



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ “ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ”

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ & ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Αυτόνομα πλοία: Αξιολόγηση, τεχνολογίες και επίδραση
στο μέλλον της ναυτιλίας*

Συγγραφέας:

Γεώργιος Τσακίρης (ΑΜ: 08122825)

Επιβλέπων Καθηγητής:

Δημήτριος Β. Λυρίδης

Αθήνα, Ελλάδα

Ιανουάριος 2025

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη συντονιστική επιτροπή του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών στη Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

Δημήτριος Β. Λυρίδης, Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)

Νικόλαος Βεντίκος, Καθηγητής ΕΜΠ

Ελευθερία Ηλιοπούλου, ΕΔΙΠ ΕΜΠ

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στη Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους εκείνους που με υποστήριξαν.

Πρωτίστως, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και το σεβασμό μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δημήτριο Β. Λυρίδη, για τη σπουδαία καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις γνώσεις που μου προσέφερε.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, για τις πολύτιμες υποδείξεις και τις εύστοχες παρατηρήσεις τους στο σύνολο της εργασίας μου.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη αγάπη τους. Η συνεχιζόμενη στήριξή τους και οι ενθαρρυντικοί τους λόγοι με βοήθησαν να ξεπεράσω πολλές προκλήσεις.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην αγαπημένη μου, Μαριάννα, της οποίας η βοήθεια και η συναισθηματική στήριξη ήταν ανεκτίμητη καθ'όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο, συσπουδαστή και αδερφικό μου φίλο, Σ. Κούστα, για τη συνεχιζόμενη συμπαράσταση και συνεργασία.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τις τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία των αυτόνομων πλοίων και τις προκλήσεις που θα κληθούν οι ναυτιλιακές εταιρείες να αντιμετωπίσουν μελλοντικά. Ειδικότερα, αναλύονται ορισμένες πιλοτικές εφαρμογές αυτόνομων σκαφών, ενώ παράλληλα εξετάζεται ενδελεχώς η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στα αυτόνομα πλοία, δεδομένου ότι η τεχνολογία αυτή δύναται να επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην ασφάλεια. Η ασφάλεια στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα συνδέεται άμεσα τόσο με την ασφαλή πλοήγηση όσο και με την κυβερνοασφάλεια, η οποία θεωρείται ζωτικής σημασίας, λόγω της συνεχώς αυξανόμενης εξάρτησης από τα ψηφιακά συστήματα. Επιπλέον, αναλύεται η επικινδυνότητα των αυτόνομων πλοίων, μέσω ποικίλων μεθόδων και μοντέλων αξιολόγησης κινδύνων. Τέλος, διερευνάται η οικονομική διάσταση της ανάπτυξης και εφαρμογής της αυτονομίας σε επιλεγμένους τύπους πλοίων, με στόχο την εκτίμηση της οικονομικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητάς τους.

Λέξεις-κλειδιά: Αυτόνομα πλοία, MUNIN, Τεχνητή νοημοσύνη, Κυβερνοασφάλεια, COLREGS, Ασφαλής πλοήγηση, Αξιολόγηση κινδύνων, Οικονομική ανάλυση, Περιβαλλοντική ανάλυση.

Abstract

This thesis examines the latest advancements in autonomous ship technology and the challenges that shipping companies will face in the future. In particular, a few pilot projects of autonomous vessels are studied, while in parallel the integration of artificial intelligence in autonomous ships is examined in detail, as this technology may significantly impact safety. Safety in autonomous shipping is directly linked to both safe navigation and cyber security, which is regarded as crucial due to the ever-increasing reliance on digital systems. In addition, the risks of autonomous shipping are investigated by employing hazard analysis methods and models. In conclusion, the economic perspective of developing and implementing autonomy on selected ship types is explored, aiming to assess their financial and environmental sustainability.

Keywords: Autonomous vessels, MUNIN, Artificial intelligence, Cyber security, COLREGS, Safe navigation, Hazard analysis, Economic analysis, Environmental analysis.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
2. Πιλοτικές εφαρμογές αυτόνομων πλοίων	4
2.1 Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks (MUNIN) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής	4
2.2 Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA) της Tekes	10
2.3 Ηλεκτρικό και αυτόνομο πλοίο Yara Birkeland των Yara και Kongsberg	16
2.4 Άλλα εγχειρήματα αυτόνομης ναυσιπλοΐας	18
3. Τεχνητή νοημοσύνη και αυτονομία	21
3.1 Η ναυτιλία στην εποχή της τέταρτης επανάστασης	21
3.2 Επίπεδα αυτονομίας των πλοίων	22
3.3 Η δομή των αυτόνομων συστημάτων	23
3.4 Απαιτήσεις για επίγνωση κατάστασης στα αυτόνομα πλοία	26
3.4.1 Απαιτήσεις για το σύστημα PNT του πλοίου	27
3.4.2 Απαιτήσεις για την ανίχνευση	28
3.4.3 Απαιτήσεις για το λογισμικό AI και ML	28
3.5 Ανασκόπηση της τεχνολογίας αισθητήρων σε αυτόνομα πλοία	29
3.5.1 Προτεινόμενο σύστημα αισθητήρων πειραματικού σταδίου	29
3.5.2 Αισθητήρες για ακριβή προσδιορισμό θέσης	31
3.5.3 RADAR και LiDAR	33
3.5.4 Οπτικοί Αισθητήρες	36
3.5.5 Ακουστικοί Αισθητήρες	38
3.5.6 Δέκτες AIS	39
3.5.7 Δημόσια ναυτιλιακά σύνολα δεδομένων	40
3.6 Εισαγωγή στις τεχνολογίες AI για αυτόνομα πλοία	40
3.6.1 Βασικές απαιτήσεις της τεχνητής νοημοσύνης για ναυτιλιακές εφαρμογές	40
3.6.2 Τεχνητή νοημοσύνη και επίγνωση κατάστασης	43
3.6.3 Τεχνητή νοημοσύνη και ανίχνευση/ταξινόμηση αντικειμένων	44
3.6.4 Δημιουργία διαδρομών με χρήση δεδομένων AIS	47
4. Ζητήματα αξιοπιστίας και ασφάλειας στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα	51

4.1 Εισαγωγή στους κανονισμούς COLREGS	51
4.2 Η μέθοδος Velocity Obstacle	53
4.2.1 Ανασκόπηση της μεθόδου VO	53
4.2.2 Υπολογισμός του χρόνου έως τη σύγκρουση	56
4.2.3 Διαχείριση της αβεβαιότητας κατά το σχεδιασμό κίνησης	56
4.2.4 Η VO ως σύνολο περιορισμών και η συσχέτισή της με τους COLREGS	58
4.2.5 Ο αλγόριθμος ασφαλούς πλοήγησης	60
4.3 Τα οφέλη στην ασφάλεια από τη μετάβαση σε αυτόνομα πλοία	65
4.3.1 Μελέτη των ναυτικών ατυχημάτων μεταξύ 2000-2018 και των επιπτώσεών τους	66
4.3.2 Η προβλεπόμενη συμβολή της αυτονομίας στη βελτίωση της ασφάλειας	72
4.4 Ανθρώπινοι παράγοντες και οι σχετικές προκλήσεις στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα	77
4.4.1 Η εκπαίδευση του πληρώματος	78
4.4.2 Η εξάρτηση του ανθρώπινου χειριστή από τους αυτοματισμούς	79
4.4.3 Σχεδιασμός συστημάτων με γνώμονα τον άνθρωπο	79
4.4.4 Μείωση των ανθρώπινων σφαλμάτων	80
4.5 Απειλές στον Κυβερνοχώρο	80
4.5.1 Οι ευπάθειες των πλοίων	83
4.5.2 Παραδείγματα κυβερνοεπιθέσεων στα πλοία	83
4.5.3 Οι ευπάθειες σε περιοχές ελλιμενισμού	86
4.6 Το Blockchain στην κυβερνοασφάλεια	88
4.6.1 Η τεχνολογία του Blockchain	89
4.6.2 Η εισαγωγή του Blockchain στη ναυτιλία	90
5. Μεθοδολογία αξιολόγησης κινδύνων	92
5.1 Το μοντέλο STAMP και η μέθοδος STPA	92
5.2 Η προτεινόμενη μέθοδος STPA-SynSS	93
5.3 Η εφαρμογή των μεθόδων STPA και STPA-SynSS	97
5.4 Η μέθοδος SMB-HAZID	98
5.5 Η μέθοδος Bayesian BWM	100
5.5.1 Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου Bayesian BWM	105
6. Η οικονομική διάσταση της αυτόνομης ναυσιπλοΐας	110
6.1 Το μοντέλο χρηματορροών στη ναυτιλία	110
6.1.1 Κόστος κεφαλαίου	111

6.1.2 Λειτουργικά κόστη	111
6.1.3 Έξοδα ταξιδίου	112
6.2 Οικονομική μελέτη πέντε πλοίων μεταφοράς κοντέινερ	112
6.2.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων	113
6.2.2 Ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	114
6.3 Οικονομική μελέτη πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου	114
6.3.1 Τα οικονομικά οφέλη στα λειτουργικά κόστη	115
6.3.2 Οι μεταβολές στα έξοδα ταξιδίου	115
6.3.3 Προβληματισμός ως προς τη βιωσιμότητα της αυτόνομης ναυσιπλοΐας	116
6.4 Οικονομική μελέτη σε μικρότερα σκάφη.....	117
6.4.1 Περιγραφή του προφίλ λειτουργίας πλοίου	118
6.4.2 Τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του πλοίου	119
6.4.3 Αλλαγή χρονοδιαγράμματος ελλιμενισμού	121
6.4.4 Τα οφέλη στην κατανάλωση καυσίμων και στις εκπομπές ρύπων	121
6.4.5 Οικονομική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	123
6.5 Συγκριτική ανάλυση των οικονομικών μελετών	124
7. Συμπεράσματα - Επίλογος	128
8. Βιβλιογραφία.....	130

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Η απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας του αυτόνομου, μη επανδρωμένου πλοίου κατά το MUNIN (MUNIN, 2016).	5
Εικόνα 2: Η επισκόπηση της αλληλεπίδρασης των βασικών συστημάτων του μη επανδρωμένου πλοίου (MUNIN, 2015a).	8
Εικόνα 3: Το μοντέλο του αυτόνομου πλοίου κατά το AAWA (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).....	12
Εικόνα 4: Η πλοήγηση ενός αυτόνομου πλοίου κατά το AAWA (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).....	12
Εικόνα 5: Η προτεινόμενη κατά το AAWA τεχνολογική λύση ενσωμάτωσης της πλήρως αυτόνομης πλοήγησης στα πλοία (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).	14
Εικόνα 6: Το πλοίο Yara Birkeland κατά την εμπορική του λειτουργία (Yara, 2024a).	16
Εικόνα 7: Η προβλεπόμενη πορεία του Yara Birkeland (Reddy et al., 2019).	18
Εικόνα 8: Το πλοίο Zhi Fei εν πλω (Negenborn et al., 2023).	20
Εικόνα 9: Η δομή του υπολογιστικού μοντέλου ενός αυτόνομου συστήματος (Yongwon et al., 2019).....	24
Εικόνα 10: Προτεινόμενη στρατηγική χρήσης των αισθητήρων και το εύρος λειτουργίας τους (Thombre et al., 2022).	31
Εικόνα 11: Online και offline εκμάθηση στη μηχανική μάθηση (Thombre et al., 2022).	42
Εικόνα 12: Το καθοδηγούμενο από την τεχνητή νοημοσύνη σύστημα επίγνωσης κατάστασης (Thombre et al., 2022).	44
Εικόνα 13: Γενικό πλαίσιο για την ανίχνευση πλοίων με χρήση RPNs (Thombre et al., 2022)....	45
Εικόνα 14: Η εφαρμογή του αλγορίθμου DTW στην πλοήγηση των πλοίων (Xu, Rong & Guedes Soares, 2019).	48
Εικόνα 15: Απαιτούμενοι ελιγμοί σε περιπτώσεις: (a) διασταύρωσης από τα δεξιά, (b) διασταύρωσης από τα αριστερά, (c) προσπέρασης, (d) μετωπιαίας διασταύρωσης (Kuwata et al., 2014).	52
Εικόνα 16: Γραφική αναπαράσταση της μεθόδου VO (Kuwata et al., 2014).	55
Εικόνα 17: Το χειρότερο σενάριο της VO, όταν υπάρχει αβεβαιότητα για την ταχύτητα του κινούμενου εμποδίου (Kuwata et al., 2014).	57
Εικόνα 18: Περιορισμοί στον χώρο ταχυτήτων που επιβάλλονται από τους κανονισμούς COLREGS (Kuwata et al., 2014).	58
Εικόνα 19: Οι κανονισμοί COLREGS μπορεί και να μην ισχύουν, ακόμη και για σκάφη με πανομοιότυπη γεωμετρική διάταξη (Kuwata et al., 2014).	60
Εικόνα 20: Το πλησιέστερο σημείο προσέγγισης (CPA) (Kuwata et al., 2014).	61
Εικόνα 21: Απεικόνιση των γεωμετρικών περιορισμών που χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί αν ένας κανονισμός COLREGS ισχύει (Kuwata et al., 2014).....	62
Εικόνα 22: Στιγμιότυπο από μια προσομοίωση, όπου το USV βρίσκεται σε κατάσταση διασταύρωσης (Kuwata et al., 2014).	64

Εικόνα 23: Τα σοβαρά ατυχήματα στη θάλασσα, κατανεμημένα ανά τύπο πλοίου και κατηγορία ατυχήματος (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).	68
Εικόνα 24: Οι απώλειες ζών συναρτήσεως του τύπου πλοίου και της κατηγορίας του ατυχήματος (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).	69
Εικόνα 25: Οι απώλειες πλοίων ανά κατηγορία ατυχήματος και τύπο πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).	70
Εικόνα 26: Τα ατυχήματα στη θάλασσα συναρτήσεως του τύπου και μήκους του πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).	70
Εικόνα 27: Η συχνότητα απώλειας των πλοίων συναρτήσεως του μήκους και του τύπου του εμπλεκόμενου πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).	71
Εικόνα 28: Οι απώλειες ζών ανά τύπο και μήκος του πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).	71
Εικόνα 29: Τα έξι σενάρια που εξετάστηκαν (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).	72
Εικόνα 30: Αποκωδικοποιητής AIS (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).	84
Εικόνα 31: Προσδιορισμός θέσης από τους δορυφόρους (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).	85
Εικόνα 32: Απλοποιημένη δομή των block (Petković, Mihanović & Vujović, 2019).	90
Εικόνα 33: Η διαδικασία ανάλυσης κινδύνων (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).	93
Εικόνα 34: Το διάγραμμα ροής της μεθόδου STPA-SynSS (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).	97
Εικόνα 35: Μέθοδος αξιολόγησης των κυβερνοαπειλών στα αυτόνομα πλοία (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	102
Εικόνα 36: Η κατάταξη των κριτηρίων (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	105
Εικόνα 37: Η κατάταξη των υποκριτηρίων του συστήματος πλοήγησης (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	106
Εικόνα 38: Η κατάταξη των υποκριτηρίων του συστήματος ελέγχου πρόωσης (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	106
Εικόνα 39: Η κατάταξη των υποκριτηρίων των λιμενικών λειτουργιών (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	107
Εικόνα 40: Η κατάταξη των υποκριτηρίων των κέντρων ελέγχου ξηράς (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	107
Εικόνα 41: Η κατάταξη των υποκριτηρίων των γραφείων διοικήσεως ξηράς (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	108
Εικόνα 42: Η παγκόσμια κατάταξη των υποκριτηρίων (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	109
Εικόνα 43: Το μοντέλο χρηματορροών στην ναυτιλία (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).	110
Εικόνα 44: Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας των πέντε σταδίων (Dantas & Theotokatos, 2023).	118
Εικόνα 45: Οι λειτουργικές παράμετροι του πλοίου συναρτήσεως της διάρκειας ταξιδιού (Dantas & Theotokatos, 2023).	119

Εικόνα 46: Το βέλτιστο και χείριστο σενάριο των ετήσιων καταναλώσεων καυσίμου και εκπομπών ρύπων CO ₂ και NO _x (Dantas & Theotokatos, 2023).	122
---	-----

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1: Προτεινόμενες ενοποιημένες τιμές προσδιορισμού θέσης που αφορούν την προσέγγιση λιμανιών και παράκτιων περιοχών (Thombre et al., 2022).....	27
Πίνακας 2: Προτεινόμενες τιμές για την απόσταση ανίχνευσης στόχων (Thombre et al., 2022).	28
Πίνακας 3: Σύγκριση των διαφορετικών αισθητήρων σε αυτόνομα πλοία (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016; Thombre et al., 2022).	29
Πίνακας 4: Οι εμπορικά διαθέσιμοι δέκτες GNSS με εφαρμογή στη ναυτιλία (Thombre et al., 2022).....	32
Πίνακας 5: Τα βασικά χαρακτηριστικά των RADAR ζώνης S και X (International Maritime Organization, 1974; Thombre et al., 2022).	34
Πίνακας 6: Μελέτες που σχετίζονται με τη χρήση διαφορετικών αισθητήρων για την ανίχνευση και ταξινόμηση αντικειμένων (Thombre et al., 2022).	46
Πίνακας 7: Τα ευρήματα κάθε σεναρίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).....	76
Πίνακας 8: Οι απαντήσεις των συμμετεχόντων της έρευνας (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).	103
Πίνακας 9: Οι τεχνικές προδιαγραφές των υπό μελέτη πλοίων (Jovanović et al., 2022).	113
Πίνακας 10: Η πρόβλεψη του RFR για τις περιπτώσεις των συμβατικών και αυτόνομων πλοίων για το 2040, συμπεριλαμβανομένων και μη των κόστων των εκπομπών ρύπων (Jovanović et al., 2022).....	113
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά του πλοίου αναφοράς (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).	114
Πίνακας 12: Η επίδραση της μείωσης του βάρους του πλοίου (lightship weight) στην ισχύ πρόωσης (Dantas & Theotokatos, 2023).....	120
Πίνακας 13: Αποτελέσματα από τη μείωση της επιφάνειας που εμφανίζει αντίσταση με τον αέρα (Dantas & Theotokatos, 2023).	120
Πίνακας 14: Ο αντίκτυπος των ποσοστών μείωσης του χρόνου ελλιμενισμού (Dantas & Theotokatos, 2023).	121
Πίνακας 15: Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών του πλοίου μεταφοράς κοντέινερ Maersk Montana και του υπό μελέτη πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου.....	124
Πίνακας 16: Τα ποσοστά μείωσης των εκπομπών ρύπων CO ₂ , NO _x και κατανάλωσης καυσίμων, συναρτήσει ενός συντελεστή μείωσης του ελλιμενισμού.	126

1. Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τις τελευταίες εξελίξεις και τις προκλήσεις στον τομέα της αυτόνομης ναυσιπλοΐας, εστιάζοντας σε σημαντικά τεχνολογικά και επιχειρησιακά ζητήματα. Ειδικότερα, η εν λόγω εργασία παρέχει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση στις κύριες πτυχές της αυτόνομης ναυτιλίας, επιτρέποντας παράλληλα τη συνολική κατανόηση των προοπτικών και προκλήσεων που σχετίζονται με την υιοθέτηση της νέας αυτής τεχνολογίας.

Αρχικά, μέσω μίας ιστορικής αναδρομής, το δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας επικεντρώνεται στις πιλοτικές εφαρμογές των αυτόνομων πλοίων, οι οποίες επιβεβαιώνουν τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των αυτόνομων πλοίων, παρέχοντας κρίσιμα δεδομένα για την περαιτέρω ανάπτυξή τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, η εργασία αναλύει τις βασικές τεχνολογίες που εφαρμόζονται στην αυτόνομη ναυτιλία, με έμφαση στην τεχνητή νοημοσύνη και τα συστήματα αυτονομίας των πλοίων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στην κατηγοριοποίηση των επιπέδων αυτονομίας, στα συστήματα αντίληψης (π.χ. αισθητήρες) που επιτρέπουν στα πλοία να αντιλαμβάνονται το περιβάλλον τους και τα συστήματα ελέγχου που διασφαλίζουν την ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία τους. Η ανάλυση αυτών των συστημάτων αποτελεί τη βάση για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των αυτόνομων πλοίων σε πραγματικές συνθήκες, επισημαίνοντας τις τεχνικές απαιτήσεις και τις προκλήσεις στην ανάπτυξή τους.

Εν συνεχεία, το τέταρτο κεφάλαιο, εστιάζοντας σε δύο τομείς, πραγματεύεται ζητήματα αξιοπιστίας και ασφάλειας που αφορούν την αυτόνομη ναυσιπλοΐα. Αρχικά, ο πρώτος τομέας μελέτης επικεντρώνεται στην ασφαλή πλοήγηση. Στο πλαίσιο αυτό, αξιολογείται η εφαρμογή των κανονισμών COLREGS σε μη επανδρωμένα πλοία και η συσχέτισή τους με τη μέθοδο VO. Ειδική αναφορά γίνεται στις διάφορες κατηγορίες ναυτικών ατυχημάτων, στη συχνότητα εμφάνισής τους, στις επιπτώσεις τους και την αναμενόμενη ποσοστιαία μείωσή τους, ύστερα από τη στροφή της ναυτιλίας στην αυτονομία. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται τα οφέλη στην ασφάλεια τα οποία προκύπτουν από τη μετάβαση

σε αυτόνομα πλοία, καθώς και οι προκλήσεις που συνδέονται με τους ανθρώπινους παράγοντες. Παράλληλα, ο δεύτερος τομέας μελέτης επικεντρώνεται στο ρόλο της κυβερνοασφάλειας και του blockchain για την προστασία των συστημάτων των πλοίων και των υποδομών των λιμένων, ενισχύοντας την ανάγκη για ασφαλή και αξιόπιστα τεχνολογικά συστήματα.

Το πέμπτο κεφάλαιο εστιάζει στη μεθοδολογία αξιολόγησης των κινδύνων στα αυτόνομα πλοία. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η μέθοδος STPA, η οποία βασίζεται με τη σειρά της στο μοντέλο STAMP. Οι STPA και STAMP αξιολογούν την ασφάλεια των σύγχρονων, αυτοματοποιημένων συστημάτων οδηγώντας σε μείωση των πιθανών κινδύνων. Η εργασία προτείνει τη χρήση της μεθόδου STPA-SynSS, συνδυαστικά όμως με άλλες (SM-HAZID και Bayesian BWM), για την αξιολόγηση της ευαλωτότητας των συστημάτων.

Καταληκτικά, η τελευταία ενότητα της εργασίας αναλύει τον οικονομικό και περιβαλλοντικό αντίκτυπο της μετάβασης στην αυτόνομη ναυτιλία, εξετάζοντας τις μεταβολές στα κόστη για διάφορους τύπους πλοίων - ειδικότερα για τα πλοία μεταφοράς κοντέινερ, τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και τα μικρότερα σκάφη. Αυτή η οικονομοτεχνική μελέτη είναι καθοριστική για την εκτίμηση των οικονομικών ωφελειών και των προκλήσεων που θα κληθούν να αντιμετωπίσουν οι ναυτιλιακές εταιρείες κατά τη μετάβαση στην αυτόνομη ναυτιλία.

Με γνώμονα τα ανωτέρω, εδώ και δεκαετίες, πολλά συστήματα και μηχανήματα των πλοίων βασίζουν την λειτουργία τους, καθώς και τον έλεγχο των λειτουργικών τους παραμέτρων σε αυτοματισμούς. Οι τεχνολογίες που σχετίζονται με τη λειτουργία των αυτόνομων πλοίων αναπτύσσονται εδώ και χρόνια και η εκτέλεση διηπειρωτικών ταξιδιών από μη επανδρωμένα πλοία έχει ήδη γίνει πραγματικότητα (Hogg & Ghosh, 2016). Το 2005, ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization ή IMO) αναγνώρισε την ανάγκη να αυξηθεί η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας μέσω της ενσωμάτωσης σύγχρονων τεχνολογιών. Στο πλαίσιο αυτό, ο IMO εκκίνησε το e-Navigation project προκειμένου να βελτιώσει την ανταλλαγή δεδομένων και την επικοινωνία μεταξύ των πλοίων, καθώς και μεταξύ πλοίου-ξηράς (IMO, 2006). Εν συνεχεία, το βλέμμα των ναυτιλιακών επιχειρήσεων στράφηκε στην κατασκευή ενός πλήρως

αυτόνομου πλοίου, με σκοπό τόσο τη βελτιστοποίηση των κερδών τους, όσο και την μείωση των σφαλμάτων του ανθρώπινου δυναμικού. Στη σύγχρονη εποχή της συνεχούς τεχνολογικής ανάπτυξης και της ενσωμάτωσης του αυτοματισμού, τα μη επανδρωμένα πλοία εμφανίζονται στον κλάδο της ναυτιλίας και διαταράσσουν ολοένα και περισσότερο την ήδη καθιερωμένη πραγματικότητα. Επομένως, είναι ευρέως αντιληπτό ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται στο κατώφλι μίας νέας εποχής μετασχηματισμού. Αξίζει να σημειωθεί, βέβαια, ότι η ενεργή εμπορική χρήση τέτοιων πλοίων τοποθετείται μέσα στην επόμενη δεκαετία, ενώ μόλις πριν από μερικά χρόνια η σκέψη μίας τέτοιας προοπτικής θεωρείτο άκρως ουτοπική (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).

