον, κάποια από τα κομμάτια της γάστρας είναι κατασκευές τύπου sandwich. Για την κοπή των αφρών ή των κόντρα πλακέ θαλάσσης χρησιμοποιούνται δύο CNC-router (Σχήμα 4-6), που βρίσκονται απομονωμένα σε ξεχωριστό χώρο στο ίδιο κτίριο. Τα ίδια μηχανήματα αξιοποιούνται και για την κοπή άλλων επίπεδων υλικών (πλαστικών κυρίως), για διαμόρφωση τμημάτων του φουσκωτού.



Σχήμα 4-5: Χώρος κοπής υφασμάτων



Σχήμα 4-6: CNC-router

Τα πολύστρωτα κομμάτια κατασκευάζονται σε ειδικούς χώρους, οι οποίοι μπορούν και απομονώνονται από το υπόλοιπο κτίριο, αλλά επιτρέπουν τη διέλευση των μεγάλων κομματιών που κατασκευάζονται με συρόμενες πόρτες. Στον κάθε χώρο υπάρχει παροχή κενού (Σχήμα 4-7) περιμετρικά, προερχόμενη από κεντρική μονάδα. Επίσης, ο κάθε χώρος διαθέτει και ένα μεταλλικό σκελετό (gantry) (Σχήμα 4-8) που δίνει τη δυνατότητα για περιστροφή των μεγάλων καλουπιών, τα οποία αναρτώνται σε αυτούς. Άλλο ένα μηχάνημα



Σχήμα 4-7: Παροχή κενού

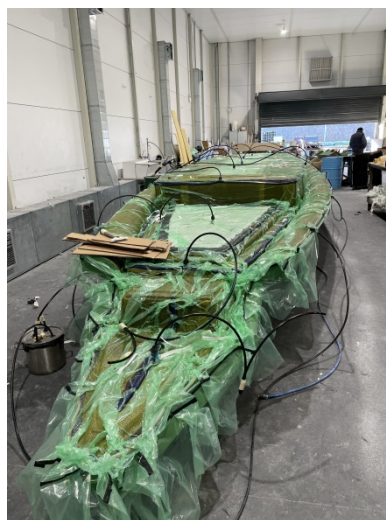


Σχήμα 4-8: Μεταλλικός σκελετός για τη στερέωση των καλούπιών

που βρίσκεται εντός αυτών των χώρων είναι τα ειδικά μηχανήματα (αντλίες) για την τοποθέτηση του gel coat (Σχήμα 4.9) επάνω στα καλούπια (τύπου spray gun). Η διαδικασία παρασκευής των πολύστρωτων τα τελευταία χρόνια έχει μεταβεί από την επίστρωση με το χέρι (hand lay-up) στην έγχυση ρητίνης σε κενό με τη χρήση πλαστικής μεμβράνης (Σχήμα 4-10). Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλή περιεκτικότητα κατ'όγκο σε ίνες και χαμηλή περιεκτικότητα σε κενά αέρα (Τσούβαλης 1998). Οι εργατοώρες που απαιτούνταν για την παρασκευή με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι σε σχέση με αυτές της τωρινής μεθόδου είναι σχεδόν ίδιες, οπότε προς το παρόν το όφελος από την αλλαγή της κατασκευαστικής μεθόδου είναι η καλύτερη ποιότητα του τελικού πολύστρωτου. Επίσης, η επίβλεψη της διαδικασίας έγχυσης κάτω από τη μεμβράνη είναι αρκετά απλή και επιτρέπει διορθωτικές κινήσεις, όπως την επιβολή εξωτερικής πίεσης σε γωνίες όπου μπορεί το κενό να μην ασκεί αρκετή πίεση στις στρώσεις ή την έγχυση επιπλέον ρητίνης σε σημείο που μπορεί να μείνει στεγνό (ένεση με τη χρήση σύριγγας).



Σχήμα 4-9: Μηχάνημα εναπόθεσης gel coat



Σχήμα 4-10: Διαδικασία Infusion (διακρίνεται η πράσινη πλαστική μεμβράνη)

Αφού κατασκευαστούν όλα τα κομμάτια του εκάστοτε μοντέλου, ξεκινάει η διαδικασία κόλλησής τους (Σχήμα 4-11) για τη διαμόρφωση της τελικής γάστρας στο στάδιο των πλαστικών (1^ο κτίριο). Πέρα από τη συναρμολόγηση των πλαστικών κομματιών γίνονται και τα κατάλληλα ανοίγματα (Σχήμα 4-12) στα διάφορα σημεία, που εξυπηρετούν τη μετέπειτα συναρμολόγηση (π.χ. τοποθέτηση τζαμιών, τοποθέτηση καναλιών μέσα από τα οποία περνάνε σωληνώσεις ή καλωδιώσεις) καθώς και το απαραίτητο κόψιμο (trimming) των περιφερειακών κομματιών που είναι εκτός ορίου της κατασκευής (φύρα).