Η αυτονομία και η εξ αποστάσεως διαχείριση, σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη, μεταμορφώνει τη ναυτιλία, όπως επίσης και όλους τους τομείς των μεταφορών (TO VIMA, 2024). Η μετάβαση, όμως, στην νέα αυτή πραγματικότητα πρέπει να γίνει σταδιακά. Η τεχνολογία καθώς και το λειτουργικό σύστημα των αυτόνομων πλοίων άρχισαν να διερευνώνται μέσα από ποικίλα ερευνητικά έργα τα οποία στόχευαν στην ενίσχυση της αξιοπιστίας και ασφάλειάς τους, καθώς και στην εξάλειψη βασικών κινδύνων που ενδεχομένως να ελλοχεύουν. Προς την κατεύθυνση αυτή, έχει γνωστοποιηθεί πληθώρα πειραματικών εφαρμογών των αυτόνομων πλοίων, οι οποίες είτε έχουν ολοκληρωθεί (π.χ. MUNIN, AAWA, Yara Birkeland) ή βρίσκονται σε εξέλιξη τη δεδομένη χρονική στιγμή, σε όλο τον κόσμο. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι τα ερευνητικά προγράμματα MUNIN και AAWA άνοιξαν το δρόμο προς την εποχή των αυτόνομων πλοίων, όπου η επιλογή της μη χρήσης αυτοματοποιημένων συστημάτων θα είναι οικονομικά μη βιώσιμη. Απώτερος σκοπός των ερευνητικών αυτών έργων είναι η εδραίωση μιας πιο βιώσιμης και καινοτόμας ναυτιλίας (Rødseth & Nordahl, 2017; Munim, 2019; Wang et al., 2020; Emad, Enshaei & Ghosh, 2021; Emad & Ghosh, 2023). Μέσω μερικών επιλεγμένων εφαρμογών των μη επανδρωμένων πλοίων σε πιλοτικό στάδιο, πραγματοποιείται παρακάτω ιστορική αναδρομή στη χρήση των αυτοματοποιημένων συστημάτων στην ναυτιλία.

2. Πιλοτικές εφαρμογές αυτόνομων πλοίων

2.1 Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks (MUNIN) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής

Το Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks (MUNIN) αποτέλεσε ένα πολύ σημαντικό τριετές ερευνητικό πρόγραμμα το οποίο ξεκίνησε το 2012 και ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο του 2015, παρέχοντας πολύ σημαντικές πληροφορίες και δεδομένα για τα μη επανδρωμένα εμπορικά πλοία (Hogg & Ghosh, 2016). Το έργο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στο πλαίσιο του έβδομου προγράμματος-πλαισίου, ενώ για την υλοποίησή του απαιτήθηκαν διάφορες διαβιομηχανικές και διασυνοριακές συνεργασίες (European Commission, 2016).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το MUNIN έχει συμβάλει στην ανάπτυξη νέων διεθνών προτύπων αναφορικά με τα δίκτυα δεδομένων επί του πλοίου (shipboard data networks) και τις διεπαφές πλοίου-ξηράς. Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο IEC 61162-460 («Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Digital interfaces - Part 460: Multiple talker and multiple listeners - Ethernet interconnection - Safety and security») ορίζει τον τρόπο δόμησης ενός εξαιρετικά ανθεκτικού bridge data network, με ασφαλείς συνδέσεις με εξωτερικά δίκτυα και την ξηρά. Επιπλέον, το MUNIN συνετέλεσε και στην ανάπτυξη του προτύπου IEC 62940 («Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Integrated communication system (ICS) - Operational and performance requirements, methods of testing and required test result»). Πρόκειται για ένα διεθνές πρότυπο που αναφέρεται στο σχεδιασμό και δοκιμή ενός ενσωματωμένου συστήματος επικοινωνίας με πολλαπλά κανάλια επικοινωνίας, περιλαμβάνοντας πρωτόκολλα για την επίτευξη της επικοινωνίας πλοίου-ξηράς. Και τα δύο αυτά διεθνή πρότυπα είναι πολύ σημαντικά για την λειτουργία των αυτόνομων ή τηλεχειριζόμενων πλοίων του μέλλοντος (European Commission, 2016).

Κύριος στόχος του ερευνητικού έργου MUNIN ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας ανάπτυξης μη επανδρωμένων, αυτόνομων εμπορικών πλοίων, από τεχνικής, οικονομικής και νομικής απόψεως. Το MUNIN επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση του οράματος για ένα αυτόνομο πλοίο, το οποίο θα καθοδηγείται κυρίως από αυτοματοποιημένα συστήματα λήψης αποφάσεων επί του σκάφους και θα ελέγχεται από απομακρυσμένο χειριστή σε κέντρο ελέγχου ξηράς (Shore Control Center ή SCC) (MUNIN, 2015c; Wasilewski, Wolak, & Zaráś, 2021). Στην παρακάτω Εικόνα 1 απεικονίζεται σχηματικά ο τρόπος λειτουργίας του αυτόνομου, μη επανδρωμένου πλοίου κατά το MUNIN.



Εικόνα 1: Η απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας του αυτόνομου, μη επανδρωμένου πλοίου κατά το MUNIN (MUNIN, 2016).

Πιο συγκεκριμένα, τα μη επανδρωμένα πλοία θα ελέγχονται από ένα αυτόματο σύστημα το οποίο θα ενημερώνεται με τη σειρά του από αισθητήρες επί του σκάφους, επιτρέποντας στο πλοίο να κάνει ελιγμούς αποφυγής σύγκρουσης, σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς. Το πλοίο θα παρακολουθείται συνεχώς από ένα απομακρυσμένο κέντρο ελέγχου ξηράς (SCC), ικανό να ελέγχει εξ αποστάσεως το πλοίο, σε περίπτωση που τα αυτόματα συστήματά του αδυνατούν να ανταποκριθούν (Porathe, Prison & Man, 2014). Σύμφωνα με το MUNIN, ο κάθε

χειριστής στο κέντρο ελέγχου ξηράς (SCC) θα παρακολουθεί έξι μη επανδρωμένα πλοία (Mackinnon et al., 2015). Για να ελαχιστοποιηθεί η πολυπλοκότητα της παρακολούθησης των οθονών, ο χειριστής θα ειδοποιείται για αλλαγές στη λειτουργία των πλοίων μέσω ενός flag system, όπου το πράσινο χρώμα θα αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη λειτουργία, το κίτρινο θα δηλώνει μια μη κρίσιμη κατάσταση που απαιτεί όμως προσοχή και εξακρίβωση και το κόκκινο θα υποδεικνύει μια πολύ κρίσιμη κατάσταση που χρειάζεται άμεση επέμβαση, διερεύνηση και εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών (MUNIN, 2015b).

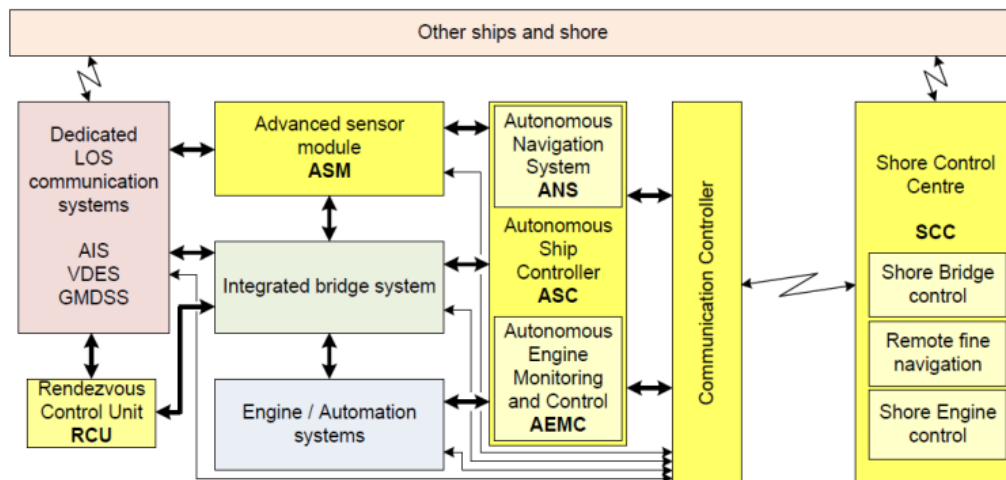
Παράλληλα, μέσω του ερευνητικού έργου MUNIN, αναδείχθηκε η ανάγκη ανάπτυξης τεσσάρων βασικών συστημάτων στα σκάφη - μίας προηγμένης μονάδας αισθητήρα (Advanced Sensor Module ή ASM), ενός αυτόνομου συστήματος πλοήγησης (Autonomous Navigation System ή ANS), ενός συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου κινητήρα (Autonomous Engine Monitoring and Control System ή AEMC) και του κέντρου ελέγχου ξηράς (SCC). Δεδομένου ότι το πλοίο είναι μη επανδρωμένο, η προηγμένη μονάδα αισθητήρα (ASM) απαιτείται για την αντικατάσταση του αξιωματικού φυλακής της γέφυρας (Officer of the watch ή OOW) και συνεπώς την παρακολούθηση του περιβάλλοντα χώρου του σκάφους. Η μονάδα αισθητήρα (ASM) ανιχνεύει πιθανά επικίνδυνα σώματα, αναλύοντας δεδομένα που συλλέγονται από το ραντάρ, την υπέρυθρη κάμερα και το δορυφόρο. Το αυτόνομο σύστημα πλοήγησης (ANS) διασφαλίζει ότι το πλοίο ακολουθεί μία προκαθορισμένη πορεία ταξιδιού και προσαρμόζει τη διαδρομή ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα. Το εν λόγω σύστημα βοηθά επίσης σε δύσκολους ελιγμούς, όπως η αποφυγή συγκρούσεων και η πρόσδεση στα λιμάνια. Το σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου κινητήρα (AEMC) πρόκειται για ένα εξαιρετικά περίπλοκο διαγνωστικό σύστημα που διαθέτει προηγμένες λειτουργίες μέσω των οποίων διευκολύνεται η έγκαιρη πρόβλεψη και ανίχνευση πιθανών βλαβών στο σύστημα πρόωσης. Κατά αυτόν τον τρόπο, διατηρείται η βέλτιστη απόδοση του κινητήρα και επιτυγχάνεται η καλύτερη συντήρησή του (European Commission, 2016; Rivkin, 2021). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το ερευνητικό πρόγραμμα MUNIN (2015c), το σύστημα αυτό παρακολουθεί τους καίριους δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators ή KPIs) του

μηχανοστασίου και των συστημάτων πρόωσης του πλοίου λαμβάνοντας επιπλέον μέτρα εφόσον χρειαστεί (Hogg & Ghosh, 2016). Παράλληλα, δεδομένου ότι το μη επανδρωμένο πλοίο δεν έχει μόνιμο πλήρωμα επί του σκάφους (εξειδικευμένο για τη συντήρησή του κατά τη διάρκεια μεγάλων ταξιδιών), τα υλικά των μηχανημάτων του πλοίου απαιτείται να είναι εξαιρετικής ποιότητας, προσφέροντας έτσι την απαιτούμενη αξιοπιστία (Hogg & Ghosh, 2016).

Τέλος, έμπειροι αξιωματικοί, πλοίαρχοι και μηχανικοί, παρακολουθούν τη ναυσιπλοΐα από το κέντρο ελέγχου ξηράς (SCC) και είναι έτοιμοι να επεμβούν σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Το προσωρινό αυτό πλήρωμα μπορεί να μεταβεί στο πλοίο μέσω ελικοπτέρου, σε περιπτώσεις όπου το πλοίο πλησιάζει π.χ. κάποια περιοχή έντονης κυκλοφορίας ή ένα λιμάνι. Το πλήρωμα, στη συνέχεια, θα εγκαταλείψει το πλοίο όταν αυτό απομακρυνθεί π.χ. από το λιμάνι (European Commission, 2016; Rivkin, 2021). Μέσω ερευνητικών προγραμμάτων, όπως το MUNIN, αναδείχθηκε η ανάγκη δημιουργίας μίας ομάδας ελέγχου επί του σκάφους (On-board Control Team ή OCT) η οποία θα επιβιβάζεται στο πλοίο μόνο σε ειδικές περιπτώσεις π.χ. κατά την άφιξη ή αναχώρηση του πλοίου από τον λιμένα. Η ομάδα αυτή είναι κατάλληλη για περιοδικά μη επανδρωμένα πλοία (Periodically Unmanned Ship ή PUS) και θα αναλαμβάνει τον έλεγχο του πλοίου σε ορισμένες μόνο φάσεις του ταξιδιού. Ως εκ τούτου, οι λιμένες αναμένεται στο μέλλον να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο, παρέχοντας υπηρεσίες που θα υποστηρίζονται από προηγμένες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνίας ξηράς (On-shore ICT) (MUNIN, 2014; Rødseth & Nordahl, 2017). Επιπροσθέτως, εργασίες όπως η συντήρηση των επικαλύψεων και ο καθαρισμός των χώρων του φορτίου θα πρέπει να γίνονται στο λιμάνι, με το ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό να χειρίζεται το πλοίο κατά την άφιξη και αναχώρηση. Σε περίπτωση που ο χρόνος συντήρησης και τα έξοδα που απαιτούνται είναι σημαντικά υψηλότερα από εκείνα ενός επανδρωμένου πλοίου, το μη επανδρωμένο ενδέχεται να μην είναι οικονομικά βιώσιμο (Hogg & Ghosh, 2016).

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2, βάσει του MUNIN, τα προαναφερθέντα βασικά συστήματα του μη επανδρωμένου πλοίου φαίνεται να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Πιο αναλυτικά, το σύστημα σχεδιασμού πορείας ταξιδιού, πλοήγησης

και αποφυγής συγκρούσεων (ANS) καθοδηγείται από το αυτόνομο σύστημα ελέγχου του πλοίου (Autonomous Ship Controller ή ASC) επιτρέποντας έτσι την λήψη αποφάσεων για τη ναυσιπλοΐα και τον έλεγχο του πλοίου, βάσει των στοιχείων που αντλούνται από το σύστημα αυτόματου ελέγχου και παρακολούθησης μηχανών (AEMC). Σε περίπτωση κρίσιμων ή δύσκολων καταστάσεων, το κέντρο ελέγχου ξηράς (SCC) ειδοποιείται και καλείται για συνδρομή και ανάληψη μερικού ή πλήρους χειρισμού του πλοίου. Η μονάδα ελέγχου που χρησιμοποιείται κυρίως κατά την προσέγγιση και τον απόπλου από τον λιμένα ονομάζεται Rendezvous Control Unit, ή RCU, και είναι ανεξάρτητη από όλα τα άλλα αυτόνομα συστήματα του πλοίου. Επομένως, η RCU μπορεί να φανεί χρήσιμη για την ανάκτηση του πλοίου, ακόμη και σε περίπτωση βλάβης ή απώλειας της δορυφορικής επικοινωνίας (Rødseth & Burmeister, 2015). Τέλος, η προηγμένη μονάδα αισθητήρα (ASM) χρησιμοποιεί δεδομένα από υψηλής ευκρίνειας κλειστό κύκλωμα τηλεόρασης (Closed-circuit television ή CCTV), υπέρυθρη κάμερα, αυτόματο σύστημα αναγνώρισης (Automatic Identification System ή AIS) και ραντάρ (Hogg & Ghosh, 2016).



Εικόνα 2: Η επισκόπηση της αλληλεπίδρασης των βασικών συστημάτων του μη επανδρωμένου πλοίου (MUNIN, 2015a).

Παράλληλα, ο Mooney (2015c), αναφερόμενος στο MUNIN, υποστήριξε ότι τα αυτόνομα πλοία έχουν μικρότερο κίνδυνο βύθισης και σύγκρουσης συγκριτικά με τα γνωστά σε εμάς συμβατικά πλοία. Επιπρόσθετα, ύστερα από μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του MUNIN σχετικά με την ποσοτική αξιολόγηση της ασφάλειας των μη επανδρωμένων φορτηγών πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, προέκυψε ότι αυτά αναμένονται να είναι ασφαλέστερα από τα συμβατικά πλοία, παρόλο που δεν υπάρχουν ακόμη επαρκείς πληροφορίες αναφορικά με το σχεδιασμό και τη λειτουργία τους (Rødseth & Burmeister, 2015).

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους η ναυτιλιακή βιομηχανία εξετάζει τη χρήση αυτόνομων πλοίων. Κατά την εμφάνισή του το 2012, το MUNIN προώθησε ως γενικό στόχο τη βελτίωση της επιχειρησιακής ανταγωνιστικότητας των αυτόνομων φορτηγών πλοίων (Riviera Maritime Media, 2015). Σύμφωνα με τον Hadi (2020), η ποσοτική αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε κατά το MUNIN είναι ίσως η πιο κατατοπιστική και περιεκτική εξέταση των οικονομικών πτυχών της λειτουργίας των μη επανδρωμένων πλοίων. Η μελέτη αυτή επικεντρώθηκε στη δυνατότητα υλοποίησης, από οικονομικής απόψεως, του οράματος για ένα μη επανδρωμένο σκάφος αναπτύσσοντας ένα μοντέλο ταμειακών ροών και ενσωματώνοντας διάφορους μικροοικονομικούς παράγοντες σε αυτό, όπως τα λειτουργικά έξοδα, το κόστος του ταξιδιού και τα απαραίτητα κεφάλαια. Η μελέτη συνέκρινε την αναμενόμενη παρούσα αξία ενός αυτόνομου πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου με ένα συμβατικό πλοίο. Αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής ήταν η εξοικονόμηση μέχρι και 7 εκατομμυρίων δολαρίων συγκεντρωτικά, σε μία διάρκεια 25 ετών. Υποστηρίζεται ότι στην περίπτωση των αυτόνομων πλοίων η κύρια εξοικονόμηση σε οικονομικούς πόρους προέρχεται από την μη επάνδρωσή τους και την αυξημένη απόδοση του καυσίμου (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017). Πιο συγκεκριμένα, για ένα τυπικό μεσαίου μεγέθους φορτηγό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου, μία 30% μείωση της ταχύτητας θα οδηγούσε σε εξοικονόμηση περίπου 50% των καυσίμων. Ωστόσο, ο μεγαλύτερος χρόνος ταξιδιού θα προκαλούσε δυσaréσκεια στο πλήρωμα του πλοίου και θα εξαντλούσε τον ήδη περιορισμένο αριθμό αξιωματικών. Ως εκ τούτου, ύστερα από συνεκτίμηση διάφορων οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών

παραγόντων, το MUNIN θεωρεί τα μη επανδρωμένα, αργά πλοία ως μία ενδιαφέρουσα πρόταση για την ναυτιλία βαθέν υδάτων (Riviera Maritime Media, 2015). Στον αντίποδα, όμως, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και πρόσθετα έξοδα που προκύπτουν από τις διάφορες υπηρεσίες υποστήριξης που παρέχονται στους λιμένες (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).

Καταληκτικά, στα πλαίσια του MUNIN, διάφορα στελέχη της ναυτιλίας ερωτήθηκαν αναφορικά με την ασφάλεια, καθώς και τις κοινωνικές/ περιβαλλοντικές επιπτώσεις της νέας αυτής τεχνολογίας. Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων είχε θετική άποψη για τα μη επανδρωμένα πλοία, ωστόσο το 60% των συμμετεχόντων εξέφρασε την ανησυχία του σχετικά με την πρόληψη των ατυχημάτων που προκαλούνται λόγω κάποιας τεχνικής βλάβης (European Commission, 2016). Επιπρόσθετα, η έρευνα αυτή αποκάλυψε μία νέα τάση, την οποία υποστήριξαν περίπου τα τρία τέταρτα των συμμετεχόντων. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίστηκε αυξημένο ενδιαφέρον για την απασχόληση στη ναυτιλιακή βιομηχανία, λόγω της μελλοντικής μετατόπισης της πλειοψηφίας των θέσεων εργασίας από τη θάλασσα στα διάφορα κέντρα ελέγχου ξηράς. Το υπόλοιπο ένα τέταρτο των ερωτηθέντων φάνηκαν διστακτικοί προς αυτή την άποψη - ήταν στην πραγματικότητα εκείνοι που εργάζονται ήδη ή έχουν εργαστεί για χρόνια σε ποντοπόρο πλοίο. Τοιουτοτρόπως, αποδείχθηκε ότι οι αξιωματικοί που επιλέγουν να εργαστούν στη θάλασσα, γνωρίζουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της επιλογής του συγκεκριμένου τρόπου ζωής. Επίσης, η έρευνα ανέδειξε και την εργασιακή ικανοποίησή τους. Τέλος, θεωρήθηκε ότι όσοι ερωτηθέντες δεν είχαν εργαστεί στη θάλασσα, μπορεί να επέλεξαν το συγκεκριμένο επάγγελμα για διαφορετικούς, από την κοινωνική απομόνωση, λόγους (European Commission, 2016; Hogg & Ghosh, 2016).

2.2 Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA) της Tekes

Το εγχείρημα Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA) αποτελεί ένα ερευνητικό πρόγραμμα 6,6 εκατομμυρίων ευρώ το οποίο

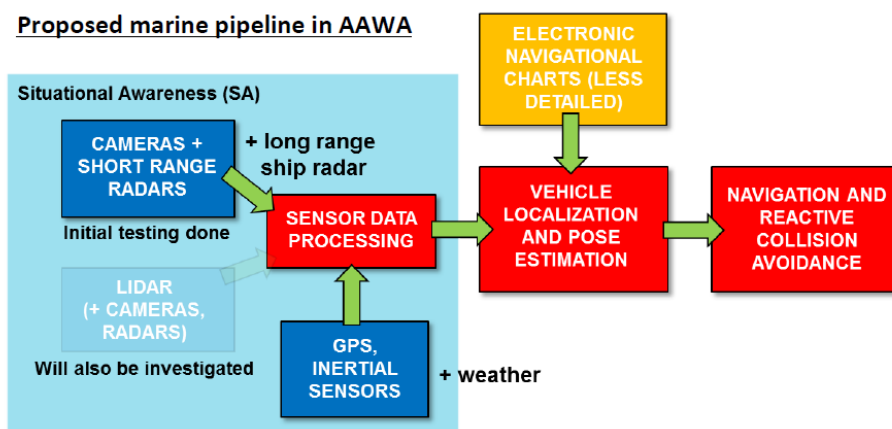
χρηματοδοτήθηκε από το σημαντικότερο δημόσιο φορέα χρηματοδότησης της έρευνας, τεχνολογίας και καινοτομίας στη Φινλανδία, ονόματι Tekes (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016; Ahvenjärvi, 2016). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι πολύ σημαντικό ρόλο στο εγχείρημα αυτό είχε και η εταιρεία Rolls-Royce. Η Rolls-Royce, μαζί και με τους υπόλοιπους συνεργάτες του ερευνητικού προγράμματος AAWA, όπως οι DNV GL, Inmarsat, Deltamarin, NAPA, Brighthouse Intelligence, Finferries και ESL Shipping – ηγήθηκαν της επανάστασης στον τομέα της αυτόνομης ναυσιπλοΐας. Σύμφωνα με τον τότε πρόεδρο της Rolls-Royce Plc, Mikael Mäkinen, η αυτόνομη ναυτιλία αποτελεί το μέλλον της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Ο ίδιος παρομοίασε το «έξυπνο» πλοίο με το «έξυπνο» κινητό τηλέφωνο, ως προς την καινοτομία, καθώς θα φέρει την επανάσταση στο σχεδιασμό και τις λειτουργίες των συμβατικών πλοίων. Σκοπός του έργου αυτού ήταν ο καθορισμός των προδιαγραφών και η δημιουργία προκαταρκτικών σχεδίων αυτόνομων πλοίων, στοχεύοντας στην επόμενη γενιά προηγμένων λύσεων για τη ναυτιλία.

Πιο συγκεκριμένα, παράλληλα με την ανάπτυξη τεχνολογικών λύσεων που επιτρέπουν υψηλότερα επίπεδα αυτόνομης λειτουργίας για τα πλοία, το AAWA στόχευσε στον εντοπισμό και την κατανόηση των - σχετικών με την ασφάλεια των αυτόνομων συστημάτων - κινδύνων, καθώς και στα μέτρα που θα οδηγούσαν στην αποτελεσματική διαχείρισή τους. Το ερευνητικό έργο AAWA εστίασε στις ιδιαίτερες προκλήσεις της αυτονομίας και της εφαρμογής του τηλεχειρισμού, ακόμη και σε περιπτώσεις μεγάλων ποντοπόρων πλοίων. Ο εντοπισμός των κινδύνων έγινε σταδιακά μέσω ολοκληρωμένων αναλύσεων, μελετών σε προσομοιωτές και πιλοτικών μελετών/δοκιμών σε ποντοπόρα πλοία. Μέσω της AAWA, η κατανόηση των αυτόνομων ή τηλεχειριζόμενων συστημάτων των πλοίων και της πολυπλοκότητάς τους αποκτήθηκε σιγά σιγά, διαμορφώνοντας μια ολιστική εικόνα αυτής της αναδυόμενης, υπό ανάπτυξη τεχνολογίας (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).



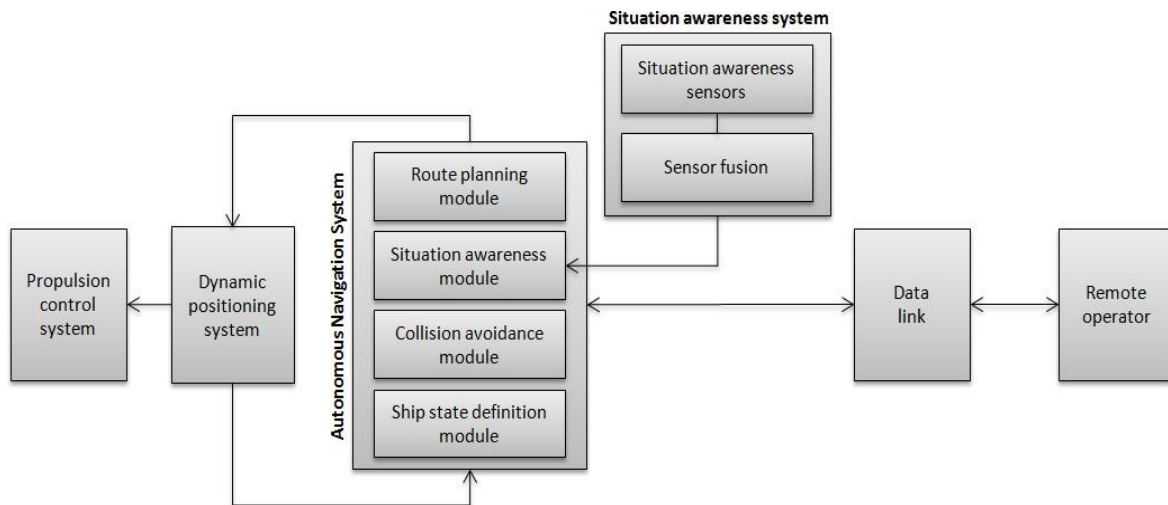
Εικόνα 3: Το μοντέλο του αυτόνομου πλοίου κατά το AAWA (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).

Πολλές υπάρχουσες τεχνολογικές λύσεις, ήδη γνωστές από την αυτοκινητοβιομηχανία μπορούσαν να εφαρμοστούν άμεσα, ή ύστερα από κάποια προσαρμογή/τροποποίηση, στην αυτόνομη ναυτιλία. Όμως, το κύριο ερώτημα δεν ήταν εάν η εφαρμογή της αυτόνομης ναυτιλίας ήταν τεχνικά εφικτή, αλλά ποιος θα ήταν ο καταλληλότερος συνδυασμός τεχνολογιών και μεθόδων που θα παρέχει το απαιτούμενο επίπεδο αξιοπιστίας για την αποτελεσματική λειτουργία των πλοίων, πάντα σε λογικό κόστος. Η Εικόνα 4 παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο το AAWA προσεγγίζει την αυτονομία των πλοίων (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).



Εικόνα 4: Η πλοήγηση ενός αυτόνομου πλοίου κατά το AAWA (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).

Κατά το ερευνητικό πρόγραμμα AAWA, αναπτύχθηκε μία τεχνολογική λύση με βασικό σκοπό την ενσωμάτωση της πλήρως αυτόνομης πλοήγησης στα πλοία. Η λύση αυτή επωφελήθηκε του συστήματος δυναμικής θεσιοθέτησης (Dynamic Positioning ή DP) της Rolls-Royce το οποίο αναπτύχθηκε για τα αυτόνομα πλοία του μέλλοντος και συνδέθηκε με το αυτόνομο σύστημα πλοήγησης (Autonomous Navigation System ή ANS), συμπεριλαμβανομένων των λειτουργιών αντίληψης της κατάστασης (Situational Awareness ή SA), αποφυγής σύγκρουσης (Collision Avoidance ή CA), σχεδιασμού διαδρομής (Route Planning ή RP) και ορισμού κατάστασης πλοίου (Ship State Definition ή SSD). Στο αυτόνομο σύστημα πλοήγησης (ANS) το υψηλότερο επίπεδο αποτελεί η λειτουργία ορισμού κατάστασης πλοίου (SSD) ή αλλιώς Virtual Captain (VC), που συνδυάζει ποικίλα δεδομένα προκειμένου να προσδιορίσει την τρέχουσα κατάσταση των συστημάτων του πλοίου. Οι πληροφορίες συλλέγονται από διαφορετικά υποσυστήματα του αυτόνομου συστήματος πλοήγησης (π.χ. SA, DP, RP και CA), από άλλα συστήματα αυτοματισμού του πλοίου, καθώς και από τον χειριστή. Η κατάσταση του πλοίου είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς καθορίζει τον επιτρεπόμενο τρόπο λειτουργίας του, είτε αυτός είναι αυτόνομος, είτε τηλεχειριζόμενος ή ασφαλής έναντι αστοχίας (failsafe). Σημειώνεται ότι οι πληροφορίες από το Virtual Captain (VC) χρησιμοποιούνται, επίσης, για τη συνεχή ενημέρωση του χειριστή αναφορικά με την κατάσταση του πλοίου (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016). Στην παρακάτω Εικόνα 5 φαίνεται πιο παραστατικά η προαναφερθείσα τεχνολογική λύση.



Εικόνα 5: Η προτεινόμενη κατά το AAWA τεχνολογική λύση ενσωμάτωσης της πλήρως αυτόνομης πλοήγησης στα πλοία (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).

Ως απόρροια του φινλανδικού ερευνητικού έργου AAWA και με βλέμμα στραμμένο προς την εποχή της αυτόνομης ναυτιλίας, κύρια έμφαση θα πρέπει να δοθεί στα θέματα ασφάλειας. Πιο συγκεκριμένα, πολύ σημαντικός είναι ο συστηματικός εντοπισμός και η σχετική αξιολόγηση των κινδύνων, με ιδιαίτερη προσοχή τόσο στις αλληλεπιδράσεις όσο και στις διαδικασίες σχεδιασμού και λειτουργίας του πλοίου. Μερικά από τα ζητήματα προς διερεύνηση είναι η διασφάλιση της κυβερνοασφάλειας, η επικύρωση των αλγορίθμων για την αυτόνομη πλοήγηση - συμπεριλαμβανομένης της ανίχνευσης εμποδίων και της αποφυγής συγκρούσεων - και η διασφάλιση κάθε λογισμικού καθώς και των ασφαλών αλληλεπιδράσεών του, μέσω ανάλυσης και προσομοιώσεων. Τέλος, βαρύτητα θα πρέπει να δοθεί στην επικύρωση των ζεύξεων δεδομένων για τις επικοινωνίες μεταξύ του πλοίου και της ξηράς, καθώς και στο σχεδιασμό με επίκεντρο τον χρήστη και την επικύρωση των λειτουργιών του κέντρου ελέγχου ξηράς (SCC) (Jalonen, Tuominen & Wahlström, 2017).

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με το ερευνητικό πρόγραμμα AAWA, δεν υπάρχει μόνο ένας ενιαίος τρόπος λειτουργίας του πλοίου, τηλεχειριζόμενος ή αυτόνομος, αλλά ένα υβρίδιο των δύο, κι αυτό εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου. Επιπλέον, οι τεχνολογίες που απαιτούνται για την λειτουργία των τηλεχειριζόμενων και αυτόνομων πλοίων υπάρχουν. Η πρόκληση, όμως, έγκειται στο να βρεθεί ο

βέλτιστος τρόπος να συνδυαστούν αξιόπιστα και οικονομικά. Συμπεραίνεται, επίσης, ότι η ανάπτυξη συστημάτων λήψης αποφάσεων για τα αυτόνομα σκάφη είναι μια σταδιακή διαδικασία που υπόκειται σε εκτεταμένες δοκιμές και προσομοιώσεις. Εν συνεχεία, η λειτουργία των τηλεχειριζόμενων και αυτόνομων πλοίων θα είναι τουλάχιστον εξίσου ασφαλής με αυτή των υπαρχόντων πλοίων. Υπάρχει δυνατότητα μείωσης των σφαλμάτων που οφείλονται στον άνθρωπο, αλλά ταυτόχρονα θα προκύψουν νέοι τύποι κινδύνων που θα πρέπει να εντοπιστούν και να αντιμετωπιστούν.

Τέλος, για να γίνει πραγματικότητα η αυτόνομη ναυτιλία, απαιτούνται ενέργειες σε όλα τα ρυθμιστικά επίπεδα. Η νομοθεσία μπορεί να αλλάξει, μόνο εάν υπάρξει πολιτική βούληση. Σε εθνικό επίπεδο, οι νομικές προκλήσεις της κατασκευής και λειτουργίας ενός τέτοιου σκάφους πρέπει να διερευνηθούν, εξετάζοντας ταυτόχρονα τις απαραίτητες αλλαγές των κανόνων που διέπονται από το Διεθνή Οργανισμό Ναυσιπλοΐας (IMO). Τα ζητήματα ευθύνης αναφορικά με τα αυτόνομα πλοία υπόκεινται σε εθνικές διαφοροποιήσεις και φαίνεται ότι για αυτά υπάρχει μικρότερη ανάγκη κανονιστικών αλλαγών. Ωστόσο, περισσότερη βαρύτητα θα πρέπει να δοθεί στο βαθμό που άλλοι κανόνες περί ευθύνης (π.χ. η ευθύνη για ελαττωματικά υλικά) θα επηρέαζαν τους υπάρχοντες κανόνες ευθύνης και ασφάλισης.

Καταληκτικά, τα αυτόνομα πλοία έχουν τη δυνατότητα να επαναπροσδιορίσουν τη ναυτιλιακή βιομηχανία και τους ρόλους των παικτών σε αυτήν, με συνολικές επιδράσεις στις ναυτιλιακές εταιρείες, τους ναυπηγούς, τους παρόχους ναυτιλιακών συστημάτων, καθώς και γενικότερα τις εταιρείες τεχνολογίας (ειδικότερα, όμως, του τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας) (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016).

2.3 Ηλεκτρικό και αυτόνομο πλοίο Yara Birkeland των Yara και Kongsberg

Ανάμεσα στα πιο πρόσφατα ερευνητικά έργα που σχετίζονται με την αυτόνομη ναυτιλία ανήκει το λεγόμενο Yara Birkeland (Kongsberg Maritime, 2018). Οι εταιρείες Yara και Kongsberg συνεργάστηκαν για την κατασκευή του πρώτου πλήρως ηλεκτρικού και αυτόνομου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στον κόσμο, μήκους 80 μέτρων και μηδενικών εκπομπών καυσαερίων. Μέσω του συγκεκριμένου εγχειρήματος ενισχύονται οι βλέψεις για μια ναυτιλία μηδενικών ρύπων. Το έργο ξεκίνησε το 2017 και το πλοίο τέθηκε σε αρχική λειτουργία το 2019, ενώ το 2022 ξεκίνησε η εμπορική του λειτουργία. Στην παρακάτω Εικόνα 6 παρουσιάζεται το πλοίο Yara Birkeland κατά την εμπορική του λειτουργία.



Εικόνα 6: Το πλοίο Yara Birkeland κατά την εμπορική του λειτουργία (Yara, 2024a).

Το πλοίο έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιεί, αντί για δεξαμενές έρματος, συστοιχίες μπαταριών ως μόνιμο έρμα. Συνεπώς, το πλοίο τροφοδοτείται πλήρως από μπαταρίες. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να ελλιμενιστεί αυτόματα ή να αποπλεύσει χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, μέσω ενός αυτόματου συστήματος πρόσδεσης. Το Yara Birkeland μπορεί να μεταφέρει εμπορεύματα τα οποία μέχρι

πρότινος διακινούνταν μέσω φορτηγών, καταργώντας έτσι έως και 40.000 διαδρομές φορτηγών ετησίως σε κατοικημένες αστικές περιοχές. Επομένως, με το εγχείρημα αυτό, οι οδικές μεταφορές φαίνεται ότι τείνουν να αντικατασταθούν από την ναυτιλία μικρών αποστάσεων. Κατά συνέπεια, αναμένεται να μειωθούν σημαντικά οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NO_x) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενώ θα βελτιωθούν η οδική ασφάλεια και η κυκλοφοριακή συμφόρηση, συμβάλλοντας έτσι στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (Yara, 2024a; Yara, 2024b).

Η Yara παρουσίασε επισήμως το πρώτο πλήρως ηλεκτρικό και αυτόνομο φορτηγό πλοίο στον κόσμο στις 18 Νοεμβρίου του 2021. Εκείνη την περίοδο το πλοίο πραγματοποίησε το παρθενικό του ταξίδι από το Horten στο Oslo, της Νορβηγίας. Το πλοίο ναυπηγήθηκε από τη VARD με οικονομική ενίσχυση από την Επονα και η εμπορική του λειτουργία ξεκίνησε την άνοιξη του 2022. Η Επονα αποτελεί μία κρατική επιχείρηση υπεύθυνη για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η οποία διέθεσε 133,5 εκατομμύρια νορβηγικές κορόνες για την κατασκευή του πρώτου ηλεκτρικού και αυτόνομου φορτηγού πλοίου στον κόσμο.

Μέσω μίας εταιρικής ανακοίνωσης, ο CEO της Yara, Svein Tore Holsether ανέφερε ότι το Yara Birkeland πρόκειται να μεταφέρει λιπάσματα από τις εγκαταστάσεις της Yara στο Porsgrunn στα λιμάνια Brevik και Larvik της Νορβηγίας, συμβάλλοντας έμπρακτα και σε σημαντικό βαθμό στη μείωση των εκπομπών ρύπων (Yara, 2021; Skredderberget, 2018). Πιο συγκεκριμένα, η πορεία του Yara Birkeland παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Ο ίδιος τόνισε ότι πρόκειται για ένα εξαιρετικό παράδειγμα «πράσινης μετάβασης» και ελπίζει ότι το Yara Birkeland θα αποτελέσει τη βάση ενός νέου τύπου φορτηγών πλοίων με μηδενικές εκπομπές καυσαερίων. «Η συγκεκριμένη λύση υψηλής τεχνολογίας θα επωφελοούσε πολλά μέρη στον κόσμο με έντονη κυκλοφοριακή συμφόρηση» δήλωσε ο Holsether (Yara, 2021).



Εικόνα 7: Η προβλεπόμενη πορεία του Yara Birkeland (Reddy et al., 2019).

2.4 Άλλα εγχειρήματα αυτόνομης ναυσιπλοΐας

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναδυθεί παγκοσμίως διάφορα εγχειρήματα αυτόνομης ναυσιπλοΐας. Παραδείγματος χάρη, στο Βέλγιο και στην Ιαπωνία, φορτηγά-οχηματαγωγά πλοία εκτελούν δρομολόγια σε συγκεκριμένους προορισμούς, αγκυροβολούν και αποπλέουν αυτόνομα, ενώ παράλληλα το ίδιο συμβαίνει κι στην Κίνα με μεγάλα αυτόνομα φορτηγά πλοία που εκτελούν δρομολόγια μεταξύ κινεζικών λιμανιών (TO VIMA, 2024).

Στις αρχές του 2022 τα Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) ξεκίνησαν τις πρώτες δοκιμές σε ιαπωνικά ύδατα. Πιο συγκεκριμένα, το πλοίο μεταφοράς αυτοκινήτων «Soleil» έγινε το πρώτο μεγάλο σκάφος που ταξίδεψε χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, πραγματοποιώντας ένα ταξίδι μήκους 240 χιλιομέτρων στη θάλασσα Iyonada, από το Shinmoji στο βόρειο Kyushu. Το πλοίο πλοηγήθηκε μέσω του αυτόνομου συστήματος πλοήγησης «Super Bridge-X», το οποίο είναι εξοπλισμένο με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και βαθιάς μάθησης, αυτόματο σύστημα αναγνώρισης (AIS), υπέρυθρες κάμερες, ραντάρ και ένα σύστημα ανάλυσης εικόνας στόχου (target image analysis system), αντικαθιστώντας έτσι ολοκληρωτικά την ανάγκη για ανθρώπινο έλεγχο. Το πλοίο

διήλθε δίπλα από αλιευτικά σκάφη και δεξαμενόπλοια, με ελιγμούς που ακόμη και έμπειροι χειριστές θεωρούν δύσκολους. Το γεγονός αυτό απέδειξε έμπρακτα και με επιτυχία την πλήρη αυτονομία του πλοίου. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της διαδρομής ο χειριστής χρειάστηκε σε ένα σημείο να αναλάβει τον έλεγχο του πλοίου προκειμένου να διασφαλίσει ότι το πλήρωμα ενός σκάφους, σε κοντινή απόσταση από το «Soleil», δεν είχε αναστατωθεί. Ο αρχιμηχανικός του «Soleil» δήλωσε ότι όλα τα συστήματα λειτουργούσαν κανονικά. Επειδή, όμως, το πλοίο ακολουθούσε μία πορεία που θα μπορούσε να προκαλέσει ανησυχία, ίσως και πανικό, στο πλήρωμα του άλλου σκάφους, ο καπετάνιος του «Soleil» ενεργώντας προορατικά εκτέλεσε έναν χειροκίνητο ελιγμό αποφυγής. Στο σημείο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό να τονιστεί ότι υπάρχουν δύο σχολές σκέψης - η μία προτείνει ότι η τεχνολογία «βοηθά» τους ναυτικούς και η άλλη υποστηρίζει ότι οι ναυτικοί «βοηθούν» την τεχνολογία. Βέβαια, βέλτιστα αποτελέσματα έρχονται όταν οι ναυτικοί και η τεχνολογία αλληλεπιδρούν και αλληλοσυμπληρώνονται. Ωστόσο, κάτι τέτοιο μπορεί να εγκυμονεί τον κίνδυνο της υπερβολικής εξάρτησης από την τεχνολογία, που πάντοτε όμως αποτελούσε πρόβλημα για τη ναυτιλία (Negenborn et al., 2023; Parlov, 2023).

Την άνοιξη του 2022, οι εταιρείες IBM και ProMare πέτυχαν μια πλήρως μη επανδρωμένη και αυτόνομη διέλευση του Ατλαντικού ωκεανού σε διάστημα 40 ημερών, πλέοντας από το Plymouth του Ηνωμένου Βασιλείου στο Halifax της Νέας Σκωτίας, στον Καναδά (Enevoldsen, 2023). Το εν λόγω μη επανδρωμένο σκάφος λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια, χρησιμοποιεί λύσεις τεχνητής νοημοσύνης της IBM AI, τεχνολογίες αυτοματισμού, cloud και edge και αποτελεί ασφαλέστερη και οικονομικότερη λύση έναντι των επανδρωμένων πλοίων. Το συγκεκριμένο σκάφος είναι σχεδιασμένο για θαλάσσια εξερεύνηση κι έχει ως στόχο να συγκεντρώσει δεδομένα για τους ωκεανούς, π.χ. τις επιπτώσεις της υπερθέρμανσης του πλανήτη και της ρύπανσης στη θαλάσσια ζωή (IBM, 2024).

Παράλληλα, το φορτηγό πλοίο «Suzaku» πραγματοποίησε με επιτυχία ένα δοκιμαστικό μη επανδρωμένο πλου για τη διαδρομή (μετ' επιστροφής) Tokyo – Tsumatsuzaka, καλύπτοντας μία απόσταση περίπου 790 χιλιομέτρων. Το

συγκεκριμένο εγχείρημα αποτέλεσε τον πρώτο αυτόνομο δοκιμαστικό πλου στον κόσμο, σε περιοχή έντονης κυκλοφορίας (Chen et al., 2023).

Τέλος, στην Κίνα, το ηλεκτρικό φορτηγό πλοίο «Zhi Fei», μήκους 120 μέτρων, έπλευσε υπό τηλεχειριζόμενο (και μερικές φορές αυτόνομο) τρόπο λειτουργίας, μεταξύ δύο λιμένων στην επαρχία Shandong (Negenborn et al., 2023).



Εικόνα 8: Το πλοίο Zhi Fei εν πλω (Negenborn et al., 2023).

3. Τεχνητή νοημοσύνη και αυτονομία

3.1 Η ναυτιλία στην εποχή της τέταρτης επανάστασης

Με την πάροδο του χρόνου, τα πλοία έχουν γνωρίσει σημαντική τεχνολογική εξέλιξη. Εξετάζοντας την ιστορία της ναυτιλίας, τρεις σημαντικές περίοδοι μπορούν να εντοπιστούν. Η πρώτη μεγάλη αλλαγή σημειώθηκε γύρω στο 1800, όταν τα ξύλινα πλοία με πανιά αντικαταστάθηκαν από ατσάλινα με ατμομηχανές. Η δεύτερη επανάσταση ήρθε στις αρχές του 20ού αιώνα, με την αντικατάσταση του ατμού από το πετρέλαιο ως βασική πηγή ενέργειας. Τέλος, η τρίτη καθοριστική φάση εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1970, με την εισαγωγή των υπολογιστών στα συστήματα των πλοίων (Rødseth, Ørnulf Jan, Perera, & Mo, 2016). Από τη δεκαετία του 1970, τα σύγχρονα πλοία είναι εξοπλισμένα με πλήθος αισθητήρων, κατανεμημένων σε όλο το σκάφος, οθόνες που παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, καθώς και συστήματα δορυφορικής παρακολούθησης και επικοινωνίας. Επιπλέον, ποικίλες προηγμένες τεχνολογίες υποστηρίζουν καθημερινά τους ναυτικούς στην εργασία τους. Σήμερα, η τέταρτη επανάσταση στη ναυτιλία βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη (Paine, 2014). Η ψηφιακή εποχή είναι πλέον γεγονός, επηρεάζοντας τον τρόπο που ζούμε, επικοινωνούμε, εργαζόμαστε και λαμβάνουμε αποφάσεις. Η ψηφιοποίηση ανοίγει νέους ορίζοντες για τους πλοιοκτήτες και γενικότερα για τις επιχειρήσεις του ναυτιλιακού κλάδου. Κεντρικό ρόλο σε αυτή την επανάσταση διαδραματίζουν τα μεγάλα δεδομένα και η τεχνητή νοημοσύνη, δύο από τα σημαντικότερα τεχνολογικά επιτεύγματα των τελευταίων δεκαετιών (Latifon, 2019). Η πρόοδος στα αυτόνομα πλοία βασίζεται κυρίως στις εξελίξεις στον τομέα της μηχανικής μάθησης, όπου οι υπολογιστές εκπαιδεύονται να αναλύουν και να μαθαίνουν από συγκεκριμένα σύνολα δεδομένων (Glomsrud, Ødegårdstuen, Clair & Smogeli, 2019). Ο απώτερος στόχος της τεχνητής νοημοσύνης είναι η δημιουργία συστημάτων που θα λειτουργούν αυτόνομα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Οι ναυτιλιακές εταιρείες, επομένως, έχουν αρχίσει να

συνεργάζονται στενά με τεχνολογικούς κολοσσούς, προκειμένου να αναπτύξουν πλήρως αυτόνομα πλοία (Latifon, 2019).

Η αγορά της τεχνητής νοημοσύνης στη ναυτιλία έχει σημειώσει εκρηκτική ανάπτυξη τον τελευταίο χρόνο, σχεδόν τριπλασιάζοντας το μέγεθός της. Σύμφωνα με την έκθεση “*Beyond the Horizon: Opportunities and Obstacles in the Maritime AI Boom*” που δημοσιεύθηκε τον Σεπτέμβριο του 2024 από την Thetius για λογαριασμό της Lloyd’s Register, η αγορά αποτιμάται πλέον στα 4,13 δισεκατομμύρια δολάρια, με προβλεπόμενο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 23% για τα επόμενα πέντε χρόνια. Πρόκειται για σημαντική αύξηση σε σύγκριση με την περσινή αξία των 1,47 δισ. δολαρίων, καταδεικνύοντας την ταχεία ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών στη ναυτιλία. Η έκθεση εστίασε, επίσης, σε έξι βασικούς τομείς εφαρμογής της τεχνητής νοημοσύνης στη ναυτιλία. Εντοπίστηκαν 36 ναυτιλιακές εταιρείες που είτε έχουν υιοθετήσει είτε σχεδιάζουν να εφαρμόσουν την τεχνητή νοημοσύνη μέσα στο προηγούμενο έτος. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις, που αποτελούν το 63% των προμηθευτών τεχνολογίας AI, ενώ το 18% αντιπροσωπεύεται από μεγάλες εταιρείες και ένα αυξανόμενο 17% από νεοφυείς επιχειρήσεις, παρουσιάζοντας αύξηση της τάξεως του 5% από το 2022-2023. Ο Mark Warner, Global Content and Communications Director της Lloyd’s Register, τόνισε ότι τα αποτελέσματα της έρευνας αποδεικνύουν πως ο ναυτιλιακός τομέας, αν και παραδοσιακά επιφυλακτικός απέναντι στις αλλαγές, υιοθετεί την τεχνητή νοημοσύνη με ενθουσιασμό. Αυτή η στροφή οφείλεται στην ανάγκη για αυξημένη αποδοτικότητα, βελτιωμένη ασφάλεια και βιωσιμότητα. Οι τεχνολογίες AI χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των ταξιδιών, την πρόβλεψη της συντήρησης, την ενίσχυση της ασφαλούς ναυσιπλοΐας και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (Lloyd’s Register, 2024a; Lloyd’s Register, 2024b).