Σχήμα 4-11: Κόλληση δύο πολύστρωτων κομματιών



Σχήμα 4-12: Ανοίγματα στη γάστρα για τη διέλευση καναλιών (μπλε εύκαμπτοι σωλήνες)

Βραχυπρόθεσμα

Θα γίνει μία σύντομη περιγραφή των τεχνολογιών που μπορούν άμεσα να ενταχθούν στο στάδιο της παραγωγής των πολύστρωτων και της κατασκευής νέων καλουπιών. Όσον αφορά τη δημιουργία των καλουπιών, το ναυπηγείο έχει ήδη εντάξει τις πιο σύγχρονες τεχνολογίες που του επιτρέπουν τη γρήγορη και αξιόπιστη κατασκευή αυτών. Τα υφάσματα θα μπορούσαν να κόβονται με CNC-router, με τη χρήση κοπτικών εργαλείων που είναι κατάλληλα για κόψιμο υφασμάτων γυαλιού, ανθρακονήματος ή αραμιδίου. Επιπλέον, η διαδικασία παρασκευής με τη μέθοδο έγχυσης της ρητίνης σε κενό μπορεί να επιταχυνθεί με τη χρήση τεχνολογιών AR, όπως είναι το σύστημα PlyMatch της εταιρείας Angalyph, όπως αναφέρεται και στο 2^ο Κεφάλαιο. Αυτό ή ένα αντίστοιχο σύστημα AR, θα μπορούσε να επιταχύνει τη διαδικασία εναπόθεσης των κομμένων υφασμάτων, με μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς τα όρια του κάθε κομματιού καθώς και του προσανατολισμού των ινών. Κατά αντιστοιχία, σε περίπτωση που θα βόλευε περισσότερο, η χρήση ενός προτζέκτορα ή ενός συστήματος απεικόνισης με τη χρήση laser θα μπορούσε να πετύχει το ίδιο αποτέλεσμα. Δεδομένου, όμως, των πολλών άλλων χρήσεων που θα μπορούσε να έχει η τεχνολογία AR σύντομα, θα αποτελούσε μία πιο ελκυστική επιλογή. Τέλος, μία ακόμη τεχνολογία που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από το ναυπηγείο είναι ένα μηχάνημα υδροκοπής τοποθετημένο πάνω σε ένα ρομποτικό βραχίονα, όπως έχει ήδη γίνει αναφορά στο Κεφάλαιο 3. Η χρήση αυτού του συστήματος CNC-υδροκοπής θα καθιστούσε το τριμάρισμα των πολύστρωτων

κομματιών και το άνοιγμα οπών στα διάφορα τμήματα μια εύκολη και γρήγορη διαδικασία, που δεν θα επιβάρυνε τους εργαζομένους με τα μικροσωματίδια που απελευθερώνονται κατά την κοπή.

Μακροπρόθεσμα

Μακροπρόθεσμα, ριζικές αλλαγές θα μπορούσαν να επιτευχθούν σταδιακά με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, κάποιες εκ των οποίων αναφέρονται παρακάτω. Για αρχή, η κατασκευή καλουπιών θα μπορούσε να γίνει εξ'ολοκλήρου σε ένα στάδιο με τη χρήση ενός 3Δ εκτυπωτή. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η τεχνολογία αυτή έχει ήδη αξιοποιηθεί για την κατασκευή καλουπιών γαστρών και μένει μόνο να επικυρωθεί η καταλληλότητα των καλουπιών αυτών για τη χρήση που προδιαγράφει το συγκεκριμένο ναυπηγείο. Επιπλέον, θα πρέπει να αποτελέσει μία οικονομική εναλλακτική του 5-αξονικού CNC και ολόκληρης της υπόλοιπης διαδικασίας παρασκευής. Τα υφάσματα και οι αφροί που χρησιμοποιούνται στα πολύστρωτα, θα μπορούσαν να κόβονται και να πακετάρονται σε kit, με την αξιοποίηση ενός συστήματος kitting. Αναφορά σε τέτοιου είδους ολοκληρωμένα συστήματα έγινε στο Κεφάλαιο 3. Ένα τέτοιο σύστημα, ακόμη, συνιστά μία ακριβή επένδυση, αλλά ενδεχομένως με την πάροδο του χρόνου να γίνει πιο προσιτό και για μεσαίες επιχειρήσεις, όπως ένα ναυπηγείο πλαστικών σκαφών. Ένας 3Δ εκτυπωτής, διαφορετικού τύπου ενδεχομένως από τον προηγούμενο, θα μπορούσε να εκτυπώνει μικρά κομμάτια (σύνθετα ή απλά πλαστικά) της κατασκευής αντί να γίνεται χρήση καλουπιών για την κατασκευή πολύστρωτων με τη μέθοδο έγχυσης ρητινής σε κενό. Τέλος, μία τεχνολογία όπως η APP (Advanced Ply Placement, αναφορά στο Κεφάλαιο 3) ή κάποια παραλλαγή αυτής, αν καταστεί μία οικονομική λύση πρωτίστως και δευτερευόντως γίνει εύκολη η ενσωμάτωσή της σε μια γραμμή παραγωγής ναυπηγείου, θα μπορούσε επίσης να προσφέρει υψηλά ποσοστά αυτοματοποίησης.