3.2 Επίπεδα αυτονομίας των πλοίων

Στη σύγχρονη εποχή, πολλά συστήματα στα πλοία είναι αυτοματοποιημένα, διευκολύνοντας συγκεκριμένες λειτουργίες. Ωστόσο, είναι

σημαντικό να γίνεται διάκριση μεταξύ αυτοματοποίησης και αυτονομίας. Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα απαιτεί ανθρώπινη παρέμβαση για τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων, ενώ ένα αυτόνομο μπορεί να εκτελεί τις λειτουργίες του χωρίς την ανάγκη χειριστή ή οδηγού (Latifon, 2019).

Το 2022, ο IMO εισήγαγε κατευθυντήριες γραμμές για τα επίπεδα αυτονομίας των πλοίων, τα οποία κυμαίνονται από το 1 έως και το 4 και φαίνονται παρακάτω (IMO 2022). Αυτή η κλίμακα δείχνει την προοδευτική μετάβαση από τη αρχική προσέγγιση λειτουργίας στην πλήρη αυτονομία, αντικατοπτρίζοντας τις τεχνολογικές εξελίξεις στον κλάδο.

Degree one - Υποστήριξη αποφάσεων: Το πλήρωμα λαμβάνει όλες τις αποφάσεις, αλλά τα συστήματα του πλοίου παρέχουν πληροφορίες που μπορούν να επηρεάσουν τις επιλογές του πληρώματος. Τα δεδομένα μπορεί να προέρχονται από συστήματα εντός ή εκτός πλοίου.

Degree two - Εποπτεία με δυνατότητα παρέμβασης: Το πλοίο ελέγχεται απομακρυσμένα υπό την επίβλεψη του πληρώματος, το οποίο είναι έτοιμο να αναλάβει τον έλεγχο σε έκτακτες καταστάσεις.

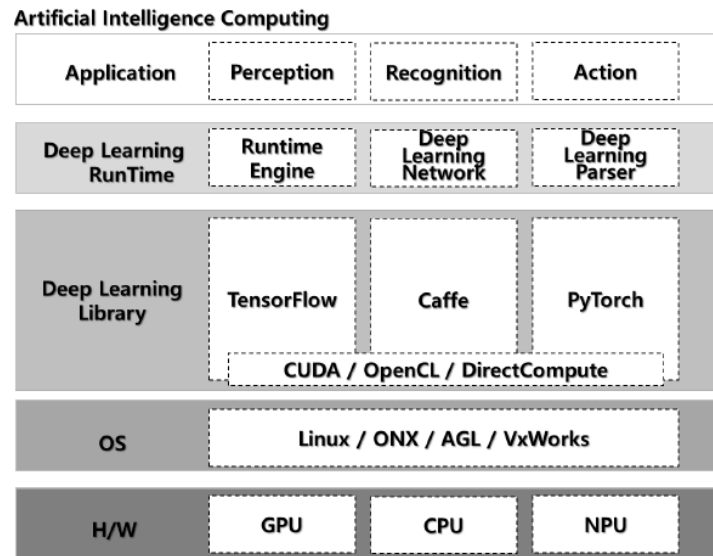
Degree three – Πλήρως απομακρυσμένη λειτουργία: Το πλοίο ελέγχεται απομακρυσμένα χωρίς να επιβαίνει πλήρωμα.

Degree four - Πλήρως αυτόνομο: Το πλοίο διαχειρίζεται όλες τις λειτουργίες και καταστάσεις μόνο του, χωρίς την ανάγκη εποπτείας.

3.3 Η δομή των αυτόνομων συστημάτων

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται σε γενικότερο πλαίσιο η δομή του υπολογιστικού μοντέλου ενός αυτόνομου συστήματος, το οποίο αποτελείται αρχικά από το υλικό (Hardware ή H/W) και το λειτουργικό σύστημα (Operating System ή OS), που υποστηρίζουν τη λειτουργία του συστήματος. Στη συνέχεια, ακολουθεί το τμήμα της βαθιάς μάθησης - σχετίζεται με την επεξεργασία δεδομένων και την αναγνώριση μοτίβων. Τέλος, ακολουθούν οι εφαρμογές που σχετίζονται με την αναγνώριση του περιβάλλοντος, τη λήψη αποφάσεων και τον

έλεγχου, διασφαλίζοντας την ομαλή και αυτόνομη λειτουργία του (Yongwon et al., 2019).



Εικόνα 9: Η δομή του υπολογιστικού μοντέλου ενός αυτόνομου συστήματος (Yongwon et al., 2019).

Πιο συγκεκριμένα, τα αυτόνομα συστήματα στα πλοία αποτελούνται από δύο βασικά μέρη: τα συστήματα αντίληψης και τα συστήματα ελέγχου. Τα συστήματα αντίληψης περιλαμβάνουν τεχνολογίες, όπως ο εντοπισμός της θέσης του πλοίου, το ραντάρ (RADAR) και διάφορους αισθητήρες που σαρώνουν το περιβάλλον. Από την άλλη, τα συστήματα ελέγχου διαχειρίζονται τη λειτουργία του πλοίου, όπως τα συστήματα πρόωσης και διεύθυνσης. Για την πραγματοποίηση ακόμη και των πιο απαιτητικών ελιγμών, τα πλοία χρησιμοποιούν εξελιγμένα συστήματα, όπως είναι οι προωθητές αζιμουθίου. Αυτοί οι προωθητές, εξοπλισμένοι με ηλεκτρικούς κινητήρες και προπέλες, έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται πλήρως, κατά 360 μοίρες, διευκολύνοντας την ασφαλή και γρήγορη είσοδο ακόμη και των μεγαλύτερων πλοίων σε στενά λιμάνια. Το σύστημα αυτό σε συνδυασμό με τα δεδομένα από το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (Global Navigation Satellite System ή GNSS) συνδυάζονται με συστήματα ελέγχου σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα δυναμικής θεσιοθέτησης (Dynamic Positioning ή DP), το πλοίο μπορεί να παραμένει σταθερό και να

διατηρεί την κατεύθυνσή του, ακόμη και υπό δύσκολες καιρικές συνθήκες, αντισταθμίζοντας π.χ. την επίδραση των μεταβαλλόμενων ανέμων και των κυμάτων.

Παρόλο που τα συστήματα ελέγχου έχουν σημειώσει σημαντική πρόοδο, τα συστήματα αντίληψης είναι ακόμη ανεπαρκώς ανεπτυγμένα για πλήρως αυτόνομες λειτουργίες. Υπάρχει ανάγκη για βελτίωση των υπαρχόντων ήδη ανεπτυγμένων τεχνολογιών, όπως τα RADAR και GNSS¹, με την ενσωμάτωση νέων αισθητήρων και την αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης με στόχο το συνδυασμό δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες, ενισχύοντας έτσι την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους.

Τα συστήματα αντίληψης που βασίζονται σε πολλαπλούς αισθητήρες προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η ανίχνευση στόχων που δεν μπορούν να εντοπιστούν από έναν μόνο αισθητήρα αλλά είναι ορατοί μέσω άλλων, καθώς και η διασταύρωση δεδομένων, επιβεβαίωση των παρατηρήσεων από διαφορετικές πηγές. Με το συνδυασμό πληροφοριών από διάφορους αισθητήρες, αυτά τα συστήματα επιτυγχάνουν πιο ακριβή αντίληψη του περιβάλλοντος. Αν και η χρήση τους είναι διαδεδομένη στα αυτόνομα αυτοκίνητα, στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Unmanned Aerial Vehicles ή UAV) και στη ρομποτική, η εφαρμογή τους στη ναυτιλία αντιμετωπίζει προκλήσεις. Το θαλάσσιο περιβάλλον, ιδιαίτερα σε πολικές περιοχές, χαρακτηρίζεται από αντίξοες καιρικές συνθήκες, καθιστώντας απαραίτητη την ανάπτυξη ανθεκτικών αισθητήρων. Επιπλέον, η διεξαγωγή πειραμάτων σε πλοία είναι συχνά οικονομικά ασύμφορη, καθώς η πρόσβαση στα δεδομένα των συστημάτων των πλοίων απαιτεί ανάθεση σε εξωτερικούς συνεργάτες, κάτι που αυξάνει το κόστος. Η παραδοσιακή προσέγγιση για την κυβερνοασφάλεια στη ναυτιλία βασίζεται στη διατήρηση των πλοίων απομονωμένα από το διαδίκτυο και τα εταιρικά δίκτυα, περιορίζοντας έτσι την ελεύθερη διαχείριση και ανταλλαγή δεδομένων.

Η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης (AI) στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα και ο συνδυασμός δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες αποτελεί, επομένως, τη φυσική εξέλιξη των πραγμάτων. Παρόλο που υπάρχουν πολλές μελέτες και εφαρμογές της AI, λίγες επικεντρώνονται στην υψηλού επιπέδου

επίγνωση της κατάστασης. Λόγω της περιορισμένης έρευνας στον συγκεκριμένο τομέα, εξετάζονται και προσεγγίσεις που εισάγουν δυνητικά χρήσιμες μεθόδους για την ανάπτυξη συστημάτων αντίληψης πολλαπλών αισθητήρων στη ναυτιλία (Thombre et al., 2022).

3.4 Απαιτήσεις για επίγνωση κατάστασης στα αυτόνομα πλοία

Το πλήρωμα της γέφυρας χρησιμοποιεί ποικιλία συστημάτων, όπως το Διαφορικό Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (DGNSS), το Ηλεκτρονικό Σύστημα Απεικόνισης Χαρτών και Πληροφοριών (ECDIS) και το ραντάρ (RADAR). Οι πιο έμπειροι καπετάνιοι, ωστόσο, εμφανίζονται λιγότερο πρόθυμοι να βασιστούν πλήρως σε αυτά (Lehtola, Montewka & Salokannel, 2020). Συχνά διασταυρώνουν τη θέση του πλοίου με τη χρήση του RADAR, των πληροφοριών στην οθόνη του ECDIS (που βασίζεται στο DGNSS) και παρατηρήσεων μέσω διοπτρεύσεων προκειμένου να επιβεβαιώσουν την πορεία. Παρόμοια αρχή θα ισχύει και στα αυτόνομα πλοία - τα συστήματά τους θα είναι σχεδιασμένα ώστε να μην βασίζονται αποκλειστικά σε μία πηγή δεδομένων. Αντίθετα, θα διασταυρώνουν και θα επαληθεύουν πληροφορίες από πολλαπλούς αισθητήρες. Συνεπώς, η έννοια της επίγνωσης κατάστασης (Situational Awareness ή SA) αναφέρεται ως η ικανότητα του αυτόνομου πλοίου να αναγνωρίζει αντικείμενα κατά μήκος της προγραμματισμένης διαδρομής του μέσω ενός ή περισσότερων αισθητήρων. Το σύστημα πρέπει επίσης να μπορεί να εντοπίζει, να ταξινομεί τα αντικείμενα και, αν χρειαστεί, να μετρά αποστάσεις, διασφαλίζοντας τη συμφωνία των δεδομένων από τις διάφορες πηγές.

Ως εκ τούτου, προκύπτει η ανάγκη τήρησης συγκεκριμένων απαιτήσεων, οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις βασικές ομάδες: απαιτήσεις για το σύστημα εντοπισμού θέσης, πλοήγησης και χρονισμού (Positioning Navigation & Timing ή PNT), απαιτήσεις για την ανίχνευση, καθώς και απαιτήσεις που αφορούν το λογισμικό τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης (ML) (Thombre et al., 2022).

3.4.1 Απαιτήσεις για το σύστημα PNT του πλοίου

Οι απαιτήσεις για την ακριβή θέση του πλοίου βασίζονται σε υπάρχουσες κατευθυντήριες γραμμές του IMO, στα συστήματα δυναμικής θεσιοθέτησης (DP) και την ανάλυση του Ευρωπαϊκού οργανισμού των παγκόσμιων δορυφορικών συστημάτων πλοήγησης (European Global Navigation Satellite System Agency ή GSA) σχετικά με τις ανάγκες των χρηστών. Οι προτεινόμενες ενοποιημένες τιμές προσδιορισμού θέσης που αφορούν την προσέγγιση λιμανιών και παράκτιων περιοχών παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακας 1. Στην πρώτη γραμμή κάθε απαίτησης φαίνεται η προδιαγραφή του IMO, ενώ στη δεύτερη γραμμή αναφέρονται οι προτεινόμενες τιμές για αυτόνομα πλοία, όπως βασίζονται σε μελέτες και πιλοτικές δοκιμές μικρής κλίμακας (Proof-of-Concept ή PoC). Για παράδειγμα, παρατηρώντας το fix interval, ενώ ο IMO απαιτεί ένα στίγμα ανά δευτερόλεπτο [1 s (IMO)], για τα αυτόνομα πλοία προτείνεται η παραγωγή δύο στιγμάτων ανά δευτερόλεπτο [0.5 s (PoC)] για μεγαλύτερη ακρίβεια (Thombre et al., 2022).

Item	Port Approach	Coastal Area
Horizontal accuracy (95%)	10 m (IMO), 3 m (DP using PoC)	10 m (IMO), 3 m (DP using PoC)
Fix interval	1 s (IMO), 0.5 s (PoC)	1 s (IMO), 0.5 s (PoC)
Integrity (number of sources)	1 (IMO), >2 (DP using PoC)	1 (IMO), >2 (DP using PoC)
Integrity TTA (Time To Alarm)	10 s (IMO), 5 s (GSA)	10 s (IMO), 5 s (GSA)
Integrity HAL (Horizontal Alarm Limit)	25 m (IMO), 12.5 m (GSA)	25 m (IMO), 12.5 m (GSA)
Integrity risk	10^{-5} in 3 h (IMO), 10^{-5} in 3 h (PoC)	10^{-5} in 3 h (IMO), 10^{-5} in 3 h (PoC)

Πίνακας 1: Προτεινόμενες ενοποιημένες τιμές προσδιορισμού θέσης που αφορούν την προσέγγιση λιμανιών και παράκτιων περιοχών (Thombre et al., 2022).

3.4.2 Απαιτήσεις για την ανίχνευση

Οι απαιτήσεις για την ανίχνευση είναι πιο δύσκολο να καθοριστούν καθώς δεν υπάρχει οδηγία από επίσημους φορείς. Ωστόσο, στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται προτεινόμενες τιμές για την απόσταση ανίχνευσης στόχων, οι οποίες βασίζονται σε δεδομένα από το πρόγραμμα MUNIN και μελέτες του IMO. Πέρα από την εμβέλεια ανίχνευσης, σημαντικές παράμετροι περιλαμβάνουν την ικανότητα ανίχνευσης στόχων μέσω πολλαπλών αισθητήρων, την ακριβή ποσοτικοποίηση της κατεύθυνσης και την κατηγοριοποίησή τους. Το λογισμικό AI του αυτόνομου πλοίου πρέπει, επίσης, να περιλαμβάνει ένα λειτουργικό σύστημα εξόδου, ώστε να διασφαλίζεται η αποτελεσματική κοινοποίηση των δεδομένων των στόχων (Thombre et al., 2022).

Target	Detection Range	Main Reference
Ship>50m with Class-A AIS	8NM	MUNIN + RADAR range
Ship12-50m with Class-A AIS	5NM	COLREGs Rule 22
Boat <12m with Class-B AIS	5NM	COLREGs Rule 22
Boat <12m without AIS	2NM	COLREGs Rule 22
Kayak-size object	1NM	MUNIN
Fixed radar mark	8NM	IMO RADAR range
Ice buoy	3NM	IMO RADAR range
Port/marina buoy	1NM	IMO RADAR range

Πίνακας 2: Προτεινόμενες τιμές για την απόσταση ανίχνευσης στόχων (Thombre et al., 2022).

3.4.3 Απαιτήσεις για το λογισμικό AI και ML

Η εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και των λειτουργιών μηχανικής μάθησης (ML) είναι καθοριστική για τη συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες, καθώς και για την ανίχνευση και ταξινόμηση των στόχων. Επίσης, η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση χρησιμοποιούνται

για την ανάλυση δεδομένων, αλλά και για την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Συνεπώς, το λογισμικό AI θα πρέπει να μπορεί να λειτουργεί εκτός σύνδεσης, να επεξεργάζεται δεδομένα επίγνωσης κατάστασης (SA) σε πραγματικό χρόνο και μέσα σε εύλογο χρονικό διάστημα (λιγότερο από 60 δευτερόλεπτα). Πρέπει να διαθέτει την ικανότητα ακριβούς ανίχνευσης και ταξινόμησης στόχων, καθώς και να αξιολογεί την ποιότητα των δεδομένων από τους αισθητήρες, διασφαλίζοντας την ακεραιότητά τους. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να υποστηρίζει τόσο εμπορικά διαθέσιμο εξοπλισμό (Commercial-Off-The-Shelf ή COTS) όσο και προσαρμοσμένες λύσεις, ενώ τα δεδομένα που εξάγει πρέπει να παρουσιάζονται σε κατάλληλες μορφές καλύπτοντας τις εκάστοτε ανάγκες (Thombre et al., 2022).

3.5 Ανασκόπηση της τεχνολογίας αισθητήρων σε αυτόνομα πλοία

3.5.1 Προτεινόμενο σύστημα αισθητήρων πειραματικού σταδίου

Ο Πίνακας 3 παρέχει μια συγκριτική αξιολόγηση των διαφορετικών αισθητήρων που συμβάλλουν στην ανάπτυξη της επίγνωσης κατάστασης σε αυτόνομα πλοία (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016; Thombre et al., 2022).

	Visual Camera	Ship RADAR	LiDAR	Sound
Spatial accuracy	✓✓	XX	✓✓	XX
FOV	✓	✓✓	✓	✓✓
Distance measurement	X	✓✓	✓✓	XX
Object identification	✓✓	XX	✓	✓
24x7, all-weather	XX	✓✓	✓(?)	X(?)
Computational load	XX	✓✓	XX	✓
Marine robustness	✓✓	✓✓	(?)	(?)

Πίνακας 3: Σύγκριση των διαφορετικών αισθητήρων σε αυτόνομα πλοία (AAWA & Rolls-Royce Marine, 2016; Thombre et al., 2022).

Η προτεινόμενη συστοιχία αισθητήρων αποτελείται από τέσσερις κατηγορίες: οπτικούς αισθητήρες (όπως κάμερες), συστήματα RADAR και LiDAR,

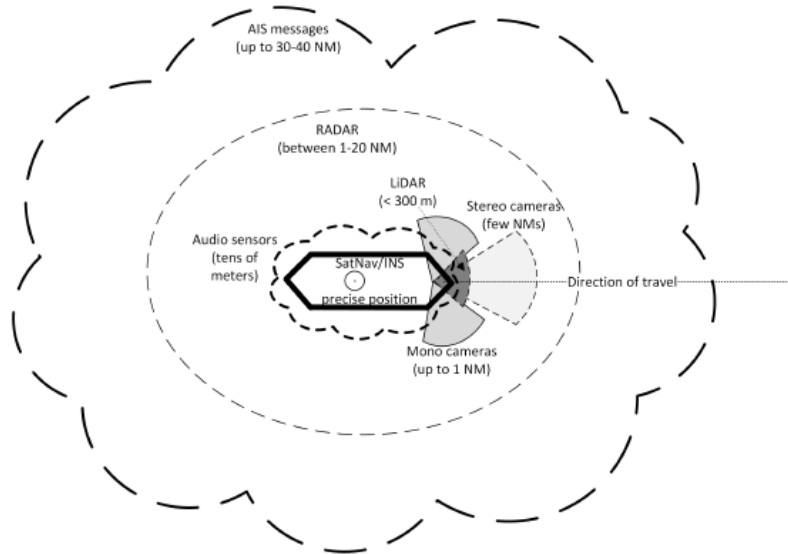
ακουστικούς αισθητήρες (όπως μικρόφωνα) και συστήματα προσδιορισμού θέσης, που περιλαμβάνουν τη δορυφορική πλοήγηση και το σύστημα αδρανειακής πλοήγησης (Inertial Navigation System ή INS). Παράλληλα, δεδομένα από το αυτόματο σύστημα αναγνωρίσεως (AIS) μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πληροφορίες που αντλούνται από εξωτερικές βάσεις δεδομένων.

Οι προηγμένες τεχνολογίες AI εστιάζουν κυρίως στην επεξεργασία δεδομένων εικόνας και ήχου που προκύπτουν από τους διάφορους αισθητήρες με σκοπό την ανίχνευση και την αναγνώριση αντικειμένων και χαρακτηριστικών. Θεωρητικά, υπάρχουν και άλλοι αισθητήρες που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στο μέλλον για τη βελτίωση της λειτουργικότητας, όπως οι αισθητήρες βάθους, το τρισδιάστατο σόναρ (Sound Navigation and Ranging ή SONAR), το σύστημα αυτόματης εξαρτημένης παρακολούθησης-μετάδοσης (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast ή ADS-B) και ο μετρητής ορατότητας.

Ένα υποδειγματικό σχέδιο αξιοποίησης αυτών των αισθητήρων παρουσιάζεται στην Εικόνα 10 και αφορά αυτόνομα πλοία με μήκος άνω των 12 μέτρων, αν και η ίδια προσέγγιση μπορεί να προσαρμοστεί κι σε άλλα μεγέθη/είδη πλοίων. Αρχικά, ο συνδυασμός GNSS/INS εξασφαλίζει τη θέση του πλοίου. Αναφορικά με τη λειτουργία των αισθητήρων, η ανίχνευση γίνεται σε δύο διακριτές ζώνες. Στη ζώνη μακρινής εμβέλειας, που καλύπτει αποστάσεις άνω του 1 ναυτικού μιλίου, αξιοποιούνται αισθητήρες όπως το AIS, το RADAR και οι στερεοφωνικές κάμερες (σε κατάλληλες καιρικές συνθήκες). Αντίστοιχα, στη ζώνη κοντινής εμβέλειας, που εκτείνεται κάτω από 1 ναυτικό μίλι, χρησιμοποιούνται το LiDAR, οι κάμερες και τα μικρόφωνα. Οι κάμερες μπορούν να υποστηρίξουν και τις δύο ζώνες, προσφέροντας ευελιξία.

Η στρατηγική αυτή αναπτύσσεται σε δύο φάσεις. Αρχικά, τα αντικείμενα ανιχνεύονται από το συμβατικό RADAR του πλοίου και μπορούν να επιβεβαιωθούν και να χαρακτηριστούν από τις κάμερες και το AIS, με δυνατότητα υπολογισμού της θέσης, της ταχύτητας και της κατεύθυνσής τους, καθώς οι στερεοφωνικές κάμερες επιτρέπουν κι τον υπολογισμό αποστάσεων. Σε

μικρότερες αποστάσεις, το LiDAR λειτουργεί συνδυαστικά με τις κάμερες, τους αισθητήρες ήχου και το AIS για μεγαλύτερη ακρίβεια (Thombre et al., 2022).



Εικόνα 10: Προτεινόμενη στρατηγική χρήσης των αισθητήρων και το εύρος λειτουργίας τους (Thombre et al., 2022).

3.5.2 Αισθητήρες για ακριβή προσδιορισμό θέσης

Το Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης (GNSS) αποτελεί τον κύριο μηχανισμό εντοπισμού θέσης και χρονισμού στη ναυσιπλοΐα. Αυτή τη στιγμή, λειτουργούν τέσσερα κύρια συστήματα GNSS: το αμερικανικό GPS, το ευρωπαϊκό Galileo, το ρωσικό GLONASS και το κινεζικό BeiDou. Κάθε ένα από αυτά εκπέμπει πολλαπλά σήματα σε διάφορες συχνότητες, ενώ η ακρίβεια των δεδομένων βελτιώνεται μέσω συστημάτων υποβοήθησης και προηγμένων τεχνικών, οι οποίες μειώνουν τα σφάλματα και ενισχύουν την αξιοπιστία των δεδομένων θέσης, πλοήγησης και χρονισμού. Οι εμπορικά διαθέσιμοι δέκτες GNSS ποικίλλουν ως προς τις δυνατότητές τους ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4, ο οποίος περιλαμβάνει παραδείγματα δεκτών που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία. Οι δέκτες αυτοί πρέπει να είναι σχεδιασμένοι ώστε να λειτουργούν αξιόπιστα ακόμα και σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες

(Thombre et al., 2022). Συνήθως, η κεραία και ο δέκτης εγκαθίστανται σε θέσεις με άμεση οπτική επαφή με τον ουρανό. Ορισμένοι δέκτες μπορούν να υποστηρίξουν δύο κεραίες, προκειμένου να εξασφαλίζουν τον ακριβέστερο προσδιορισμό κατεύθυνσης. Για την ακριβή μέτρηση παραμέτρων, όπως η κλίση και η περιστροφή, ενσωματώνεται συχνά μια μονάδα αδρανειακής μέτρησης (Inertial Measurement Unit ή IMU) στους δέκτες GNSS, ενισχύοντας έτσι την ακρίβεια του εντοπισμού θέσης (ComNav, 2020).

Η σύνδεση των δεδομένων του συστήματος PVT με τις υπολογιστικές μονάδες του πλοίου πραγματοποιείται μέσω προτύπων, όπως το NMEA 0183 και το διάδοχό του NMEA 2000, που έχουν αναπτυχθεί από τη National Marine Electronics Association (National Marine Electronics Association, 2020). Οι περισσότεροι ναυτιλιακοί δέκτες υποστηρίζουν και τα δύο αυτά πρότυπα, διασφαλίζοντας ευρεία διαλειτουργικότητα (Thombre et al., 2022).

Receiver	Market Segment	Supplementary	GPS and SBAS	Multi-constellation	Galileo Support	Multi-frequency	RTK
SANAV VP-302/VP-302T	Maritime	-	YES	-	-	-	-
Hemisphere Vector V102 GPS Compass	Maritime	IMU	YES	-	-	-	-
Hemisphere Vector V102 GPS Compass	Maritime	IMU	YES	-	-	-	-
Cobham Sailor 6560 and Sailor 6570	Maritime	-	YES	YES	-	-	-
SANAV GM-88U	Maritime	-	YES	-	-	-	-
SANAV GR-2000	Maritime	Electronic compass	YES	-	-	-	-
ComNav G1 Satellite Compass	Maritime	IMU	YES	YES	-	-	-
ComNav G2 and G2B Satellite Compass	Maritime	IMU	YES	YES	-	-	-
Lars Thrane LT-300 GNSS	Maritime	-	YES	YES	-	-	-
Lars Thrane LT-1000 NRU	Maritime	IMU	YES	YES	-	-	-
DIGITAL YACHT GPS 150	Maritime	-	YES	YES	YES	-	-
Promarine proGPS 2000	Maritime	-	YES	YES	YES	-	-
Promarine proGPS 2001	Maritime	-	YES	YES	YES	-	-
Hemisphere V123 and V133	Maritime	IMU	YES	YES	YES	-	-
Hemisphere Vector V320 GNSS Compass	Maritime	IMU	YES	YES	-	YES	YES
Hemisphere Vector VS330 GNSS Compass	Multipurpose	IMU	YES	YES	YES	YES	YES
Advanced Navigation GNSS Compass	Marine surveying	IMU	YES	YES	YES	Option	Option
Hemisphere R330	Multipurpose	-	YES	YES	YES	YES	YES
Septentrio AsteRx-U MARINE	Marine survey and construction	-	YES	YES	YES	YES	YES
Trimble Marine BX992	Multipurpose	IMU	YES	YES	YES	YES	YES

Πίνακας 4: Οι εμπορικά διαθέσιμοι δέκτες GNSS με εφαρμογή στη ναυτιλία (Thombre et al., 2022).

Η ανάλυση των χαρακτηριστικών που παρουσιάζονται στον Πίνακας 4 καταδεικνύει τη διαρκή βελτίωση των δεκτών GNSS, οι οποίοι υποστηρίζουν πλέον πολλαπλά δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, συχνότητες και τεχνικές ακριβούς προσδιορισμού θέσης. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι απαραίτητα,

δεδομένου ότι οι μελλοντικές απαιτήσεις για ακρίβεια θέσης και ανθεκτικότητας στις παρεμβολές αναμένονται να γίνουν πιο αυστηρές στα αυτόνομα πλοία. Για παράδειγμα, η χρήση της τεχνολογίας Real-Time Kinematic (RTK) αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο κατά την προσέγγιση λιμένων, καθώς επιτρέπει την επίτευξη υψηλής ακρίβειας στον εντοπισμό της θέσης ενός πλοίου. Η δυνατότητα παρακολούθησης πολλαπλών σημάτων από κάθε δορυφόρο βελτιώνει τόσο την ακρίβεια του προσδιορισμού θέσης όσο και την ανθεκτικότητα στις παρεμβολές. Η τεχνολογία RTK, ειδικότερα, μπορεί να παρέχει ακρίβεια επιπέδου εκατοστού, αξιοποιώντας διορθώσεις από συνεχούς λειτουργίας δίκτυα σταθμών αναφοράς (Continuously Operated Reference Station ή CORS) (Thombre et al., 2022).

3.5.3 RADAR και LiDAR

Το RADAR (Radio Detection and Ranging) και το LiDAR (Light Detection and Ranging) είναι τεχνολογίες μέτρησης αποστάσεων και χρησιμοποιούν διαφορετικά μέσα για την αποστολή και ανίχνευση σημάτων. Το RADAR αξιοποιεί ραδιοκύματα, ενώ το LiDAR βασίζεται στο ορατό ή υπέρυθρο φως. Οι συσκευές αυτές λειτουργούν με έναν πομπό που εκπέμπει σήματα και έναν δέκτη που ανιχνεύει τα ανακλώμενα από τις επιφάνειες των στόχων σήματα. Η ένταση του ανακλώμενου σήματος εξαρτάται από παράγοντες, όπως το μέγεθος και η ανακλαστικότητα του στόχου.

Μία από τις βασικές διαφορές μεταξύ RADAR και LiDAR είναι η διάχυση του σήματος στον χώρο. Το RADAR έχει ευρύτερες δέσμες σήματος, περιορίζοντας την ικανότητα διάκρισης μικρών λεπτομερειών του στόχου. Αντιθέτως, τα σύγχρονα LiDAR χρησιμοποιούν λέιζερ με εξαιρετικά στενές δέσμες, επιτρέποντας την απεικόνιση πιο λεπτομερούς μοντέλου του στόχου, ακόμα και από μεγάλες αποστάσεις. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, το LiDAR είναι ευαίσθητο στις καιρικές συνθήκες, καθώς η απόδοσή του επηρεάζεται από φαινόμενα, όπως π.χ. η βροχή. Από την άλλη, τα ραδιοκύματα του RADAR μπορούν να διαπεράσουν την ομίχλη, τον καπνό και τα σύννεφα, καθιστώντας το RADAR πιο αξιόπιστο για χρήση στη ναυτιλία (Thombre et al., 2022).

Στη ναυτιλία, η χρήση του RADAR είναι υποχρεωτική για πλοία ολικής χωρητικότητας άνω των 300 τόνων, ενώ ένα δεύτερο RADAR (συνήθως ζώνης S) απαιτείται για πλοία με ολική χωρητικότητα άνω των 3000 τόνων. Οι ζώνες X και S έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά: η ζώνη X είναι κατάλληλη για μεγαλύτερη ακρίβεια ανίχνευσης κοντινών στόχων, ενώ η ζώνη S υπερέχει σε μεγαλύτερες αποστάσεις και σε αντίξοες καιρικές συνθήκες. Στον Πίνακα 5 συνοψίζονται οι βασικές διαφορές μεταξύ των RADAR ζώνης S και X (International Maritime Organization, 1974).

Η ελάχιστη τυπική εμβέλεια του RADAR εξαρτάται από το ύψος μεταξύ του RADAR και του στόχου. Για μεγαλύτερα πλοία, στα οποία τα RADAR συνήθως τοποθετούνται στην κορυφή του πλοίου, η ελάχιστη εμβέλεια μπορεί να είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα. Η μέγιστη εμβέλεια ανίχνευσης για έναν δεδομένο στόχο επηρεάζεται από την ευαισθησία του δέκτη, την ισχύ του πομπού για την περίπτωση των RADAR συνεχούς κύματος ή την εκπεμπόμενη ενέργεια παλμού για την περίπτωση παλμικού RADAR. Σε πολλές περιπτώσεις, η εμβέλεια του RADAR μπορεί να υπερβαίνει τον ορατό ορίζοντα, φτάνοντας τα 10 ναυτικά μίλια ή περισσότερο, λόγω της διάθλασης των ραδιοκυμάτων στην ατμόσφαιρα.

	S-Band	X-Band
Frequency:	3 GHz (2.9-3.0 GHz)	9 GHz (8.85-9.0 & 9.2-9.5 GHz)
Beamwidth (-3dB):		
Horizontal	1-4 degrees	0.75-2.3 degrees
Vertical	24.0-30.0	20.0-26.0
Typ. peak power:	30 - 75 kW	5 - 50 kW
Pulse repetition rate:	400 - 4000	400 - 4000
Ant. rotation rate:	20-60 RPM	20-60 RPM
General features:	Long range detection Penetrates precipitation and weather effects better Larger antenna	Higher directivity Higher attenuation in precipitation Smaller antenna

Πίνακας 5: Τα βασικά χαρακτηριστικά των RADAR ζώνης S και X (International Maritime Organization, 1974; Thombre et al., 2022).

Παρότι η τεχνολογία RADAR έχει διατηρήσει τη βασική της μορφή για δεκαετίες και θεωρείται αξιόπιστη, παρατηρείται τελευταία αυξανόμενη χρήση πομπών στερεάς κατάστασης. Αυτά τα συστήματα ξεπερνούν προβλήματα αξιοπιστίας, επιτρέποντας νέες και πιο ευέλικτες μεθόδους επεξεργασίας σήματος και ανίχνευσης στόχων. Επιπρόσθετα, οι πομποί στερεάς κατάστασης θεωρούνται πιο σταθεροί με λιγότερο εσωτερικό θόρυβο, επιτρέποντας αυξημένη ευαισθησία. Νέες τεχνολογίες, όπως οι κεραίες συστοιχίας φάσης, επιτρέπουν ηλεκτρονική σάρωση και κατεύθυνση της δέσμης. Παρόλο που αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία και ευαισθησία, δεν είναι σαφές αν το όφελος στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας αντισταθμίζει το σημαντικά υψηλότερο κόστος και την πολυπλοκότητά τους (Thombre et al., 2022).

Η χρήση του LiDAR στη ναυτιλία περιορίζεται λόγω ζητημάτων όπως η ασφάλεια για τα μάτια, που καθιστά αναγκαίο τον περιορισμό της ισχύος του λέιζερ. Τα περισσότερα LiDAR χαμηλού κόστους, σχεδιασμένα κυρίως για την αυτοκινητοβιομηχανία, έχουν περιορισμένη εμβέλεια (έως 200 μέτρα για στόχους με ανακλαστικότητα 80%), καθιστώντας τα ακατάλληλα για μεγάλα πλοία. Η εμβέλεια αυτών των συσκευών είναι περιορισμένη, επομένως μικρότεροι στόχοι μπορεί να περάσουν απαρατήρητοι όταν βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη απόσταση. Τα LiDAR με μεγαλύτερη εμβέλεια, τα οποία μπορούν να μετρήσουν αποστάσεις αρκετών χιλιομέτρων, χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως γεωλογικές έρευνες, αλλά είναι ακριβότερα. Ως εκ τούτου, η σύγχρονη έρευνα για τα LiDAR επικεντρώνεται στη βελτίωση της ευαισθησίας των φωτοαισθητήρων και στη μείωση του θορύβου (Thombre et al., 2022), ενώ τεχνολογίες όπως οι αισθητήρες ενός φωτονίου υπόσχονται μεγαλύτερη απόδοση (Kostamonaara et al., 2015).

Συνολικά, το RADAR παραμένει αναντικατάστατο για τη ναυτιλία, ενώ το LiDAR, αν και πολλά υποσχόμενο, συνεχίζει να εξελίσσεται για να καλύψει τις ιδιαίτερες απαιτήσεις των θαλάσσιων εφαρμογών.

Όταν εξετάζουμε τη χρήση των LiDAR στη ναυτιλία, το μοτίβο σάρωσης και το οπτικό πεδίο (Field-of-View ή FOV) έχουν ιδιαίτερη σημασία. Λόγω του υψηλού κόστους υλοποίησης, οι νεότερες εκδόσεις LiDAR υιοθετούν διαφορετικές τεχνικές

σάρωσης, οι οποίες συνήθως περιορίζονται σε μικρότερα FOVs, καθώς η πλήρης κάλυψη 360 μοιρών είναι μια απαιτητική πρόκληση. Για μικρότερα πλοία, το μοτίβο σάρωσης 360 μοιρών είναι συνήθως επαρκές, καθώς το LiDAR μπορεί να τοποθετηθεί στην κορυφή του πλοίου, εξασφαλίζοντας ότι δεν υπάρχουν σημαντικά τυφλά σημεία γύρω από το πλοίο. Αντίθετα, για μεγαλύτερα πλοία, τα τυφλά σημεία μπορεί να είναι πιο εκτεταμένα, απαιτώντας τη χρήση πολλών LiDAR σε διάφορες θέσεις γύρω από το πλοίο για να επιτευχθεί πλήρης κάλυψη και λεπτομερής έλεγχος.

Είναι προφανές ότι τα φθηνά εμπορικά διαθέσιμα LiDAR δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογή σε αυτόνομα πλοία, καθώς δεν πληρούν τις αυστηρές απαιτήσεις. Από την άλλη, τα υπόλοιπα LiDAR είναι απαγορευτικά ακριβά και συνήθως δεν είναι σχεδιασμένα για δύσκολες συνθήκες, όπως τα ακραία καιρικά φαινόμενα. Επίσης, τα LiDAR μεγάλης εμβέλειας συχνά εκπέμπουν λέιζερ που ξεπερνούν τα ασφαλή όρια για τα μάτια, γεγονός που καθιστά τη χρήση τους αμφιλεγόμενη. Παρ' όλα αυτά, είναι πιθανό ότι οι μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις στα LiDAR θα βελτιώσουν την εμβέλεια και την ανάλυση των συστημάτων (Thombre et al., 2022).

3.5.4 Οπτικοί Αισθητήρες

Οι οπτικοί αισθητήρες αναφέρονται σε συσκευές που καταγράφουν τουλάχιστον μια δισδιάστατη εικόνα, παρόμοια με αυτή που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι. Αυτές περιλαμβάνουν ψηφιακές κάμερες που διαθέτουν αισθητήρες με φίλτρο RGB, καθώς και μονόχρωμες και υπέρυθρες κάμερες. Οι ψηφιακές κάμερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προσδιορισμό θέσης, μέτρηση αποστάσεων και ανίχνευση ή ταξινόμηση αντικειμένων, λειτουργίες που είναι απαραίτητες για τα αυτόνομα πλοία. Ωστόσο, στη θάλασσα δεν υπάρχουν σταθερά σημεία αναφοράς που θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει η κάμερα για τον προσδιορισμό της θέσης. Η φωτογραμμετρία, μία μέθοδος απόκτησης μετρητικών δεδομένων μέσω επαναλαμβανόμενης λήψης εικόνας από διάφορες γωνίες, χρησιμοποιείται ευρέως στην τοπογραφία και σε άλλες βιομηχανίες (Förstner &

Wrobel, 2016). Η απόσταση δειγματοληψίας εδάφους, δηλαδή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών pixel πάνω στην επιφάνεια του στόχου, είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την επίτευξη ικανοποιητικής εμβέλειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση αυτή, τόσο μειώνεται η χωρική ανάλυση της εικόνας και λιγότερες λεπτομέρειες είναι ορατές, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων και ταξινόμησης αντικειμένων.

Σχετικά με την μέτρηση αποστάσεων με στέρεο-κάμερα, μια στέρεο-κάμερα αποτελείται από ένα ζεύγος φωτογραφικών μηχανών που τραβούν εικόνες ταυτόχρονα και είναι σταθερά συνδεδεμένες, με τη θέση τους να είναι γνωστή. Σύμφωνα με την έρευνα των Wang et al. (2015), η ανίχνευση αντικειμένων σε θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί να επιτευχθεί σε απόσταση 500 μέτρων, ενώ με τη χρήση κατάλληλων φακών και μεθοδολογίας είναι πιθανό να επιτευχθούν και μεγαλύτερες αποστάσεις.

Επιπρόσθετα, αναφορικά με τις μονόχρωμες και έγχρωμες κάμερες, αυτές έχουν διαφορετικά πλεονεκτήματα και περιορισμούς, και η επιλογή τους εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή τους. Οι έγχρωμες κάμερες χρησιμοποιούν έγχρωμα φίλτρα και φίλτρα κοπής υπέρυθρων για τη λήψη έγχρωμων εικόνων, ωστόσο αυτό περιορίζει την ποσότητα φωτονίων και τα μήκη κύματος που φτάνουν στον αισθητήρα και μειώνει την απόδοση σε χαμηλό φωτισμό. Αυτό καθιστά τις μονόχρωμες κάμερες πιο αποτελεσματικές σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Συνεπώς, υπό ιδανικές θαλάσσιες συνθήκες, οι έγχρωμες κάμερες είναι καταλληλότερες για ανίχνευση και ταξινόμηση αντικειμένων, ενώ υπό μη ιδανικές συνθήκες, οι μονόχρωμες κάμερες μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές. Στην πράξη, οι δύο τύποι καμερών μπορούν να θεωρηθούν συμπληρωματικοί, και πολλά συστήματα αισθητήρων χρησιμοποιούν και τους δύο τύπους για καλύτερη κάλυψη. Οι βασικοί περιορισμοί των καμερών που διαθέτουν αισθητήρες με φίλτρο RGB και των μονόχρωμων καμερών είναι ότι εξαρτώνται από την καλή ορατότητα και επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από φαινόμενα που επηρεάζουν την ορατότητα, όπως π.χ. βροχή, ομίχλη και σκοτάδι. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα πλοία χρησιμοποιούν τα φώτα τους κατά τη διάρκεια της νύχτας, κάτι το οποίο προφανώς βοηθά στη βελτίωση της ορατότητας.

Τέλος, αναφορικά με τις υπέρυθρες (IR) κάμερες, αυτές ανιχνεύουν θερμική ακτινοβολία, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για θαλάσσιες συνθήκες, καθώς τα περισσότερα αντικείμενα, όπως π.χ. πλοία και άνθρωποι, έχουν πολύ διαφορετική θερμοκρασία σε σχέση με το νερό και γι' αυτό είναι γενικά ευδιάκριτα ακόμα και τη νύχτα. Ωστόσο, οι IR κάμερες είναι πιο ακριβές και έχουν χαμηλότερη ανάλυση σε σχέση με τις κάμερες που λειτουργούν με ορατό φως, γεγονός που περιορίζει την ακρίβεια στις μετρήσεις αποστάσεων, στην ανίχνευση και ταξινόμηση αντικειμένων (Thombre et al., 2022).

3.5.5 Ακουστικοί Αισθητήρες

Τα μικρόφωνα, και ειδικότερα οι συστοιχίες μικροφώνων, έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την αναγνώριση του περιβάλλοντος χώρου. Διαφορετικοί τύποι πλοίων μπορούν να ανιχνευθούν, να ταξινομηθούν, να εντοπιστούν και να παρακολουθηθούν μέσω της ανάλυσης των ήχων που παράγουν, όπως αυτοί από τους κινητήρες (π.χ. πρόωση, εξαερισμός) και οι ήχοι από τα συστήματα συριγμού. Επιπλέον, η ανίχνευση συγκεκριμένων γεγονότων, όπως βλάβης ή πτώσης αντικειμένων/ατόμων στο νερό, μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της ανάλυσης του ήχου. Η ανάλυση ήχου σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να βελτιώνει την εικόνα μίας κατάστασης.

Η επιλογή ενός μικροφώνου κατάλληλου για θαλάσσιες εφαρμογές ή για χρήση ως μέρος μιας συστοιχίας μικροφώνων απαιτεί προσοχή. Πρώτον, το μικρόφωνο πρέπει να είναι τοποθετημένο σε εξωτερικό περιβάλλον και να αντέχει σε σκληρές καιρικές συνθήκες και άλλες δυσκολίες που σχετίζονται με τις θαλάσσιες συνθήκες, όπως άνεμος, βροχή, χιόνι, θερμοκρασιακές μεταβολές, έκθεση στον ήλιο και θαλασσινό νερό. Δεύτερον, η απόδοση του μικροφώνου πρέπει να είναι καλά ορισμένη, σταθερή και προβλέψιμη με την πάροδο του χρόνου, κάτι που είναι κρίσιμο στις συστοιχίες μικροφώνων, όπου η απόδοση όλων των μικροφώνων πρέπει να συμβαδίζει. Τρίτον, το μικρόφωνο πρέπει να είναι ικανό να ελαχιστοποιεί τις επιδράσεις των θορύβων από το περιβάλλον,

όπως ο άνεμος, η θάλασσα, η βροχή και οι ήχοι που προκαλούνται από το ίδιο το πλοίο.

Με την πάροδο του χρόνου, έχουν αναπτυχθεί πιο σταθερά για σκληρές καιρικές συνθήκες μικρόφωνα, καθώς και συστήματα προστασίας από τον άνεμο και το νερό, όπως πλέγματα, αφροί και αντιανέμια. Παρόλο που αυτές οι προστασίες βελτιώνουν την ανθεκτικότητα των μικροφώνων, δεν εξαλείφουν πλήρως τις επιπτώσεις των περιβαλλοντικών παραγόντων. Ο θόρυβος από τον άνεμο, λόγω της αλληλεπίδρασης του με τα στοιχεία που περιβάλλουν το μικρόφωνο και το ίδιο το μικρόφωνο, είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς μπορεί να επηρεάσει τη δυνατότητα εξαγωγής χρήσιμων πληροφοριών από την ανάλυση του ήχου (Thombre et al., 2022; Eldwaik & Li, 2018; Ma, Smith & Milner, 2003).

3.5.6 Δέκτες AIS

Το αυτόματο σύστημα αναγνώρισης (AIS) χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή ψηφιακών σημάτων στη συχνότητα των υπερβραχέων κυμάτων (Very High Frequency ή VHF) και για τη μετάδοση της τοποθεσίας των πλοίων, των σταθερών και πλωτών βοηθημάτων πλοήγησης (Aids to Navigation ή AtoN), καθώς και άλλων κατασκευών στη θάλασσα, όπως πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου και θαλάσσια αιολικά πάρκα (Orolia Maritime, 2020). Ένα πλοίο εξοπλισμένο με δέκτη AIS μπορεί να εντοπίσει αυτά τα αντικείμενα στη γύρω περιοχή του, ανεξαρτήτως των συνθηκών ορατότητας ή του αν το κοντινό πλοίο προσεγγίζει από σημείο εκτός του οπτικού πεδίου (Norris, 2008). Εκτός από την τοποθεσία, τα σήματα AIS μπορούν να περιέχουν και άλλες πληροφορίες, σχετιζόμενες με το πλοίο και το ταξίδι του. Επιπλέον, τα περισσότερα εμπορικά πλοία διαθέτουν πομποδέκτη, ικανό για μετάδοση και λήψη σημάτων AIS (Thombre et al., 2022).

3.5.7 Δημόσια ναυτιλιακά σύνολα δεδομένων

Τα δεδομένα που είναι ήδη καταγεγραμμένα και προσβάσιμα μέσω διαδικτύου μπορούν να αξιοποιηθούν για την εκπαίδευση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, καθώς και ως συμπληρωματικές πληροφορίες για την επαλήθευση σε πραγματικό χρόνο της αξιοπιστίας του εγκατεστημένου συστήματος αισθητήρων. Για παράδειγμα, η θέση ενός βοηθήματος πλοήγησης που εντοπίζεται κατά τον πλου μπορεί να επαληθευτεί συγκρίνοντάς την με δεδομένα του μητρώου βοηθημάτων πλοήγησης, εφόσον αυτά είναι διαθέσιμα και δημοσιευμένα από την αντίστοιχη αρμόδια τοπική αρχή (Thombre et al., 2022).

3.6 Εισαγωγή στις τεχνολογίες AI για αυτόνομα πλοία

Ο κύριος στόχος αυτής της ενότητας είναι να αναδείξει τις πιο πρόσφατες τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης που σχετίζονται με την ανάπτυξη αυτόνομων πλοίων. Οι τεχνολογίες αυτές διακρίνονται βάσει του πεδίου εφαρμογής τους, των απαιτήσεων σε δεδομένα, της υπολογιστικής τους πολυπλοκότητας (π.χ. σε πραγματικό χρόνο ή όχι), καθώς και της ανθεκτικότητάς τους σε διαφορετικές συνθήκες. Στο πλαίσιο αυτό, η έννοια της τεχνητής νοημοσύνης επικεντρώνεται κυρίως σε τεχνικές μηχανικής μάθησης που επιλύουν προβλήματα παλινδρόμησης ή ταξινόμησης. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών είναι η βαθιά μάθηση (Deep Learning ή DL) και οι γκαουσιανές διαδικασίες (Gaussian Processes ή GPs), οι οποίες έχουν ήδη εφαρμοστεί επιτυχώς στη ναυτιλία, π.χ. στην ανίχνευση και κατηγοριοποίηση των πλοίων μέσω εικόνων, καθώς και στην ανάλυση των διαδρομών τους (Thombre et al., 2022).