4.3.4 Συναρμολόγηση και τοποθέτηση εξοπλισμού

Σήμερα

Η διαδικασία της συναρμολόγησης και τοποθέτησης εξοπλισμού στα σκάφη γίνεται χειρωνακτικά στο 2^ο κτίριο, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή. Βασικά εργαλεία αξιοποιούνται από έμπειρους τεχνίτες για την τελική συναρμολόγηση όλων των απαραίτητων μερών έως την ολοκλήρωση της κατασκευής του σκάφους (Σχήμα 4-13). Στο ίδιο κτίριο φυλάσσεται όλος ο προς τοποθέτηση εξοπλισμός (Σχήμα 4-14). Η παραγγελία του εξοπλισμού γίνεται μαζικά από τις διάφορες συνεργαζόμενες εταιρείες και προκύπτει ύστερα από πρόβλεψη που γίνεται για την παραγωγή του επόμενου έτους. Για την καταγραφή του εξοπλισμού που βρίσκεται στην αποθήκη (σε stock) αξιοποιείται σύστημα ERP.

Η τοποθέτηση του εξοπλισμού των φουσκωτών γίνεται σε σταθμούς συναρμολόγησης. Τα σκάφη βρίσκονται πάνω σε βάσεις και δίπλα στο κάθε ένα υπάρχουν ράφια με όλο τον προς

τοποθέτηση εξοπλισμό (τύπου kit). Η τοποθέτηση του μπαλονιού γίνεται σε ξεχωριστό χώρο διαμορφωμένο εντός του 2^{ου} κτιρίου.



Σχήμα 4-13: Ολοκληρωμένα σκάφη



Σχήμα 4-14: Αποθήκη εξοπλισμού προς τοποθέτηση

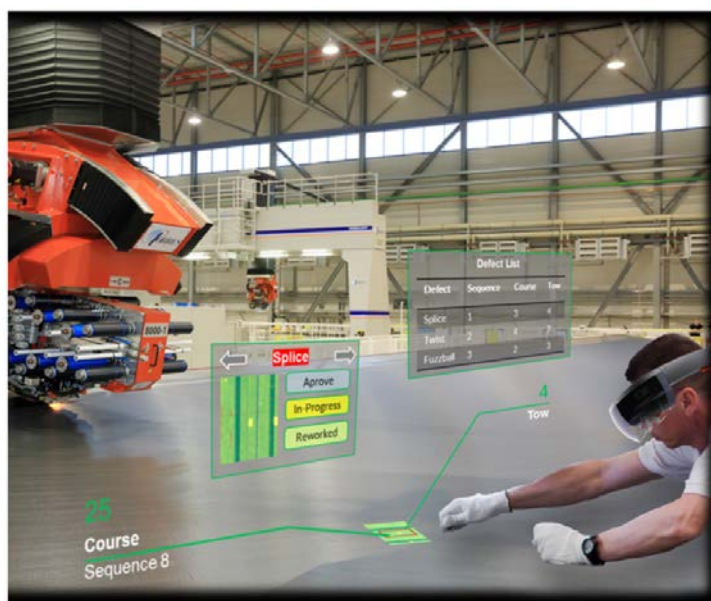
Βραχυπρόθεσμα και Μακροπρόθεσμα

Για τη διευκόλυνση των εργατών και την επιτάχυνση των διαδικασιών συναρμολόγησης θα μπορούσαν σταδιακά να εντάσσονται cobots στη γραμμή παραγωγής. Το πλεονέκτημα των cobots έναντι των ρομπότ, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι το γεγονός ότι μπορούν να λειτουργούν σε συνεργασία με τον άνθρωπο. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για μία γραμμή παραγωγής, όπου δεν είναι όλα τυποποιημένα και οι παράμετροι παραγωγής, όπως αυτές ενός ναυπηγείου, αλλάζουν συνέχεια. Ένα πλήρως συνδεδεμένο ναυπηγείο θα μπορούσε στο μέλλον να λειτουργεί, κατά τμήματα και εξ αποστάσεως, με το τμήμα συναρμολόγησης και τοποθέτησης εξοπλισμού να είναι ένα από αυτά. Με την αξιοποίηση τεχνολογιών IoT, Cyber-Physical Systems, αισθητήρων και τη χρήση ρομπότ (ή cobots) η συναρμολόγηση θα μπορούσε σχεδόν εξ ολοκλήρου να γίνεται εξ αποστάσεως, με τον τεχνίτη να επιβλέπει ή να παρεμβαίνει μόνο εκεί που χρειάζεται. Επιπλέον, κατ' αντιστοιχία με το στάδιο της οργάνωσης παραγωγής, θα μπορούσε να ενταχθεί και η τεχνολογία AR εδώ. Προφανώς, ένα εργοστάσιο που επενδύει σε μία τέτοια τεχνολογία θα προσπαθήσει να την αξιοποιήσει σε όλα τα στάδια της παραγωγής με κάποιο τρόπο.

4.3.5 Επιθεώρηση και τεχνολογίες Structural Health Monitoring (SHM)

Προς το παρόν το ναυπηγείο δεν έχει εντάξει κάποια τεχνολογία για την επιθεώρηση των σκαφών που κατασκευάζει. Η επιθεώρηση και αξιολόγηση, από το στάδιο της κατασκευής των πολύστρωτων έως και την τελική συναρμολόγηση, γίνεται εμπειρικά. Γενικά, ο κλάδος της ναυπήγησης πλαστικών σκαφών δεν έχει ενσωματώσει ακόμη τεχνολογίες που να μπορούν να αξιοποιηθούν για την επιθεώρηση σε οποιοδήποτε στάδιο της γραμμής παραγωγής. Με την εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών που αναφέρθηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο και

αφορούν την επιθεώρηση πολύστρωτων κομματιών - που είναι και το πιο σημαντικό σημείο για την κατασκευή ενός πλαστικού προϊόντος - σταδιακά ίσως εισαχθούν και στην ναυπηγική. Ενδεχομένως, αρχικά, όχι σε όλη την κατασκευή του σκάφους, αλλά σε καίρια σημεία της κατασκευής, όπου ο συντελεστής ασφάλειας είναι μικρός και οι καταπονήσεις μεγάλες. Ένας επίσης ενδιαφέρον τομέας είναι οι τεχνολογίες SHM. Μία κατασκευή στο μέλλον, θα έχει μια ψηφιακή ταυτότητα (Digital Twin) και τεχνολογίες στον τομέα αυτό θα επιτρέψουν τη συλλογή δεδομένων από σημεία της κατασκευής που χρήζουν προσοχής και θα ενημερώνουν διαρκώς τον χρήστη αλλά και την εταιρεία για την κατάσταση της κατασκευής. Τέλος, ενδιαφέρον για το ναυπηγείο μπορεί να έχουν τεχνολογίες Online Monitoring και Non-Destructive Inspection σαν αυτή που παρουσιάζεται στο Σχήμα (4-15) και συνδυάζει πληθώρα τεχνολογιών, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR). Η εικονιζόμενη τεχνολογία αναπτύσσεται από την InFactory Solutions, εταιρεία που έχει αναφερθεί και στο 2^ο Κεφάλαιο. Η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύσσεται στα πλαίσια επιθεώρησης πολύστρωτων που κατασκευάζονται με μηχάνημα AFP και έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει την ατέλεια και να κατευθύνει τον χρήστη σε αυτήν παρέχοντάς του πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία επιδιόρθωσης που πρέπει να ακολουθηθεί. Ο εντοπισμός των ατελειών γίνεται μέσω αισθητήρων που βρίσκονται στη γραμμή παραγωγής. Τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες αναλύονται από αλγορίθμους από τον server του εργοστασίου και στο τέλος εξάγεται η πληροφορία σε κατάλληλη μορφή που αξιοποιείται από τα γυαλιά AR.



Σχήμα 4-15: Επιθεώρηση πολύστρωτου που κατασκευάστηκε με τη μέθοδο AFP με χρήση AR γυαλιών. (Mason 2020, compositesworld.com)

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-1) συνοψίζονται όλα τα στάδια της γραμμής παρασκευής του συγκεκριμένου ναυπηγείου, ως έχουν σήμερα και αναγράφονται επιγραμματικά τεχνολογίες και μέθοδοι που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν τόσο στο άμεσο μέλλον όσο και σε βάθος χρόνου.

Πίνακας 4-1: Σύνοψη τεχνολογιών που αξιοποιούνται και θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στο μέλλον από το ναυπηγείο

Στάδιο Παραγωγής	Τεχνολογίες και Μέθοδοι		
	Σήμερα	Βραχυπρόθεσμα	Μακροπρόθεσμα
Σχεδιασμός	<ul style="list-style-type: none"> - CAD 	<ul style="list-style-type: none"> - Συνεργασία μεταξύ νηογνώμονα και ναυπηγείου για ενιαίο 3D σχέδιο με χρήση CAD 	<ul style="list-style-type: none"> - VR - AI - Digital Twins
Οργάνωση Παραγωγής και προμήθεια υλικών / εξοπλισμού	<ul style="list-style-type: none"> - ERP - Excel 	<ul style="list-style-type: none"> - IoT - RFID - Αισθητήρες / κάμερες - Tablet 	<ul style="list-style-type: none"> - ERP (με AI) - AR (γυαλιά ή tablet)
Παραγωγή	<ul style="list-style-type: none"> - 5-αξονικό CNC - Extruder - CNC-router - Ηλεκτρικά ψαλίδια - Spray gun (gel coat) - Vacuum infusion 	<ul style="list-style-type: none"> - CNC-router για τα υφάσματα - AR (PlyMatch) ή laser ή προτζέκτορα - CNC-υδροκοπή (με ρομποτικό βραχίονα) 	<ul style="list-style-type: none"> - 3D εκτυπωτή (για τα καλούπια) - Σύστημα kitting - 3D εκτυπωτή (για κάποια κομμάτια της κατασκευής) - APP (ή κάποια παρεμφερή)
Συναρμολόγηση και Εξοπλισμός	<ul style="list-style-type: none"> - Kit με εξοπλισμό 	<ul style="list-style-type: none"> - Cobots και ρομποτ - AR 	