3.6.1 Βασικές απαιτήσεις της τεχνητής νοημοσύνης για ναυτιλιακές εφαρμογές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ασφάλεια είναι υψίστης σημασίας για τα αυτόνομα συστήματα πλοήγησης, κάτι που επιβάλλει τη λειτουργία των

αλγορίθμων σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Η έννοια της πιθανώς προσεγγιστικά σωστής υπόθεσης (Probably Approximately Correct ή PAC) υποστηρίζει ότι κάθε υπόθεση που ευθυγραμμίζεται με ένα επαρκώς μεγάλο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης είναι απίθανο να έχει σημαντικά σφάλματα (Kearns & Vazirani, 1994). Ωστόσο, για να επιτευχθεί αυτό, απαιτούνται αλγόριθμοι ικανοί να διαχειρίζονται δεδομένα μεγάλης κλίμακας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε προκλήσεις. Ένα σύνολο δεδομένων θεωρείται μεγάλης κλίμακας, είτε λόγω του μεγάλου αριθμού δεδομένων, είτε λόγω της υψηλής διαστατικότητάς τους. Η βαθιά μάθηση είναι κατάλληλη ιδιαίτερα για την ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων, εφόσον υπάρχουν διαθέσιμοι επαρκείς υπολογιστικοί πόροι. Ωστόσο, παρουσιάζει δυσκολίες όταν τα δεδομένα είναι υψηλής διαστατικότητας, καθώς η αύξηση των διαστάσεων συνεπάγεται μεγάλη αύξηση στις παραμέτρους εκπαίδευσης των μοντέλων βαθιάς μάθησης (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016). Αντιθέτως, οι γκαουσιανές διαδικασίες (GPs) είναι πιο αποδοτικές σε δεδομένα υψηλής διαστατικότητας, αλλά αντιμετωπίζουν δυσκολίες στη διαχείριση μεγάλου αριθμού δεδομένων, καθώς η υπολογιστική πολυπλοκότητα αυξάνεται κυβικά ανάλογα με τον αριθμό των εγγραφών των δεδομένων (Rasmussen & Williams, 2006; Thombre et al., 2022).

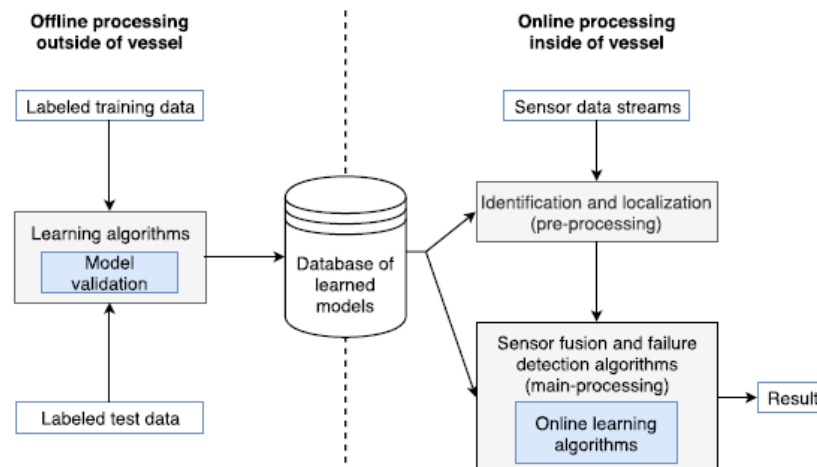
Στη ναυτιλία, το είδος των δεδομένων ποικίλλει, γεγονός που απαιτεί τη χρήση διαφορετικών μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Για παράδειγμα, δεδομένα όπως αυτά του AIS ή του GNSS χαρακτηρίζονται από χαμηλή διαστατικότητα. Με την πάροδο, όμως, του χρόνου, αυτά τα δεδομένα μπορεί να μετατραπούν σε μεγάλης κλίμακας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα μοντέλα βαθιάς μάθησης, ειδικά τα αναδρομικά νευρωνικά δίκτυα (Recurrent Neural Networks ή RNN) ενδέχεται να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την ανάλυση της τροχιάς ενός πλοίου (Mandic & Chambers, 2001).

Παράλληλα, τα ηχητικά σήματα στη ναυτιλία συχνά χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό διαστάσεων. Για παράδειγμα, ένα ηχητικό σήμα 44,1 kHz διάρκειας ενός δευτερολέπτου περιλαμβάνει 44.100 διαστάσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο Μετασχηματισμός Fourier Βραχείας Διάρκειας (Short Time Fourier Transform ή

STFT) που αποτελεί την πιο βασική μορφή ανάλυσης χρόνου-συχνότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χαρακτηρισμό των σημάτων.

Όσον αφορά στις εικόνες RGB ή RGB-D από κάμερες, αυτές παρουσιάζουν προκλήσεις τόσο ως προς τη διαστατικότητα όσο και την ποσότητα των δεδομένων. Ωστόσο, τα βαθιά συνελκτικά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional Neural Networks ή CNN) έχουν ήδη επιδείξει επιτυχία στις εφαρμογές αυτές (Thombre et al., 2022). Αν και για τις μεθόδους βαθιάς μάθησης η επίτευξη της προβλεπτικής κατανομής δεν είναι εύκολη, η μέθοδος των Γκαουσιανών Διαδικασιών (GPs) μπορεί να παρέχει πιο ακριβείς προβλέψεις (Rasmussen & Williams, 2006; Thombre et al., 2022).

Μια άλλη σημαντική παράμετρος για τους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης είναι η ικανότητά τους να υποστηρίζουν τόσο την online όσο και offline εκμάθηση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 11, η διαδικασία εκμάθησης μπορεί να χρειάζεται να γίνει σε πραγματικό χρόνο ή εκτός σύνδεσης, ανάλογα με την περίπτωση. Για παράδειγμα, ενώ η εκμάθηση ταξινόμησης αντικειμένων μπορεί να γίνει εκτός σύνδεσης, η ανίχνευση και ο εντοπισμός αντικειμένων στη θάλασσα μέσω καμερών ή μικροφώνων πρέπει να γίνεται σε πραγματικό χρόνο (Thombre et al., 2022).



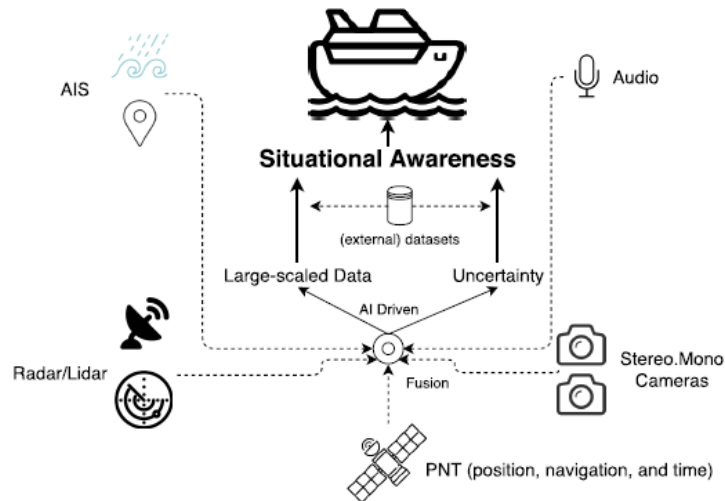
Εικόνα 11: Online και offline εκμάθηση στη μηχανική μάθηση (Thombre et al., 2022).

Οι μέθοδοι online εκμάθησης αντλούν πληροφορίες από δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Παραδείγματα αυτής της προσέγγισης περιλαμβάνουν τις μεθόδους εκτίμησης κατάστασης που βασίζονται σε Bayesian μοντέλα, καθώς και online πιθανοτικές μεθόδους μηχανικής μάθησης. Αυτές οι μέθοδοι είναι ιδανικές για τη διαχείριση δυναμικών συστημάτων και την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης. Αντίθετα, η offline εκμάθηση περιλαμβάνει μεθόδους επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης και απαιτεί προκαθορισμένα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτές οι μέθοδοι μαθαίνουν από το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης ταυτόχρονα και δεν χρησιμοποιούν νέα δεδομένα για την αναθεώρηση του μοντέλου. Οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης και οι πιθανοτικές μέθοδοι μηχανικής μάθησης είναι τυπικές μέθοδοι offline μηχανικής μάθησης. Αυτές οι τεχνικές είναι ιδανικές κατά την ανάλυση εικόνων ή ήχων και πιο συγκεκριμένα για εφαρμογές όπως στην αναγνώριση και ταξινόμηση δεδομένων.

Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου μηχανικής μάθησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το μέγεθος και η πολυπλοκότητα των δεδομένων, το επίπεδο αβεβαιότητας στις προβλέψεις και οι απαιτήσεις για online ή offline εκμάθηση (Thombre et al., 2022).

3.6.2 Τεχνητή νοημοσύνη και επίγνωση κατάστασης

Για να επιτευχθεί πλήρης επίγνωση της κατάστασης ενός πλοίου, είναι απαραίτητη η ανάλυση της ασφάλειας και της αβεβαιότητας κατά την ταυτοποίηση και τον εντοπισμό αντικειμένων. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να προκύψουν μέσα από την εφαρμογή τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και το συνδυασμό δεδομένων από πολλαπλούς αισθητήρες, όπως το AIS/GNSS, εικόνες και ηχητικά σήματα.



Εικόνα 12: Το καθοδηγούμενο από την τεχνητή νοημοσύνη σύστημα επίγνωσης κατάστασης (Thombre et al., 2022).

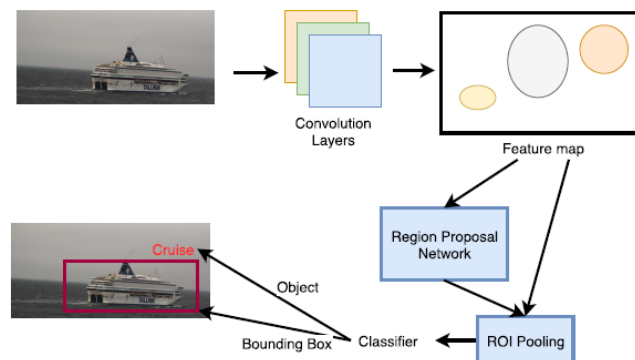
Όταν τα δεδομένα από την ανίχνευση και ταξινόμηση των αντικειμένων ευθυγραμμίζονται με τα σήματα AIS, θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί αξιόπιστη επίγνωση της κατάστασης. Αυτό αποτελεί τη βάση για την επόμενη φάση, η οποία περιλαμβάνει την παρακολούθηση των ταυτοποιημένων γειτονικών αντικειμένων και τον υπολογισμό της πιθανότητας σύγκρουσης με βάση τις εκτιμώμενες τροχιές τους. Οι τεχνολογίες AI που εφαρμόζονται στην πλοήγηση και την επίγνωση της κατάστασης ενός πλοίου επικεντρώνονται στην ταυτοποίηση αντικειμένων, τον εντοπισμό τους και την ανάλυση των τροχιών τους (Thombre et al., 2022).

3.6.3 Τεχνητή νοημοσύνη και ανίχνευση/ταξινόμηση αντικειμένων

Ο όρος «αντικείμενα» αναφέρεται σε οποιοδήποτε στοιχείο του θαλάσσιου περιβάλλοντος που μπορεί να αναγνωρισθεί, όπως πλοία, θαλασσοπούλια ή μηχανοκίνητα σκάφη. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι ο εντοπισμός και η ταξινόμηση των αντικειμένων εντός της εμβέλειας των αισθητήρων ενός πλοίου. Με την πρόοδο στις τεχνικές επεξεργασίας εικόνων, αυτές οι δραστηριότητες πραγματοποιούνται κυρίως μέσω μίας ή περισσότερων καμερών. Ωστόσο, η

ανάλυση των εικόνων παρουσιάζει προκλήσεις λόγω της υψηλής διαστατικότητας των δεδομένων που αυτές παράγουν (Thombre et al., 2022).

Η χρήση των παραδοσιακών συνελκτικών νευρωνικών δικτύων (CNNs) σε αυτές τις περιπτώσεις είναι περιορισμένη, καθώς αυτά είναι σχεδιασμένα κυρίως για την ταξινόμηση εικόνων και όχι για την ανίχνευση ή την ταξινόμηση πολλαπλών αντικειμένων εντός μίας εικόνας. Μια τυπική προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση ενός μικρού συρόμενου παραθύρου που εξετάζει επαναλαμβανόμενα κάθε τμήμα της εικόνας. Αυτή η μέθοδος, όμως, απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους, ενώ το μέγεθος του συρόμενου παραθύρου πρέπει να καθοριστεί προκαταβολικά, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό, επειδή το μέγεθος των αντικειμένων σε μια εικόνα ποικίλλει ανάλογα με την απόστασή τους. Μια πιθανή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση του δικτύου πρότασης περιοχής (Region Proposal Network ή RPN) (Thombre et al., 2022).



Εικόνα 13: Γενικό πλαίσιο για την ανίχνευση πλοίων με χρήση RPNs (Thombre et al., 2022).

Η κύρια διαφορά ενός RPN από τα κλασικά CNNs είναι το πρόσθετο στρώμα προτάσεων περιοχών (region proposal layer), το οποίο εντοπίζει πιθανές περιοχές ενδιαφέροντος μέσα στην εικόνα. Αυτό μειώνει δραστικά την περιοχή αναζήτησης για αντικείμενα, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικό για αντικείμενα μικρών διαστάσεων, όπως μία μικρή βάρκα που καταλαμβάνει λίγα μόνο pixels.

Στον παρακάτω Πίνακας 6 παρατίθεται μια λίστα πρόσφατων μελετών που αφορούν στη χρήση διαφορετικών αισθητήρων για τους σκοπούς της ανίχνευσης και ταξινόμησης αντικειμένων (Thombre et al., 2022).

Sensors	Method(s)	Contribution
RGB camera	Deep learning, RPNs	Ship detection and classification
RGB camera	RPNs and Bayesian modelling	Ship detection and classification
RGB camera	CNNs and transfer learning	Ship detection and classification
RGB camera	RPNs and data augmentation	Ship detection and classification
RGB and infrared cameras	CNNs	Ship detection and classification
LiDAR	FCNs	Vehicle detection and classification
LiDAR	VoxelNet	Ship detection and classification
Generic depth sensors	Deep learning	Generic framework of detecting objects from (3D) depth data
RGB camera, LiDAR	Gaussian process	Ship detection, classification, and segmentation
RGB camera	Multi-view	Ship detection and tracking
RGB camera	YOLO	Ship detection and tracking
RGB camera and AIS	Sensor fusion	Ship detection
RGB and infrared camera		Review of ship detection and tracking using electro-optical videos

Πίνακας 6: Μελέτες που σχετίζονται με τη χρήση διαφορετικών αισθητήρων για την ανίχνευση και ταξινόμηση αντικειμένων (Thombre et al., 2022).

Επιπλέον, συμπληρωματικά των παραπάνω, ο εντοπισμός των αντικειμένων μπορεί να ενισχυθεί με την αξιοποίηση ηχητικών δεδομένων. Αυτή η μέθοδος απαιτεί κατάλληλο εξοπλισμό, διατάξεις και αλγόριθμους, αφού βέβαια έχουν εξαλειφθεί πρώτα οι θόρυβοι στο παρασκήνιο. Ένας σύγχρονος τρόπος εντοπισμού ήχων βασίζεται στη συνάρτηση μεταφοράς σχετιζόμενη με την κεφαλή

(Head-Related Transfer Function ή HRTF), η οποία μιμείται τον τρόπο με τον οποίο τα ανθρώπινα αυτιά αντιλαμβάνονται τους ήχους (Thombre et al., 2022).

3.6.4 Δημιουργία διαδρομών με χρήση δεδομένων AIS

Ο έλεγχος τήρησης διαδρομής (path-following control) έχει ως βασικό στόχο την ακριβή τήρηση μιας προκαθορισμένης πορείας, διασφαλίζοντας την ελάχιστη δυνατή απόκλιση από αυτή. Η συγκεκριμένη διαδρομή προσδιορίζεται από μία σειρά σημείων αναφοράς, τα οποία μπορούν να συνδεθούν είτε μέσω ευθειών γραμμών είτε με καμπύλες.

Η ανάλυση των βασικών διαδρομών γίνεται συνήθως μέσω στατιστικής επεξεργασίας των τροχιών των πλοίων, με τις περισσότερες από αυτές να παρουσιάζουν επαναλαμβανόμενα μοτίβα με μικρές παραλλαγές. Οι τροχιές που συλλέγονται από δεδομένα AIS (Automatic Identification System) ποικίλλουν σε μήκος και αριθμό σημείων, καθώς επηρεάζονται από τις μεταβολές στην ταχύτητα των πλοίων κατά την πορεία τους.

Για την αντιμετώπιση αυτών των διαφορών, εφαρμόζεται η τεχνική της δυναμικής χρονικής στρέβλωσης (Dynamic Time Warping ή DTW). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος DTW, ο οποίος αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1960, έχει βρει ευρεία εφαρμογή στην πλοήγηση των πλοίων, ειδικά σε περιπτώσεις όπως η αναγνώριση μοτίβων, η πρόβλεψη πορείας και η βελτιστοποίηση τροχιών. Ο αλγόριθμος DTW χρησιμοποιείται ευρέως για τη μέτρηση της ομοιότητας μεταξύ δύο χρονοσειρών που μπορεί να διαφέρουν σε διάρκεια και ταχύτητα. Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή του αλγορίθμου DTW διευκολύνει τη σύγκριση τροχιών που διαφέρουν σε διάρκεια και ταχύτητα, υπολογίζοντας τη βέλτιστη αντιστοίχιση μεταξύ τους. Αυτό διασφαλίζει την ακρίβεια και συνέπεια, ακόμη και όταν παρατηρούνται αλλαγές, όπως επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις.

Συγκεκριμένα, για δύο χρονοσειρές $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$ μήκους N και $Y=(y_1, y_2, y_3, \dots, y_M)$ μήκους M , ο αλγόριθμος DTW υπολογίζει ένα warping path, δηλαδή μια ακολουθία $\gamma=(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_L)$, όπου κάθε $\gamma_l=(n_l, m_l) \in [1:N] \times [1:M]$ και $l \in [1:L]$ και ικανοποιεί τις εξής συνθήκες:

- 1) Boundary condition: Η ακολουθία ξεκινά από το $\gamma_1 = (1,1)$ και καταλήγει στο $\gamma_L = (N,M)$.
- 2) Monotonicity condition: Για τα $n_1, n_2, \dots, n_L$ και $m_1, m_2, \dots, m_L$ ισχύει ότι $n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_L$ και $m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_L$.
- 3) Step size condition: Η διαφορά $\gamma_{l+1} - \gamma_l \in \{(1,0), (0,1), (1,1)\}$ για $l \in [1:L]$, διασφαλίζοντας τη συνέχεια.

Για τη δημιουργία του warping path, κάθε στοιχείο x_{nl} της χρονοσειράς X αντιστοιχίζεται σε ένα y_{ml} της χρονοσειράς Y . Η πρώτη συνθήκη εξασφαλίζει τη σύνδεση των πρώτων και τελευταίων στοιχείων των χρονοσειρών X και Y . Αξίζει να αναφερθεί ότι όλα τα στοιχεία στις δύο χρονοσειρές συνδέονται με κάποιο της άλλης χρονοσειράς, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στην επανειλημμένη χρήση ενός στοιχείου από μια χρονοσειρά. Όμως, όπως φαίνεται στη δεύτερη συνθήκη, η ταυτόχρονη επανειλημμένη χρήση ίδιων στοιχείων και από τις δύο χρονοσειρές απαγορεύεται. Τα ζεύγη πρέπει να αυξάνονται μονότονα. Η τελευταία συνθήκη διασφαλίζει ότι κανένα στοιχείο από τις δύο χρονοσειρές X και Y δεν παραλείπεται, ενώ οι συνδυασμοί παραμένουν μοναδικοί (Xu, Rong & Guedes Soares, 2019).



Εικόνα 14: Η εφαρμογή του αλγορίθμου DTW στην πλοήγηση των πλοίων (Xu, Rong & Guedes Soares, 2019).

3.6.5 Τεχνητή νοημοσύνη και ανάλυση της τροχιάς των πλοίων

Η αυτοματοποίηση της ναυσιπλοΐας στοχεύει στη βελτίωση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Παραδείγματος χάρη, πριν την αναχώρηση του πλοίου, σχεδιάζεται μια προκαθορισμένη πορεία, στην οποία ενσωματώνονται τεχνικές βελτιστοποίησης διαδρομών με βάση τις αναμενόμενες καιρικές συνθήκες. Κατά την πλεύση, η διαδρομή μπορεί να αναθεωρηθεί, εάν διαπιστωθεί ότι μπορούν να επιτευχθούν καλύτερα επίπεδα ασφάλειας ή αποδοτικότητας.

Δύο από τις βασικότερες πηγές δεδομένων για την παρακολούθηση της πορείας του πλοίου είναι ο πομποδέκτης AIS και ο δέκτης GNSS του πλοίου. Ο δέκτης GNSS παρέχει τη γεωγραφική θέση του πλοίου, ενώ το AIS μεταδίδει αυτή την πληροφορία σε άλλα πλοία και παράλληλα λαμβάνει δεδομένα για τις θέσεις των γειτονικών πλοίων (Thombre et al., 2022).

Όσον αφορά στη λειτουργία των αυτόνομων πλοίων, είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν ζητήματα που προκύπτουν από τη χρήση τέτοιων συστημάτων. Για παράδειγμα, οι κολυμβητές ή άλλα σκάφη που βρίσκονται κοντά στο αυτόνομο πλοίο θα πρέπει να κατανοούν τις προθέσεις του εγκαίρως. Παράλληλα, οι χειριστές που παρακολουθούν από την ξηρά την πορεία του πλοίου πρέπει να έχουν επαρκή επίγνωση της κατάστασης του πλοίου και να μπορούν να προβλέπουν τη συμπεριφορά του, ώστε να μπορούν να παρέμβουν άμεσα σε περίπτωση ανάγκης. Αυτό απαιτεί την παροχή δεδομένων στο χειριστή, όπως η τρέχουσα πορεία, η πρόβλεψη της κίνησης των άλλων σκαφών και η κατάσταση των κρίσιμων συστημάτων του πλοίου. Η μελέτη της ασφάλειας και ο καθορισμός του επιπέδου απομακρυσμένου ελέγχου ή παρέμβασης από την ξηρά τόσο για κανονικές όσο και για έκτακτες συνθήκες λειτουργίας είναι κρίσιμα ζητήματα, τα οποία πρέπει να εξεταστούν (DNV GL, 2018).

Επιπλέον, η εμπιστοσύνη του χειριστή και των επιβατών προς την ικανότητα του αυτόνομου πλοίου να λειτουργεί με ασφάλεια είναι καθοριστικής σημασίας. Για παράδειγμα, οι επιβάτες αισθάνονται μεγαλύτερη ασφάλεια αν ενημερώνονται για την ολοκλήρωση της επιβίβασης και την ασφαλή έναρξη του

ταξιδιού. Κατά τη διάρκεια του πλου, η ενημέρωσή τους σχετικά με τις προθέσεις του πλοίου, όπως εάν θα δώσει προτεραιότητα σε άλλα σκάφη ή θα συνεχίσει την πορεία του, μπορεί να ενισχύσει το αίσθημα ασφάλειας. Καθώς το πλοίο προσεγγίζει το λιμάνι, η διασφάλιση της σωστής ενημέρωσης για την έναρξη και την ασφαλή ολοκλήρωση της διαδικασίας πρόσδεσης είναι εξίσου σημαντική. Σε περιπτώσεις κρίσιμων καταστάσεων, όπως σοβαρές βλάβες ή δυσμενείς καιρικές συνθήκες, οι επιβάτες πρέπει να είναι ενήμεροι για τα συμβάντα και τις ενέργειες που λαμβάνονται. Η διαρκής ενημέρωση των επιβατών μειώνει την αβεβαιότητα και ενισχύει το αίσθημα ασφάλειας. Τέλος, εάν το πλοίο ή ο χειριστής από την ξηρά δεν μπορέσουν να ανιχνεύσουν μια μη φυσιολογική κατάσταση, θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για πιθανή παρέμβαση από τους επιβάτες, ώστε σε ακραίες περιπτώσεις να αναλάβουν τον έλεγχο του σκάφους (Glomsrud, Ødegårdstuen, Clair & Smogeli, 2019).

Καταληκτικά, βασικός στόχος της τεχνητής νοημοσύνης είναι ο συνδυασμός των δεδομένων από τους αισθητήρες, προκειμένου να καταστεί δυνατός ο εντοπισμός και η ταξινόμηση των πλοίων, η απόκτηση πλήρους επίγνωσης της κατάστασης και η διασφάλιση της ακεραιότητας του συστήματος αισθητήρων. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, οι μέθοδοι βαθιάς μάθησης και οι γκαουσιανές διαδικασίες θεωρούνται ιδιαίτερα προηγμένες, είναι πολλά υποσχόμενες και αποτελούν την αιχμή της τεχνολογίας. Ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων με τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση της επίγνωσης της κατάστασης στα αυτόνομα πλοία του μέλλοντος (Thombre et al., 2022).

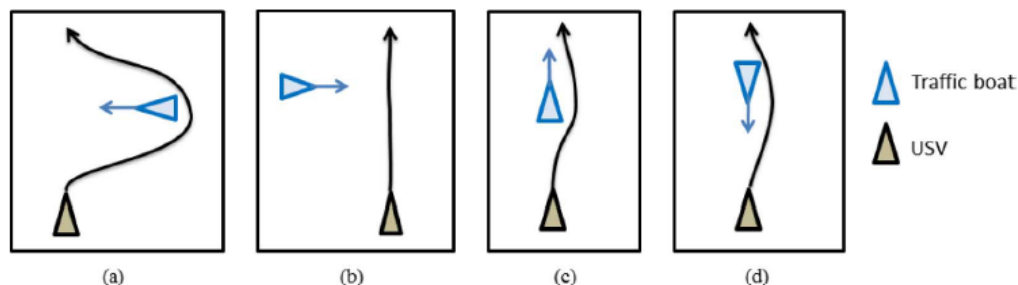
4. Ζητήματα αξιοπιστίας και ασφάλειας στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα

4.1 Εισαγωγή στους κανονισμούς COLREGS

Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση των δυνατοτήτων των μη επανδρωμένων σκαφών επιφανείας (Unmanned Surface Vehicles ή USVs). Σημειώνεται ότι στην κατηγορία των USVs ανήκουν και τα αυτόνομα πλοία (US DON, 2007). Δεδομένου όμως ότι τα αυτόνομα πλοία συνυπάρχουν μαζί με επανδρωμένα και μη επανδρωμένα σκάφη, είναι απαραίτητο να μπορούν να τα αποφεύγουν με ασφάλεια.

Στη ναυτιλία, τα πλοία οφείλουν να συμμορφώνονται με διεθνείς κανονισμούς για την πρόληψη συγκρούσεων στη θάλασσα (γνωστοί κι ως Collision Regulations ή COLREGS), οι οποίοι συμφωνήθηκαν από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) το 1972 (US Department of Homeland Security & US Coast Guard, 2010). Οι συγκεκριμένοι κανονισμοί ορίζουν τους τύπους ελιγμών που πρέπει να εκτελούνται σε περιπτώσεις κινδύνου σύγκρουσης. Όταν τα αυτόνομα πλοία πλέουν κοντά σε άλλα σκάφη, οι αλγόριθμοι πλοήγησής τους πρέπει να είναι πλήρως εναρμονισμένοι με τους κανονισμούς αυτούς. Αυτό διασφαλίζει την αποφυγή συγκρούσεων και επιτρέπει στους κυβερνήτες των άλλων σκαφών να βασίζονται σε ένα σύνολο προβλέψιμων, πρότυπων και σωστών συμπεριφορών.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 15, υπάρχουν τρεις βασικές καταστάσεις στις οποίες εφαρμόζονται οι κανονισμοί COLREGS - η διασταύρωση από τα δεξιά ή αριστερά, η μετωπιαία διασταύρωση και η προσπέραση (Kuwata et al., 2014).



Εικόνα 15: Απαιτούμενοι ελιγμοί σε περιπτώσεις: (a) διασταύρωσης από τα δεξιά, (b) διασταύρωσης από τα αριστερά, (c) προσπέρασης, (d) μετωπιαίας διασταύρωσης (Kuwata et al., 2014).

Στην Εικόνα 15 το γκρι τρίγωνο αναπαριστά το αυτόνομο πλοίο, ενώ το μπλε τρίγωνο αναπαριστά ένα διερχόμενο σκάφος. Στην περίπτωση (a) της Εικόνα 15 και σύμφωνα με τους COLREGS, το πλοίο που έχει το άλλο στα δεξιά του πρέπει να παραχωρήσει προτεραιότητα (US Department of Homeland Security & US Coast Guard, 2010). Επομένως, το αυτόνομο πλοίο, το οποίο παραχωρεί προτεραιότητα, πρέπει να αποφύγει το διερχόμενο σκάφος, ενώ το δεύτερο δεν χρειάζεται να τροποποιήσει την πορεία του. Στην περίπτωση (b), το διερχόμενο σκάφος διασταυρώνεται με το αυτόνομο πλοίο από τα αριστερά του. Σε αυτή την περίπτωση, το διερχόμενο σκάφος θα παραχωρήσει προτεραιότητα, και το αυτόνομο πλοίο μπορεί να διατηρήσει την πορεία του. Στην περίπτωση (c), το αυτόνομο πλοίο προσπερνά ένα αργό διερχόμενο σκάφος. Σε αυτή την περίπτωση, το αυτόνομο πλοίο οφείλει να διατηρεί επαρκή απόσταση ώστε να παραμένει εκτός της πορείας του σκάφους που προσπερνά. Παρόλο που οι κανονισμοί COLREGS δεν ορίζουν από ποια πλευρά πρέπει να πραγματοποιείται η προσπέραση, η συνήθης πρακτική στη ναυσιπλοΐα προτείνει την προσπέραση από τη δεξιά. Παράλληλα, στην περίπτωση (d), όπου τα δύο σκάφη κινούνται κατευθείαν το ένα προς το άλλο, αυτά πρέπει να κατευθυνθούν προς τα δεξιά και να διέλθει το ένα δίπλα από το άλλο με την αριστερή του πλευρά.

Κατά το σχεδιασμό της κίνησης ενός σκάφους, είναι απαραίτητο να καθοριστεί αρχικά η βέλτιστη ταχύτητα που θα συμμορφώνεται με τους

κανονισμούς COLREGS, αλλά και ταυτόχρονα θα συμβάλει στην αποφυγή των κινούμενων εμποδίων.

Ακόμη και στην πιο απλή περίπτωση, ο έλεγχος της τήρησης ενός κανονισμού COLREGS δεν είναι μια απλή διαδικασία. Αυτό οφείλεται στο ότι οι κανονισμοί αυτοί έχουν σχεδιαστεί για ανθρώπινους χειριστές και συχνά λαμβάνουν υπόψη την υποκειμενική κρίση τους. Επίσης, ο συγκεκριμένος έλεγχος δεν αποτελεί μια απλή συνάρτηση της σχετικής θέσης των σκαφών (όπως η γωνία πλεύσης ή η απόσταση) και/ή της κατεύθυνσής τους (Kuwata et al., 2014).

4.2 Η μέθοδος Velocity Obstacle

4.2.1 Ανασκόπηση της μεθόδου VO

Η μέθοδος Velocity Obstacle (VO) χρησιμοποιείται για την αποφυγή συγκρούσεων με κινούμενα εμποδία και έχει υιοθετηθεί από αρκετούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Από την πρώτη της παρουσίαση το 1998 για τον σχεδιασμό κίνησης ρομπότ (Fiorini & Shiller, 1998), διάφορες επεκτάσεις της έχουν αναπτυχθεί έκτοτε, όπως η συνεργατική μορφή αποφυγής συγκρούσεων (van den Berg, Lin & Manocha, 2008), οι πιθανοτικές VO (Kluge & Prassler, 2004; Fulgenzi, Spalanzani & Laugier, 2007) και η προσομοίωση πλήθους (van den Berg et al., 2008).

Η μέθοδος αυτή περιγράφει, μέσω της δημιουργίας μίας περιοχής, το εύρος των ταχυτήτων που μπορεί να οδηγήσει δύο σκάφη σε σύγκρουση. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της μεθόδου VO δημιουργείται μία κωνοειδής περιοχή VO στον χώρο των ταχυτήτων και διασφαλίζεται ότι δεν θα υπάρξουν συγκρούσεις στο μέλλον, εφόσον το διάνυσμα της ταχύτητας του σκάφους βρίσκεται εκτός της περιοχής VO.

Για την επιβεβαίωση μιας πιθανής μελλοντικής σύγκρουσης, μπορεί να υπολογιστεί τόσο η θέση του κινούμενου εμποδίου όσο και του αυτόνομου σκάφους σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους στο μέλλον, εκτελώντας

παράλληλα ελέγχους σύγκρουσης με βάση τις εκάστοτε διαμορφώσεις τους. Παρόλο που αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη μελέτη των συγκρούσεων μεταξύ σκαφών με οποιαδήποτε τροχιά, το υπολογιστικό φορτίο είναι ιδιαίτερα υψηλό λόγω του πλήθους των ελέγχων σύγκρουσης που πραγματοποιούνται σε διάφορες χρονικές στιγμές. Εν αντιθέσει, η μέθοδος VO βασίζεται σε πρόβλεψη πρώτης τάξης (γραμμική) και εκτελεί τον έλεγχο σύγκρουσης στο χώρο των ταχυτήτων. Δεδομένου ότι ένας μόνο έλεγχος καλύπτει όλες τις πιθανές συγκρούσεις σε μελλοντικές χρονικές στιγμές (λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή της γραμμικής ταχύτητας), η VO αποδεικνύεται ως μία αποδοτική, απλή μέθοδος, κατάλληλη για ταχείες λειτουργίες με μικρούς χρόνους απόκρισης (Kuwata et al., 2014).

Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος VO, με εφαρμογή στο σχεδιασμό κίνησης ενός αυτόνομου πλοίου (Fiorini & Shiller, 1998). Αρχικά, ορίζουμε ως $\vec{p} \in \mathbb{R}^2$ το διάνυσμα της θέσης του αυτόνομου πλοίου και $\vec{u} \in \mathbb{R}^2$ τη διανυσματική ταχύτητα στο δισδιάστατο χώρο. Το διάνυσμα που ξεκινά από το $\vec{p}$ και κατευθύνεται προς το $\vec{u}$ ορίζεται ως:

$$\lambda(\vec{p}, \vec{u}) = \{\vec{p} + t\vec{u} \mid t \geq 0\} \quad (1)$$

Επιπλέον, για να εξηγηθεί η VO χρησιμοποιούνται και τα εξής:

$$A \oplus B = \{\vec{a} + \vec{b} \mid \vec{a} \in A, \vec{b} \in B\} \quad (2)$$

$$-A = \{-\vec{a} \mid \vec{a} \in A\} \quad (3)$$

Στη συνέχεια, αν θεωρήσουμε ένα αυτόνομο πλοίο με σχήμα A και ένα εμπόδιο με σχήμα B, το οποίο κινείται με ταχύτητα $\vec{u}_B$, η VO του εμποδίου B στον χώρο των ταχυτήτων αυτόνομου πλοίου A δίνεται ως εξής:

$$VO_B^A(\vec{u}_B) = \{\vec{u}_A \mid \lambda(\vec{p}_A, \vec{u}_A - \vec{u}_B) \cap (B \oplus -A) \neq \emptyset\} \quad (4)$$

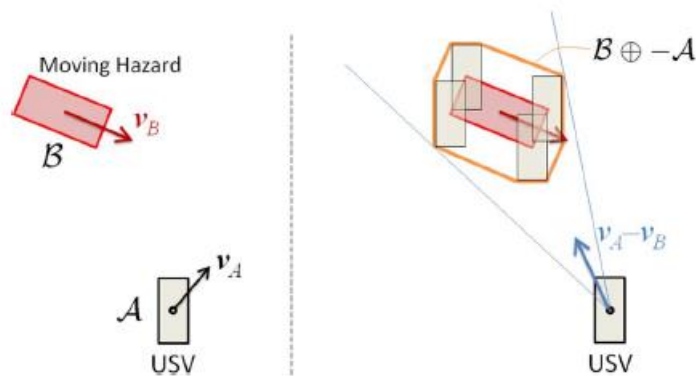
όπου:

$\vec{p}_A$ και $\vec{p}_B$ είναι οι θέσεις του αυτόνομου πλοίου και του εμποδίου

$\vec{u}_A$ και $\vec{u}_B$ είναι τα διανύσματα της ταχύτητάς τους, αντίστοιχα.

Μια απλή ερμηνεία της εξίσωσης (1) είναι ότι προσθέτοντας στις γωνίες του κινούμενου εμποδίου B το σχήμα του αυτόνομου πλοίου A, δημιουργείται μια περιοχή η οποία τέμνεται από το διάνυσμα που ξεκινάει από το αυτόνομο πλοίο και έχει κατεύθυνση ίδια με αυτή της σχετικής ταχύτητας ($\vec{u}_A - \vec{u}_B$). Η Εικόνα 16 απεικονίζει γραφικά τη VO χρησιμοποιώντας ένα αυτόνομο πλοίο A ορθογωνίου σχήματος και ένα κινούμενο εμπόδιο B ορθογωνίου σχήματος. Όπως φαίνεται, η VO αποτελεί μία κωνοειδή περιοχή στο χώρο των ταχυτήτων. Εφόσον η ταχύτητα του αυτόνομου πλοίου βρίσκεται εκτός του VO, δεν θα υπάρξει σύγκρουση με το εμπόδιο, με την υπόθεση ότι τα διανύσματα της ταχύτητας παραμένουν σταθερά με την πάροδο του χρόνου. Εάν τα διανύσματα της ταχύτητας μεταβληθούν με την πάροδο του χρόνου, η μέθοδος VO επαναπροσαρμόζεται, αλλάζοντας την πορεία των σκαφών με βάση τις τελευταίες πληροφορίες από τους αισθητήρες. Στην πράξη, όταν ο ρυθμός επαναπρογραμματισμού της πορείας είναι σημαντικά υψηλότερος από τον ρυθμό μεταβολής των τροχιών των σκαφών, η παραδοχή των γραμμικών ταχυτήτων θεωρείται εύλογη (Kuwata et al., 2014). Στις δοκιμές των Kuwata et al. (2014), ο ρυθμός επαναπρογραμματισμού της πορείας ήταν 1 Hz, ενώ η γωνιακή ταχύτητα του σκάφους συνήθως δεν υπερέβαινε τις 30°/s.

Τέλος, στην περίπτωση που εμπλέκονται πολλά σκάφη, η κίνηση του αυτόνομου πλοίου περιορίζεται από τις αλληλοεπικαλύψεις των κωνοειδών περιοχών VO κάθε σκάφους (Kuwata et al., 2014).



Εικόνα 16: Γραφική αναπαράσταση της μεθόδου VO (Kuwata et al., 2014).

4.2.2 Υπολογισμός του χρόνου έως τη σύγκρουση

Όταν το διάνυσμα ταχύτητας $\vec{u}_A$ βρίσκεται εντός του VO, ο χρόνος έως τη σύγκρουση μπορεί να βρεθεί υπολογίζοντας τον χρόνο που χρειάζεται το διάνυσμα της σχετικής ταχύτητας $\vec{u}_A - \vec{u}_B$ για να τέμνει τα όρια του συνόλου $B \oplus - A$, δηλαδή:

$$\vec{p}_A + \tau(\vec{u}_A - \vec{u}_B) \in \partial(B \oplus - A) \quad (5)$$

όπου το $\partial(\cdot)$ συμβολίζει τα όρια του συνόλου.

Εάν υπάρχουν πολλαπλές τιμές τ που ικανοποιούν την (5), επιλέγεται η μικρότερη (Kuwata et al., 2014).

4.2.3 Διαχείριση της αβεβαιότητας κατά το σχεδιασμό κίνησης

Κατά το σχεδιασμό της κίνησης ενός σκάφους, οι διάφορες πηγές αβεβαιότητας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Τα κινούμενα εμπόδια ανιχνεύονται και παρακολουθούνται με χρήση αισθητήρων, όπως τα RADAR (Elkins, Sellers & Monach, 2010), οι κάμερες (Huntsberger, Aghazarian, Howard & Trotz, 2011) και τα LiDAR. Τα χαρακτηριστικά και η ποιότητα των αισθητήρων δύνανται να επηρεάσουν την εκτίμηση της κατάστασης του διερχόμενου σκάφους (Kuwata et al., 2014).

Ως μία άλλη πηγή αβεβαιότητας μπορεί να θεωρηθεί η ανακριβής, μη σταθερή κίνηση των εμποδίων. Η μέθοδος VO βασίζεται στην υπόθεση ότι τα κινούμενα εμπόδια διατηρούν σταθερή ταχύτητα, αλλά αυτό δεν ισχύει απαραίτητα στην πραγματικότητα. Για να ληφθούν υπόψη αυτές οι αβεβαιότητες, η ταχύτητα $\vec{u}_B$ ορίζεται ως:

$$\vec{u}_B = \vec{\bar{u}}_B + \vec{\delta}_B \quad (6)$$

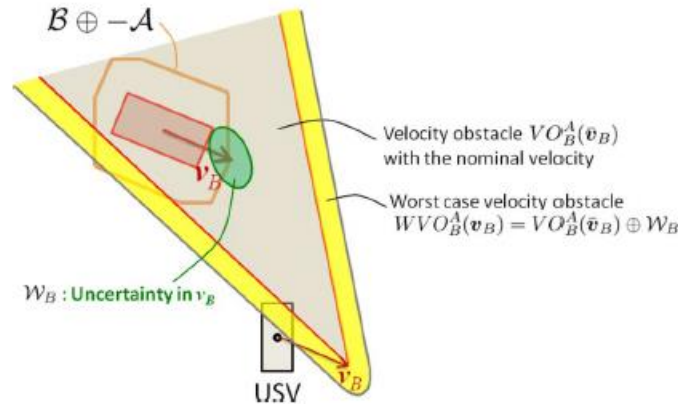
όπου $\vec{\bar{u}}_B$ είναι η ονομαστική ταχύτητα (δηλαδή η αναμενόμενη ταχύτητα που έχει εκτιμηθεί από το σύστημα παρακολούθησης) και το $\vec{\delta}_B$ αντιπροσωπεύει τις

αβεβαιότητες στην ταχύτητα του σκάφους. Για το $\vec{\delta}_B$ ισχύει ότι $\vec{\delta}_B \in W_B$, όπου το W_B είναι ένα περιορισμένο σύνολο που θεωρείται σταθερό.

Ακολουθως, η VO με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα (WVO) εκφράζεται ως:

$$WVO_B^A(\vec{u}_B) = VO_B^A(\vec{u}_B) \oplus W_B \quad (7)$$

Η Εικόνα 17 παρουσιάζει την ίδια περίπτωση με την Εικόνα 16, λαμβάνοντας όμως υπόψη αυτή τη φορά ορισμένες αβεβαιότητες. Η μπλε κωνοειδής περιοχή δείχνει τη VO με την ονομαστική ταχύτητα. Στο παράδειγμα αυτό, το κινούμενο εμπόδιο B έχει μια αβεβαιότητα ταχύτητας W_B , η οποία απεικονίζεται ως μία πράσινη έλλειψη. Το χειρότερο σενάριο της VO, που απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα, είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από την ονομαστική VO και οι γραμμές των ορίων του είναι παράλληλες με αυτές της VO. Η VO θεωρείται ως μία απαράβατη περιοχή, ενώ η περιοχή W_B του WVO αντιμετωπίζεται ως πιο ακίνδυνη εξασφαλίζοντας ένα περιθώριο ασφαλείας (Kuwata et al., 2014).

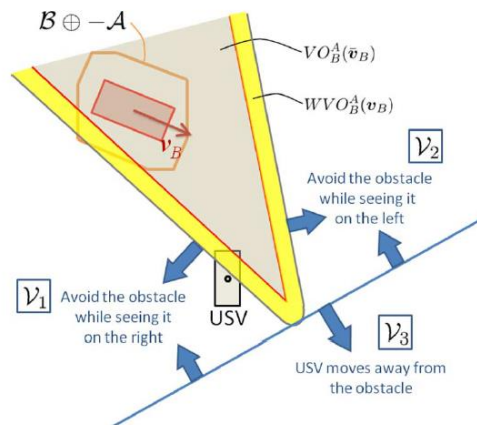


Εικόνα 17: Το χειρότερο σενάριο της VO, όταν υπάρχει αβεβαιότητα για την ταχύτητα του κινούμενου εμποδίου (Kuwata et al., 2014).

4.2.4 Η VO ως σύνολο περιορισμών και η συσχέτισή της με τους COLREGS

Η VO αποτελεί ένα σύνολο περιορισμών στο χώρο ταχυτήτων του αυτόνομου σκάφους και είναι απαραίτητη για την αποφυγή των κινούμενων εμποδίων. Επίσης, με βάση τους Kuwata et al. (2014), οι κανονισμοί COLREGS θεωρούνται ως ένα επιπλέον σύνολο περιορισμών. Ένα πλεονέκτημα της χρήσης της μεθόδου VO για την τήρηση των κανονισμών COLREGS είναι ότι περιλαμβάνει ήδη τις πληροφορίες για την απαιτούμενη πορεία αποφυγής ενός εμποδίου από το αυτόνομο σκάφος.

Η Εικόνα 18 παρουσιάζει μία περιοχή VO και ένα χώρο ταχυτήτων που χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Η γραμμή που διαχωρίζει την περιοχή $\mathcal{V}_3$ από τις $\mathcal{V}_1$ και $\mathcal{V}_2$ είναι εφαπτόμενη στο $WVO_B^A(\vec{u}_B)$ (Kuwata et al., 2014).



Εικόνα 18: Περιορισμοί στον χώρο ταχυτήτων που επιβάλλονται από τους κανονισμούς COLREGS (Kuwata et al., 2014).

Όταν το αυτόνομο σκάφος αποκτά μία ταχύτητα στην περιοχή $\mathcal{V}_3$, η κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας τείνει να απομακρύνει το αυτόνομο σκάφος από το κινούμενο εμπόδιο, δηλαδή:

$$(\vec{p}_B - \vec{p}_A) \cdot (\vec{u}_A - \vec{u}_B) < 0 \quad \forall \vec{\delta}_B \in W_B \quad (8)$$

Όταν το αυτόνομο σκάφος αποκτά μία ταχύτητα εντός της περιοχής $\mathcal{V}_1$, το αυτόνομο σκάφος θα περάσει το εμπόδιο έχοντάς το στη δεξιά του πλευρά.

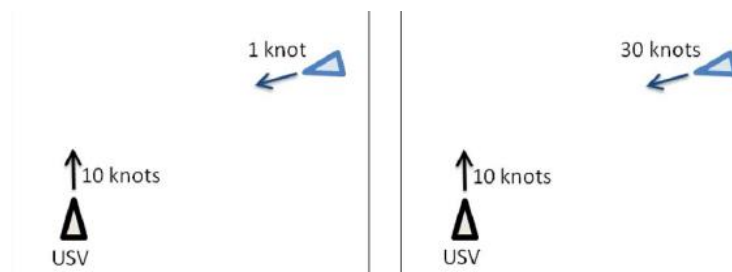
$$\mathcal{V}_1 = \{\vec{u} | \vec{u} \notin WVO_B^A(\vec{u}_B), \quad \vec{u} \notin \mathcal{V}_3, \\ \exists \delta_B \in W_B \text{ s.t. } [(\vec{p}_B - \vec{p}_A) \times (\vec{u}_A - \vec{u}_B)]_z < 0 \} \quad (9)$$

Ο τελεστής $[\cdot]_z$ απομακρύνει το τμήμα z του διανύσματος. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιείται το συμβατικό σύστημα συντεταγμένων, σταθερό ως προς το σώμα, με τον +x να δείχνει εμπρός, τον +y να δείχνει δεξιά και τον +z προς τα κάτω.

Η περιοχή $\mathcal{V}_1$ θεωρείται μη αποδεκτή στις εξής περιπτώσεις όπου: το αυτόνομο σκάφος προσπερνά το εμπόδιο B, όταν βρίσκονται σε κατάσταση μετωπικής σύγκρουσης και όταν το εμπόδιο B διασχίζει από τη δεξιά πλευρά. Σημειώνεται ότι όταν $\vec{u}_A \in \mathcal{V}_1$, το αυτόνομο σκάφος θα βλέπει το εμπόδιο B στη δεξιά πλευρά του, γεγονός που σημαίνει ότι θα το προσπεράσει από μπροστά. Στην περίπτωση που $\vec{u}_A \notin \mathcal{V}_1$, διασφαλίζεται ότι το αυτόνομο σκάφος θα περάσει μόνο από τη δεξιά πλευρά (όταν $\vec{u}_A \in \mathcal{V}_2$) ή δεν θα περάσει καθόλου (όταν $\vec{u}_A \in \mathcal{V}_3$). Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι όταν το κινούμενο εμπόδιο B διασχίζει από την αριστερή πλευρά, το αυτόνομο σκάφος δεν περιορίζεται από τους κανονισμούς COLREGS, καθώς η ευθύνη για την αποφυγή του αυτόνομου σκάφους ανήκει στο εμπόδιο B. Παραταύτα, ακόμη και χωρίς τους περιορισμούς που προκύπτουν από τους COLREGS, η περιοχή VO εξακολουθεί να υφίσταται, διασφαλίζοντας ότι το αυτόνομο σκάφος θα αποφύγει κάθε κινούμενο εμπόδιο. Αυτό είναι κρίσιμο για την διατήρηση της ασφάλειας στη ναυσιπλοΐα, σε περίπτωση που το εμπόδιο B παραβιάσει τους κανονισμούς COLREGS. Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια προσπέρασης από άλλο σκάφος, οι COLREGS δεν επιβάλλουν περιορισμούς (Kuwata et al., 2014).

4.2.5 Ο αλγόριθμος ασφαλούς πλοήγησης

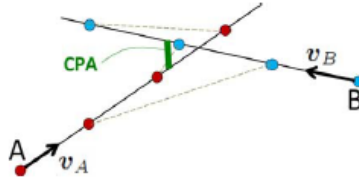
Το πρώτο βήμα στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου είναι η χρήση ενός επιλογέα κανόνων (rule selector), ο οποίος μπορεί να εντοπίσει εάν ένα κινούμενο εμπόδιο τηρεί τους κανονισμούς COLREGS κατά τη συνύπαρξή του με ένα αυτόνομο σκάφος. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 19, η απλή ανάλυση της γεωμετρικής σχέσης μεταξύ του αυτόνομου σκάφους και των κινούμενων εμποδίων δεν είναι πάντοτε επαρκής (Kuwata et al., 2014).