5 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σήμερα τα ναυπηγεία ωθούνται σταδιακά προς την κατεύθυνση της μερικής αυτοματοποίησης της γραμμής παραγωγής τους. Η εμφάνιση της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης την τελευταία δεκαετία έχει επηρεάσει όλον τον κλάδο της βιομηχανίας με τις τεχνολογικές εξελίξεις να διαδέχονται η μία την άλλη. Άλλες βιομηχανίες είναι πιο έτοιμες να εντάξουν στο σύνολο της παραγωγής τους μεθόδους, τεχνολογίες και μηχανήματα ψηφιοποιώντας βαθμιαία με αυτόν τον τρόπο πλήρως την παραγωγική διαδικασία και τα προϊόντα τους. Τέτοιες βιομηχανίες είναι η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία, οι οποίες ήδη από την 3^η Βιομηχανική Επανάσταση εκμεταλλεύτηκαν τεχνολογίες που τους επέτρεπαν αυτοματοποίηση της γραμμής παραγωγής τους. Βιομηχανίες που σταδιακά θέλουν ή αναγκάζονται να πάνε προς αυτήν την κατεύθυνση, όπως τα ναυπηγεία, θα χρειαστεί να περάσουν από κάποια στάδια εξοικείωσης προκειμένου να «ωριμάσουν» αρκετά και να φτάσουν στο τεχνολογικό επίπεδο της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια για την καταγραφή των τεχνολογιών και μεθόδων που θα επιτρέψουν σταδιακά σε ένα ναυπηγείο πλαστικών σκαφών να αυτοματοποιηθεί και να ενταχθεί στην ψηφιακή εποχή. Αρχικά, έγινε αναφορά στις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις από τους μεγαλύτερους βιομηχανικούς κλάδους, καθώς αυτοί είναι που ωθούν την εξέλιξη της τεχνολογίας κατά κύριο λόγο. Μετά την αναφορά σε τεχνολογίες και μεθόδους που άμεσα ή σε βάθος χρόνου θα μπορούσαν να υιοθετηθούν ή έχουν ήδη υιοθετηθεί από κάποια ναυπηγεία πλαστικών σκαφών ανά τον κόσμο, γίνεται μία ολιστική προσέγγιση για την εφαρμογή τεχνολογιών που θα επιτρέψουν σε ένα υπάρχον ναυπηγείο στην Ελλάδα να αυτοματοποιηθεί πλήρως. Προφανώς, στην πλειονότητά τους τα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών αποτελούν μικρομεσαίες επιχειρήσεις, που δύσκολα μπορούν να επενδύσουν στη ριζική τους μετάλλαξη σε ένα «Εξυπνο Εργοστάσιο», το οποίο και αποτελεί τον τελικό στόχο της τρέχουσας επανάστασης στον τομέα της βιομηχανίας. Παρ'όλα αυτά, σήμερα όσο ποτέ άλλοτε, οι τεχνολογικές εξελίξεις είναι τόσο ραγδαίες, που η μετάβαση καθίσταται αναπόφευκτη και σύντομα και τα μικρά και μεσαία ναυπηγεία κατασκευής σκαφών από σύνθετα υλικά θα έχουν τη δυνατότητα να εντάξουν όλο και περισσότερες τεχνολογίες, οι οποίες θα είναι πιο προσιτές. Ο σωστός σχεδιασμός ενός πλάνου για την ένταξη τέτοιων τεχνολογιών σε έναν κλάδο, που έως σήμερα είναι αρκετά ανθρωποκεντρικός ως προς τη εξάρτηση της γραμμής παραγωγής του, είναι απαραίτητος για τη σωστή εφαρμογή και αξιοποίησή τους. Η μετάβαση δεν μπορεί να συμβεί ακαριαία, οπότε σίγουρα χρειάζονται στρατηγικά βήματα για να αποδώσουν οι τεχνολογικές επενδύσεις στο μέγιστο.

Είναι γεγονός ότι αυτή τη στιγμή τα ναυπηγεία πλαστικών σκαφών βρίσκονται σε ένα σημείο καμπής. Με την είσοδο τεχνολογιών από το στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης στην εμπορική τους χρήση, θα ξεκινήσει ένα ντόμινο αλλαγών σε αυτά. Χρήσιμο θα ήταν να γίνει μία ανασκόπηση σε 2 με 3 χρόνια της παρούσας διπλωματικής, για να συγκριθούν η τωρινή με την μελλοντική κατάσταση όσον αφορά τα ναυπηγεία, την τεχνολογική τους εξέλιξη καθώς και την πορεία που έχουν χαράξει, καθώς και να αναφερθούν τυχόν νέες τεχνολογίες

που ενδέχεται να έχουν κάνει την εμφάνισή τους. Επιπλέον, λόγω του γενικού χαρακτήρα της συγκεκριμένης διπλωματικής, που εστιάζει τόσο σε τεχνολογίες που εφαρμόζονται στον κλάδο όσο και σε τεχνολογίες που αναπτύσσονται ή αξιοποιούνται σε άλλους αυτή την στιγμή, θα ήταν σκόπιμο να τμηματοποιηθούν σε επιμέρους εργασίες που να εμβαθύνουν σε ένα τεχνολογικό κλάδο τη φορά. Τα κυριότερα θέματα για ένα ναυπηγείο πλαστικών σκαφών την τρέχουσα περίοδο είναι η 3D εκτύπωση, οι τεχνολογίες αυτόματης εναπόθεσης ινών σε καλούπια, η επαυξημένη πραγματικότητα και η τεχνητή νοημοσύνη.

6 Βιβλιογραφία

- Airborne. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://www.airborne.com/>
- Boissonneault, T. (2019, February 14). Felixprinters goes big with new pro L and Pro XL Industrial 3D printers. Retrieved Summer, 2022, from <https://www.3dprintingmedia.network/felixprinters-pro-l-pro-xl-printers/>
- Broughton, B. (n.d.). *MANUFACTURING SCIENCE: Filament Winding and Pultrusion*. Lecture.
- B³ Smartpac. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://www.gurit.com/en/our-business/composite-materials/other/b-smartpac>
- C. (2018, October 24). A guide to CNC Digital Knife Cutting Tools & Blades. Retrieved Fall, 2022, from <https://www.stylecnc.com/user-manual/cnc-knife-cutting-tools.html>
- Chaki, S., & Krawczak, P. (2022). Non-destructive health monitoring of Structural Polymer Composites: Trends and perspectives in the Digital Era. *Materials*. doi:10.3390/ma15217838
- Cobots offer game changing benefits. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://www.universal-robots.com/products/collaborative-robots-cobots-benefits/#>
- Collinson, M., Bower, M., Swait, T. J., Atkins, C., Hayes, S., & Nuhiji, B. (2022). Novel composite curing methods for Sustainable Manufacture: A Review. *Composites Part C: Open Access*, 9, 100293. doi:10.1016/j.jcomc.2022.100293
- Composite 3D printing: An Emerging Technology with a bright future . (2020, February 25). Retrieved Winter, 2022, from <https://amfg.ai/2020/02/25/composite-3d-printing-an-emerging-technology-with-a-bright-future/>
- Cuevas-Aguado, E., García Ramos, C., De Miguel-Giraldo, C., & Mora, M. (2015). Online NDI concept for composite manufacturing process and approximations for the NDT of CFRP Materials Prior to the Autoclave Curing Process. 6th International Symposium on NDT in Aerospace 2014, 12-14th November, Madrid, Spain. e-Journal of Nondestructive Testing. Vol. 20(1). <https://www.ndt.net/?id=16974>
- Cutting and Trimming for Composites. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from <https://www.solvay.com/en/chemical-categories/our-composite-materials-solutions/cutting-and-trimming-composites>
- Damen, Napa and Bureau Veritas successfully deploy 3D classification approvals for First Ship Design. (2023, January 12). Retrieved February, 2023, from <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/damen-napa-and-bureau-veritas-successfully-deploy-3d-classification-approvals-first-ship>
- Deisenroth, M. P., Ong, C. S., & Faisal, A. A. (2021). *Mathematics for Machine Learning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Denkena, B., Schmidt, C., Werner, S., & Schwittay, D. (2021). Development of a shape replicating draping unit for continuous layup of unidirectional non-crimp fabrics on

- complex surface geometries. *Journal of Composites Science*, 5(4), 93.
doi:10.3390/jcs5040093
- Easy machine learning. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from <https://www.os4ml.com/>
- Eyres, D. J., & Bruce, G. J. (2012). *Ship construction*. Oxford: Elsevier.
- Fecova, V., Barna, J., Novak-Marcincin, J., Janak, M., Novakova-Marcincinova, L., & Torok, J. (2012). Visualization of composite lay-up technology with use of augmented reality elements. *2012 IEEE 10th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*. doi:10.1109/sami.2012.6208953
- Flatt, H., Koch, N., Rocker, C., Gunter, A., & Jasperneite, J. (2015). A context-aware assistance system for maintenance applications in smart factories based on augmented reality and indoor localization. *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. doi:10.1109/etfa.2015.7301586
- Floor2Plan Suite. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from <https://www.floororganise.com/floor2plan-suite>
- Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, O., & Vilar-Montesinos, M. (2018). A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard. *IEEE Access*, 6, 13358-13375. doi:10.1109/access.2018.2808326
- Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, O., & Vilar-Montesinos, M. (2018). A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard. *IEEE Access*, 6, 13358-13375. doi:10.1109/access.2018.2808326
- Galar, D., & Kumar, U. (2017). Sensors and data acquisition. *EMaintenance*, 1-72. doi:10.1016/b978-0-12-811153-6.00001-4
- Gardiner, G. (2020, February 24). DC dielectric sensors for industrial composites production. Retrieved Summer, 2022, from <https://www.compositesworld.com/articles/dc-dielectric-sensors-for-industrial-composites-production>
- Geuskens, F., Jurg, R., & Collier, B. (2019). *Manufacturing of Tool-less Composite Hulls and Composite Superstructures*. Retrieved 2022, from <https://curveworks.nl/wp-content/uploads/2019/06/Tool-less-manufacturing.pdf>.
- Graham-Jones, J., & Summerscales, J. (2016). *Marine applications of advanced fibre-reinforced composites*. Oxford: Elsevier Woodhead Publishing.
- Halm, J. (2020). *Developing automated repair techniques for repair of composite structures*. Speech.
- Hao, W., Liu, Y., Zhou, H., Chen, H., & Fang, D. (2018). Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composites. *Polymer Testing*, 65, 29-34. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.11.004
- Hasan, M., & Mohamad, A. R. (2018). Technology Trends in SHIPBUILDING & SHIP REPAIR Towards Industry 4.0. *MyForesight*, (22), 17-24.
- Internet of things - technology and Protocols. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from https://www.tutorialspoint.com/internet_of_things/internet_of_things_technology_and_protocols.htm#

- Kagermann, H., Helbig, J., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: Securing the future of German manufacturing industry ; Final report of the industrie 4.0 working group*. Berlin: Forschungsunion.
- Kanban Tool <https://kanbantool.com>
https://kanbantool.com/assets/simple_cms/cover_page/kanban-tool-logo.png. (2022, August 16). Kanban tool. Retrieved Fall, 2022, from <https://kanbantool.com/kanban-guide/kanban-method>
- Lamb, T. (2003). *Ship design and construction*. Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects & Marine Engineers.
- Leblebici, R. (2018). *Development of an automated adjusting process for robotic end-effectors to handle dry textiles for preforming of carbon fiber reinforced plastics* (Unpublished master's thesis). Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, Luleå University of Technology, Sweden.
- Liu, Y., Yuan, C., Liu, C., Pan, J., & Dong, Q. (2019). Study on the resin infusion process based on automated fiber placement fabricated dry fiber preform. *Scientific Reports*. doi:10.1038/s41598-019-43982-1
- Loop Technology. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://www.looptechnology.com/>
- Lowde, M. J., Peters, H. G., Geraghty, R., Graham-Jones, J., Pemberton, R., & Summerscales, J. (2022). The 100 m composite ship? *Journal of Marine Science and Engineering*. doi:10.3390/jmse10030408
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. doi:10.1016/j.rcim.2019.101837
- M, R. W. (2014, November 7). Silicone bags for closed molding applications. Retrieved Summer, 2022, from <https://www.mositesrubber.com/are-silicone-bags-right-for-your-closed-molding-application/>
- Machine / Robotic waterjet cutting. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from <https://www.kmtwaterjet.com/a-robotic-waterjet-cutting-system-eu.aspx#anchor1>
- Marquez, A. (2020, October 26). Thermwood 3D prints a hull mold for a 51-foot long yacht. Retrieved Winter, 2022, from <https://www.3dnatives.com/en/thermwood-3d-printed-yacht-hull-261020206/>
- Marquez, A. (2020, September 30). The 3D printed fiberglass boat, Mambo, finally takes to the open sea. Retrieved Winter, 2022, from <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-fiberglass-boat-mambo-300920205/>
- Mason, H. (2022, January 11). Modular draping system shows potential for wrinkle-free, automated dry fiber layup. Retrieved Spring, 2022, from <https://www.compositesworld.com/articles/modular-draping-system-shows-potential-for-wrinkle-free-automated-dry-fiber-layup>

- Mason, K. (2020, June 1). Advancing composites through virtual and augmented reality. Retrieved February 23, 2023, from <https://www.compositesworld.com/articles/advancing-composites-through-virtual-and-augmented-reality->
- McCorduck, P. (2004). *Machines who think: A personal inquiry into the history and Prospects of Artificial Intelligence*. Natick, Massachusetts: AK Peters.
- McFadden, C. (2023, February 15). 'they look alien': NASA uses AI to Design Complex Spacecraft Parts. Retrieved February, 2023, from https://interestingengineering.com/innovation/nasa-ai-assisted-spacecraft-design?utm_source=Facebook&utm_medium=content&utm_campaign=organic&utm_content=Feb16&fbclid=IwAR1cYoyj5i3-r7XCy5WP-hoqDZixvItihWS--qyCxW7IfFOX-p7YtqosJZo
- Mecalux. (2022, May 6). Logistics Robots: The rise of automation in warehousing. Retrieved Fall, 2022, from <https://www.interlakemecalux.com/blog/logistics-robots>
- Morgan, J. (2021). Using RFID to Manufacture/Track Composite Aerostructures. Retrieved Fall, 2022, from https://www.rfidjournal.com/wp-content/uploads/2021/05/115_Jim_Morgan_Presentation.pdf
- Multiple TIJ Printheads - Printing on Fiberglass. (2022). Retrieved Fall, 2022, from <https://www.codetechcorp.com/videos/tij-printing-on-fiberglass/>
- Nehls, G. (2022, May 2). Airborne introduces automated ply placement technology at JEC World 2022. Retrieved Fall, 2022, from <https://www.compositesworld.com/news/airborne-introduces-automated-ply-placement-technology-at-jec-world-2022>
- Packaging and palletizing robots for all industries. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://www.kuka.com/en-ch/products/robotics-systems/industrial-robots/palletizing-robots>
- Porter, A. (2020, February/March). A Cleaner, Faster Infusion Shop. *Professional Boat Builder*, (183), 42-56.
- Proctor, B. (n.d.). Bluetooth vs. Bluetooth Low Energy: What's the difference? [2021 update]: Blog: Link labs. Retrieved Spring, 2023, from <https://www.link-labs.com/blog/bluetooth-vs-bluetooth-low-energy>
- Qin, J., Liu, Y., & Grosvenor, R. (2016). A categorical framework of manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*, 52, 173-178. doi:10.1016/j.procir.2016.08.005
- Ray, P. P. (2018). An introduction to dew computing: Definition, concept and implications. *IEEE Access*, 6, 723-737. doi:10.1109/access.2017.2775042
- RFID vs NFC - what's the difference? (2022, June 11). Retrieved Spring, 2023, from <https://wlius.com/blog/rfid-vs-nfc-whats-the-difference/>

- Robotic Composite Manufacturing & Trimming. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from <https://www.robotmaster.com/en/newsroom/composites-and-robotmaster>
- Rush, S. (2017, October 1). Composite rigid inflatable boats adapt for hard work, safe play. Retrieved Winter, 2022, from <https://www.compositesworld.com/articles/composite-rigid-inflatable-boats-adapt-for-hard-work-safe-play>
- Russell, S. J., Norvig, P., Chang, M., Devlin, J., Dragan, A., Forsyth, D., . . . Wooldridge, M. J. (2022). *Artificial Intelligence: A modern approach*. Harlow, United Kingdom: Pearson.
- SAERTEX. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from <https://www.saertex.com/en>
- Schrank, V., Beer, M., Beckers, M., & Gries, T. (2017). Polymer-optical fibre (POF) integration into textile fabric structures. *Polymer Optical Fibres*, 337-348. doi:10.1016/b978-0-08-100039-7.00010-5
- Schuh, G., Anderl, R., Dumitrescu, R., Krüger, A., ten Hompel, M. (Eds.) (2020). Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies – UPDATE 2020 – (acatech STUDY), Munich 2020.
- Shipbuilding: 1800–present. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://www.rmg.co.uk/stories/topics/shipbuilding-1800-present>
- Shipyards Capacity Analytics. (n.d.). Retrieved Fall, 2022, from <https://promodel.com/industries/shipbuilding>
- Snape, A. E., Turner, J. L., El-Dessouky, H. M., Saleh, M. N., Tew, H., & Scaife, R. J. (2018). Stabilising and trimming 3D woven fabrics for composite preforming applications. *Applied Composite Materials*, 25(4), 735-746. doi:10.1007/s10443-018-9717-x
- Teja, R. (2022, January 03). What is a sensor? different types of sensors and their applications. Retrieved Summer, 2022, from <https://www.electronicshub.org/different-types-sensors/>
- Tontisakis, A., Pantelelis, N., Bistekos, E., Hein, R., Wille, T., Gabtni, K., Dias, J.P. (2016). Towards the intelligent RTM system.
- Toyota production system: Toyota Europe. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://www.toyota-europe.com/about-us/toyota-vision-and-philosophy/toyota-production-system>
- Urbaniak, M. (2011). A relationship between the glass transition temperature and the conversion degree in the curing reaction of the EPY epoxy system. *Polimery*, 240-243. doi:10.14314/polimery.2011.240
- Van Marle, G. (2022, January 24). Now you can rent a robot worker – cheaper than paying a human. Retrieved Summer, 2022, from <https://theloadstar.com/now-you-can-rent-a-robot-worker-cheaper-than-paying-a-human/>
- Vanderbilt Engineering Graduate Admissions Team. (2022, February 28). What is the difference between CPS and Iot? Retrieved Spring, 2022, from <https://blog.engineering.vanderbilt.edu/what-is-the-difference-between-cps-and-iot>

- Wan, J., Cai, H., & Zhou, K. (2015). Industrie 4.0: Enabling technologies. *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*. doi:10.1109/icaiot.2015.7111555
- Wan, J., Cai, H., & Zhou, K. (2015). Industrie 4.0: Enabling technologies. *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*. doi:10.1109/icaiot.2015.7111555
- Wang, A. (2022). A Word from Cobot Manufacturers: On Cobot Functions and Applications. Retrieved Fall, 2022, from <https://www.tm-robot.com/en/collaborative-robots-functions-applications/>
- Willett, L. (2022, April 20). Shipbuilding with VR, AR and digital twinning. Retrieved Fall, 2022, from <https://www.armadainternational.com/2022/04/shipbuilding-with-vr-ar-and-digital-twinning/>
- Woo, J. H. (2021). Journal of Marine Science and Engineering. Retrieved Summer, 2022, from https://www.mdpi.com/journal/jmse/special_issues/jonh_smart_technologies_shipbuilding
- Παπάζογλου, Β., Τσούβαλης, Ν.(2018) , Ναυπηγική Τεχνολογία, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσούβαλης, Ν.(1998) , Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Φιτσιλής, Π. (n.d.). *Ο ψηφιακός μετασχηματισμός των επιχειρήσεων στα πλαίσια της Βιομηχανίας 4.0*. Lecture. Retrieved 2022, from https://eclass.uth.gr/modules/document/file.php/SE_BA_U169/Industry4.0/fitsilis.pdf.
- Ψηφιακός Μετασχηματισμός: Ανάπτυξη Στρατηγικής και Ψηφιακές Τεχνολογίες. (n.d.). Retrieved Summer, 2022, from <https://digital-transformation-tool.eu/training/mod/hvp/view.php?id=94&lang=el>