Εικόνα 19: Οι κανονισμοί COLREGS μπορεί και να μην ισχύουν, ακόμη και για σκάφη με πανομοιότυπη γεωμετρική διάταξη (Kuwata et al., 2014).

4.2.5.1 Έλεγχος προσέγγισης πριν τη σύγκρουση

Ο επιλογέας κανόνων υπολογίζει πρώτα το πλησιέστερο σημείο προσέγγισης (Closest Point of Approach ή CPA) χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες θέσεις και ταχύτητες του αυτόνομου σκάφους, αλλά και των διερχόμενων σκαφών, ενώ παράλληλα καθορίζει πώς πρέπει να εφαρμοστούν οι κανονισμοί COLREGS. Στην Εικόνα 20 κάθε κουκκίδα αντιστοιχεί σε μια θέση κάποιας συγκεκριμένης χρονικής στιγμής, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν την απόσταση μεταξύ των A και B. Η πλησιέστερη απόσταση σημειώνεται με μία παχιά γραμμή, υποδηλώνοντας το CPA (Kuwata et al., 2014).



Εικόνα 20: Το πλησιέστερο σημείο προσέγγισης (CPA) (Kuwata et al., 2014).

Ο υπολογισμός του CPA μεταξύ δύο σκαφών πραγματοποιείται με τον ακόλουθο τρόπο. Δεδομένων δύο σημείων $\vec{p}_A$ και $\vec{p}_B$ και των διανυσμάτων ταχύτητάς τους $\vec{u}_A$ και $\vec{u}_B$, ο χρόνος έως το CPA (t_{CPA}) δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$t_{CPA} = \frac{(\vec{p}_A - \vec{p}_B) \cdot (\vec{u}_A - \vec{u}_B)}{\|\vec{u}_A - \vec{u}_B\|^2} \quad (10)$$

Επομένως, το CPA (d_{CPA}) υπολογίζεται ως εξής:

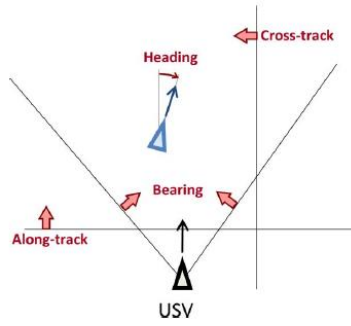
$$d_{CPA} = \|(\vec{p}_A + \vec{u}_A t_{CPA}) - (\vec{p}_B + \vec{u}_B t_{CPA})\| \quad (11)$$

Για κάθε κινούμενο σκάφος, η εφαρμογή των κανονισμών COLREGS εξετάζεται κατά το σχεδιασμό της κίνησής του, μόνο εάν η τρέχουσα κατάσταση είναι πιθανό να οδηγήσει σε σύγκρουση στο άμεσο μέλλον, ελέγχοντας τις παρακάτω συνθήκες (Kuwata et al., 2014):

$$0 \leq t_{CPA} \leq t_{max} \quad \text{και} \quad d_{CPA} \leq d_{min} \quad (12)$$

4.2.5.2 Η εφαρμογή του επιλογέα κανόνων

Όταν το CPA πληροί τη συνθήκη (12), ο επιλογέας κανόνων καθορίζει ποια κατάσταση των κανονισμών COLREGS ισχύει, βασιζόμενος σε ένα σύνολο γεωμετρικών περιορισμών, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 21 (Kuwata et al., 2014).



Εικόνα 21: Απεικόνιση των γεωμετρικών περιορισμών που χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί αν ένας κανονισμός COLREGS ισχύει (Kuwata et al., 2014).

Οι περιορισμοί αφορούν τα παρακάτω:

- Κατεύθυνση (heading): $\theta_{min} \leq \theta_B - \theta_A \leq \theta_{max}$
- Φορά (bearing): $b_{min} \leq b_B \leq b_{max}$
- Πλευρική απόσταση (cross track): $y_{min} \leq y_B \leq y_{max}$
- Μήκος διαδρομής (along track): $x_{min} \leq x_B \leq x_{max}$

όπου οι δείκτες A και B αναφέρονται στις μεταβλητές του αυτόνομου σκάφους και του κινούμενου εμποδίου, αντίστοιχα.

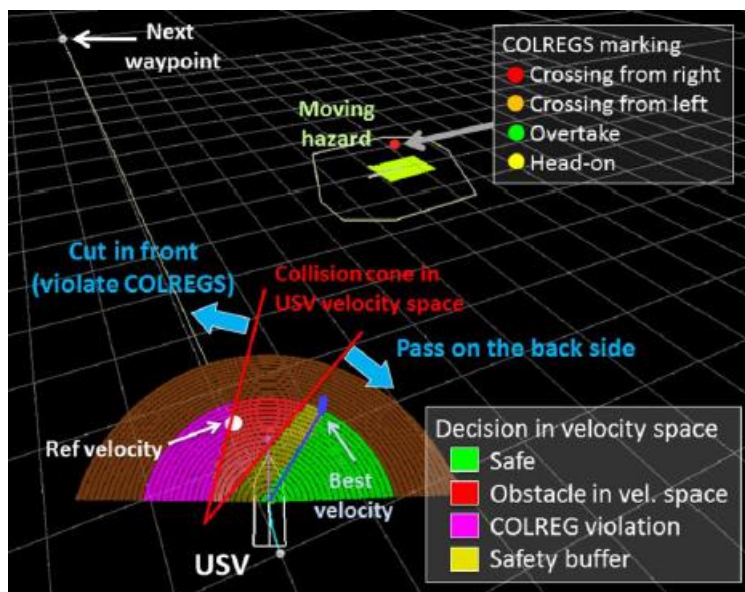
Δεδομένου ότι οι καταστάσεις “διασταύρωση από τα αριστερά” και “διασταύρωση από τα δεξιά” απαιτούν διαφορετικούς ελιγμούς από το αυτόνομο σκάφος, ο επιλογέας κανόνων εξετάζει τέσσερις βασικές περιπτώσεις: την προσπέραση, τη μετωπιαία διασταύρωση, τη διασταύρωση από τα αριστερά και τη διασταύρωση από τα δεξιά. Για κάθε κανόνα εφαρμόζονται διαφορετικά όρια $(\cdot)_{min}$ και $(\cdot)_{max}$. Για παράδειγμα, οι ανωτέρω περιορισμοί στην κατεύθυνση πρέπει να διασφαλίζουν την κατάλληλη ευθυγράμμιση του αυτόνομου σκάφους και του κινούμενου εμποδίου (για την προσπέραση), την αντίθετη πορεία τους (για τη μετωπιαία διασταύρωση) και τη σχεδόν κάθετη τροχιά τους (για τη διασταύρωση) (Kuwata et al., 2014).

4.2.5.3 Υστέρηση στη ναυσιπλοΐα

Εάν λαμβάνεται μια νέα απόφαση σε κάθε χρονική στιγμή, το αυτόνομο σκάφος μπορεί να εμφανίσει συμπεριφορά "παλινδρόμησης" (chattering). Αυτό συμβαίνει επειδή η αβεβαιότητα στην επίγνωση της κατάστασης μπορεί να προκαλεί συχνή εναλλαγή των περιορισμών των COLREGS, οδηγώντας σε έντονες αλλαγές στον αποδεκτό χώρο λήψης αποφάσεων, όπως φαίνεται στην περιοχή $\mathcal{V}_1$ της Εικόνα 18.

Για να περιοριστεί αυτό το φαινόμενο, έχει εισαχθεί η έννοια της υστέρησης στον επιλογέα κανόνων, μειώνοντας τον ρυθμό με τον οποίο το αυτόνομο σκάφος μπορεί να αλλάζει τους κανόνες που εφαρμόζει. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι, μόλις ξεκινήσει ένας ελιγμός βάσει των κανονισμών COLREGS (όπως προσπέραση ή διασταύρωση), ο ελιγμός συνεχίζει να καθοδηγεί το σκάφος για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο, οι αποφάσεις του αυτόνομου σκάφους γίνονται πιο ξεκάθαρες και προβλέψιμες για τους χειριστές άλλων σκαφών. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η αλλαγή, που πρέπει να είναι εμφανής στα υπόλοιπα σκάφη, προβλέπεται και από τους κανονισμούς COLREGS (Kuwata et al., 2014; US Department of Homeland Security & US Coast Guard, 2010).

Η Εικόνα 22 παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο προσομοίωσης με ένα αυτόνομο σκάφος (USV) στο κάτω μέρος και ένα κινούμενο σκάφος. Το σημείο προορισμού του USV είναι τοποθετημένο στο επάνω αριστερό τμήμα της εικόνας. Το κινούμενο σκάφος διέρχεται από τα δεξιά και το USV αναγνωρίζει ότι βρίσκεται σε κατάσταση διασταύρωσης και αρχίζει να ελίσσεται προς τα δεξιά (Kuwata et al., 2014).



Εικόνα 22: Στιγμιότυπο από μια προσομοίωση, όπου το USV βρίσκεται σε κατάσταση διασταύρωσης (Kuwata et al., 2014).

Η έγχρωμη περιοχή γύρω από το USV αναπαριστά τον χώρο λήψης αποφάσεων σχετικά με την ταχύτητα. Όπως φαίνεται στο κάτω δεξί τμήμα της εικόνας, η πράσινη περιοχή αναπαριστά μία έκταση ασφαλούς πλοήγησης, η κόκκινη περιοχή αντιπροσωπεύει τη VO, η κίτρινη περιοχή είναι η διευρυμένη ζώνη ασφαλείας WVO και η μωβ περιοχή υποδεικνύει την παραβίαση των κανονισμών COLREGS.

Όπως φαίνεται στο πάνω δεξί μέρος της εικόνας, σημειώνεται μια μικρή κουκκίδα πάνω από το κινούμενο σκάφος όταν η κατάσταση στην οποία βρίσκονται τα δύο πλοία είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς COLREGS. Επίσης, το χρώμα της κουκκίδας αντιστοιχεί στον εκάστοτε τύπο COLREGS. Αξίζει να αναφερθεί ότι, λόγω της υστέρησης στην επιλογή κανόνων, ένα διερχόμενο σκάφος μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε περισσότερες από μία καταστάσεις σύμφωνα με τους κανονισμούς COLREGS και επομένως, να εμφανίζεται με πολλαπλές κουκκίδες διαφορετικών χρωμάτων (Kuwata et al., 2014).

Εντυπωσιακά αποτελέσματα προέκυψαν από δοκιμαστικό πλου στη Βόρεια Θάλασσα της Ολλανδίας, όπου ένα αυτόνομο πλοίο εξοπλισμένο με σύστημα αποφυγής που βασίζεται στη ρύθμιση προβλεπτικού μοντέλου (Model Predictive

Control ή MPC) πραγματοποίησε επιτυχώς ελιγμούς ακόμα και σε εξαιρετικά απαιτητικές καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Kufoalor, Johansen, Brekke, Hepsø & Trnka, 2019). Κατανοούμε, λοιπόν, ότι η τεχνολογία έχει πλέον ωριμάσει σημαντικά στον τομέα της ασφαλούς πλοήγησης και της πρόληψης ατυχημάτων.

4.3 Τα οφέλη στην ασφάλεια από τη μετάβαση σε αυτόνομα πλοία

Για την αξιολόγηση της επίδρασης των αυτόνομων πλοίων στην ασφάλεια, χρησιμοποιούνται δύο κριτήρια: ο αριθμός των ανθρώπινων ζωών που χάνονται κατά τη διάρκεια ατυχημάτων στη θάλασσα και ο αριθμός των πλοίων που χάνονται/καταστρέφονται. Κατά αυτόν τον τρόπο, παρέχεται μία αρκετά ικανοποιητική, αλλά όχι πλήρως ακριβής, εικόνα της κατάστασης που επικρατεί. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση του αριθμού των θανάτων ως δείκτη για την ασφάλεια αγνοεί τους μη θανατηφόρους τραυματισμούς και τα εργασιακά ατυχήματα, λόγω έλλειψης αξιόπιστων δεδομένων γι' αυτά. Παράλληλα, η χρήση του αριθμού των πλοίων που χάνονται/καταστρέφονται έχει επίσης περιορισμούς.

Πρώτον, δεν λαμβάνονται υπόψη οι διαφορές στο είδος και στην ποσότητα του φορτίου των πλοίων, με αποτέλεσμα οι οικονομικές συνέπειες να ποικίλλουν. Ο διαχωρισμός των πλοίων με βάση τον τύπο και το μέγεθός τους φαίνεται να μειώνει την αβεβαιότητα που προκύπτει από το συγκεκριμένο ζήτημα. Ωστόσο, η έλλειψη δεδομένων δυσχεραίνει την ακριβή ποσοτικοποίηση των οικονομικών απωλειών. Δεύτερον, δεν λαμβάνονται υπόψη τα πλοία που εμπλέκονται σε ατυχήματα, αλλά δεν χάνονται ή καταστρέφονται ολοσχερώς (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021). Σύμφωνα με έρευνα των de Vos, Hekkenberg και Koelman (2020), η ολική απώλεια/καταστροφή ενός φορτηγού πλοίου και του φορτίου του συνεπάγεται μεγαλύτερες οικονομικές συνέπειες συγκριτικά με περιπτώσεις ατυχημάτων όπου το πλοίο παραμένει λειτουργικό και τα περισσότερα φορτία του άθικτα. Κατά τη διάρκεια ατυχημάτων σχετικών με την πλοήγηση, συχνά προκαλούνται ζημιές που μπορούν να επιδιορθωθούν. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι τα κόστη που προκύπτουν από ατυχήματα όπου τα πλοία παραμένουν λειτουργικά είναι μικρά. Για παράδειγμα, σε περιστατικά που

δημιουργείται έντονη ταλάντωση (extreme roll motion) μπορεί να προκληθούν ζημιές σε ευπαθή ή υψηλής αξίας φορτία, όπως εμπορευματοκιβώτια ή αυτοκίνητα, ακόμα κι αν το ίδιο το πλοίο δεν έχει υποστεί σοβαρές ζημιές (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Για την ανάλυση των ατυχημάτων που οδηγούν σε απώλεια ζωών και πλοίων, χρησιμοποιείται η βάση δεδομένων IHS SeaWeb. Η IHS SeaWeb αποτελεί μία εμπορική βάση που ενημερώνεται συνεχώς με δεδομένα από ατυχήματα παγκοσμίως. Τα δεδομένα ταξινομούνται ανά τύπο ατυχήματος, τύπο πλοίου και μέγεθος πλοίου, επιτρέποντας τον υπολογισμό του αριθμού των απωλειών για κάθε κατηγορία. Αυτή η διαδικασία παρέχει μια γενική εικόνα της ασφάλειας στη θάλασσα και διευκολύνει τη δημιουργία σεναρίων για την αυτόνομη λειτουργία διάφορων πλοίων, όπως φορτηγών πλοίων, πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, δεξαμενόπλοιων, αλιευτικών σκαφών κ.ά. (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

4.3.1 Μελέτη των ναυτικών ατυχημάτων μεταξύ 2000-2018 και των επιπτώσεών τους

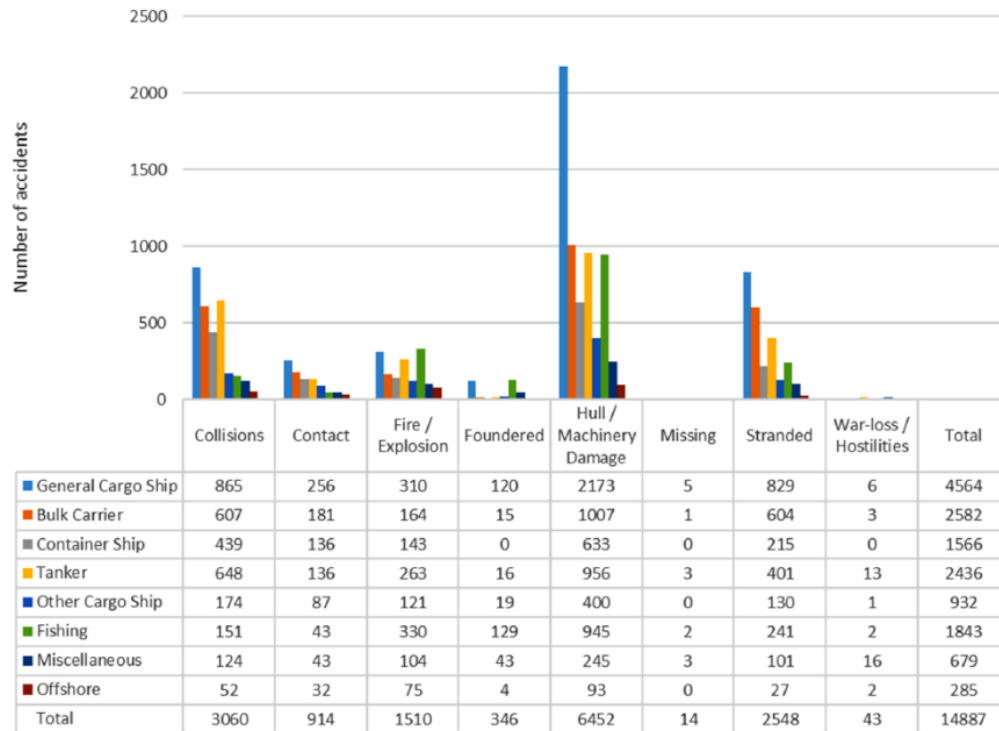
Σε μία μελέτη τους, οι de Vos, Hekkenberg και Valdez Banda (2021) χρησιμοποίησαν δεδομένα ατυχημάτων που καλύπτουν όλα τα σοβαρά περιστατικά και τα δυστυχήματα που παρατηρήθηκαν σε πλοία από το 2000 έως το 2018. Στο συγκεκριμένο εγχείρημα, εξετάστηκαν πλοία τα οποία ήταν κατασκευασμένα μετά το 1980 και ήταν συγκεκριμένου τύπου και μεγέθους. Πολύ σημαντικός για την έρευνα αυτή ήταν και ο διαχωρισμός των ατυχημάτων σε κατηγορίες. Στην IHS SeaWeb τα ατυχήματα χωρίζονται σε οκτώ κατηγορίες. Οι ορισμοί αυτών των κατηγοριών παρέχονται από την IHS Markit ως εξής:

- Συγκρούσεις: Περιλαμβάνει περιστατικά που προκύπτουν από πρόσκρουση ενός πλοίου με ένα άλλο, είτε το αυτό βρίσκεται εν πλω, αγκυροβολημένο ή δεμένο. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και οι συγκρούσεις με εξέδρες ή πλατφόρμες γεώτρησης/εξόρυξης, είτε αυτές βρίσκονται σε σταθερή θέση είτε ρυμουλκούνται.

- Επαφή: Αναφέρεται σε περιστατικά όπου το πλοίο προσκρούει σε κάποιο αντικείμενο, αλλά όχι σε άλλο πλοίο (όπως π.χ. στις «Συγκρούσεις») ή στον βυθό της θάλασσας (όπως π.χ. στην «Προσάραξη»). Αν η επαφή είναι στιγμιαία και το πλοίο συνεχίσει κανονικά την πορεία του, δεν κατατάσσεται εδώ.
- Φωτιά/Έκρηξη: Περιλαμβάνει επεισόδια που προκαλούνται από φωτιά ή/και έκρηξη, όταν αυτά είναι το πρώτο καταγεγραμμένο γεγονός. Αν παραδείγματος χάρη η φωτιά ή η έκρηξη προκύψουν μετά από σύγκρουση ή προσάραξη, το περιστατικό κατατάσσεται στις αντίστοιχες κατηγορίες «Συγκρούσεις» ή «Προσάραξη».
- Βύθιση: Αναφέρεται σε πλοία που βυθίστηκαν λόγω κακοκαιρίας, εισροής υδάτων, θραύσης ή άλλων αιτιών, αλλά όχι ως συνέπεια περιστατικών που εντάσσονται στις άλλες κατηγορίες.
- Ζημιά σε γάστρα/μηχανές: Αφορά σε ζημιές ή βλάβες που σημειώνονται στη γάστρα ή τις μηχανές και δεν αποδίδονται σε περιστατικό κάποιας άλλης κατηγορίας.
- Αγνοούμενα πλοία: Όταν μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα ένα πλοίο δεν δίνει σημεία ζωής και η τύχη του παραμένει άγνωστη.
- Προσάραξη: Περιλαμβάνει τις περιπτώσεις όπου το πλοίο ακινητοποιείται λόγω επαφής με τον βυθό της θάλασσας, την ακτή ή παγιδεύεται σε υποθαλάσσια ναυάγια.
- Απώλεια λόγω πολέμου/εχθροπραξιών: Περιλαμβάνει τις απώλειες ή ζημιές που προκύπτουν σε πλοία εξαιτίας εχθρικών ενεργειών.

Το σύνολο των σοβαρών ατυχημάτων στη θάλασσα που μελετήθηκε και έχει καταγραφεί ανέρχεται σε 14.887 περιστατικά. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες ατυχημάτων στα οποία εμπλέκονται πλοία. Σύμφωνα με τα δεδομένα, τα περισσότερα ατυχήματα αφορούν ζημιές στη γάστρα ή τις μηχανές. Στη συνέχεια ακολουθούν οι συγκρούσεις και οι προσαράξεις. Οι υπόλοιπες κατηγορίες ατυχημάτων εμφανίζονται με μικρότερη συχνότητα. Επιπλέον, τα

ατυχήματα παρατηρούνται κυρίως σε φορτηγά πλοία (general cargo ships) (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

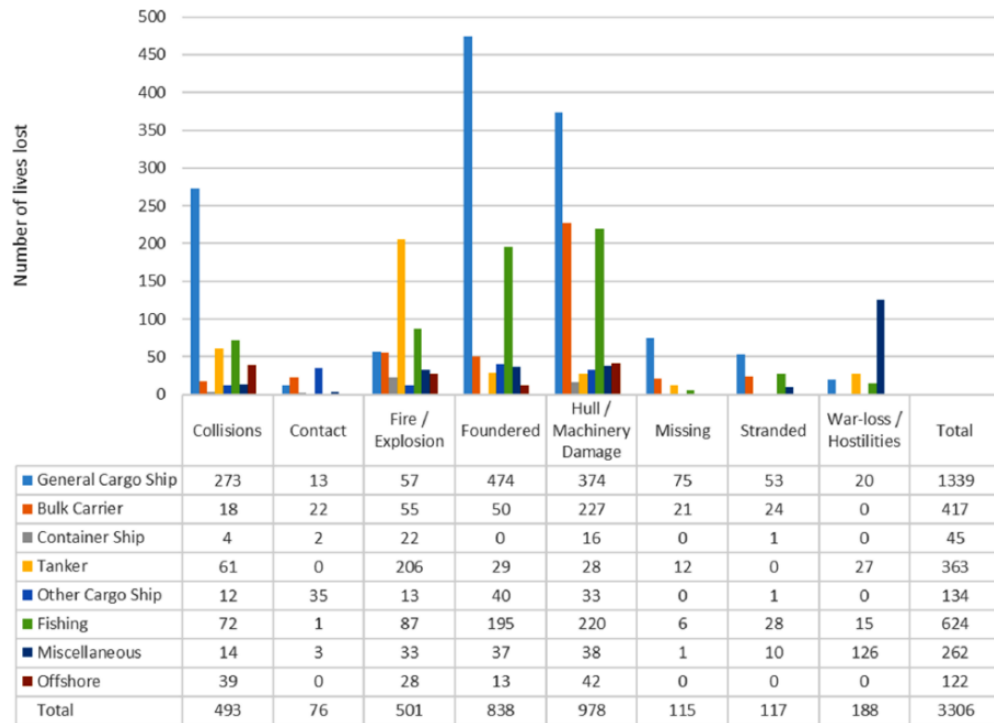


Εικόνα 23: Τα σοβαρά ατυχήματα στη θάλασσα, κατανεμημένα ανά τύπο πλοίου και κατηγορία ατυχήματος (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Παράλληλα, στην Εικόνα 24 παρουσιάζεται ο αριθμός των θυμάτων (νεκρών ή αγνοουμένων) ανά κατηγορία ατυχήματος και τύπο πλοίου. Κατά την περίοδο 2000-2018, καταγράφηκαν συνολικά 3.306 θάνατοι. Παρόλο που στην Εικόνα 24 δεν είναι διακριτός ο διαχωρισμός στους θανάτους, τα δεδομένα δείχνουν ότι το 83% των θανάτων συνδέεται με πλοία που καταστράφηκαν/χάθηκαν ολοσχερώς λόγω του ατυχήματος. Εξαιρέση αποτελούν τα περιστατικά φωτιάς ή έκρηξης, όπου μόνο το 42% των θανάτων συνδέεται με πλοία που καταστράφηκαν/χάθηκαν ολοσχερώς.

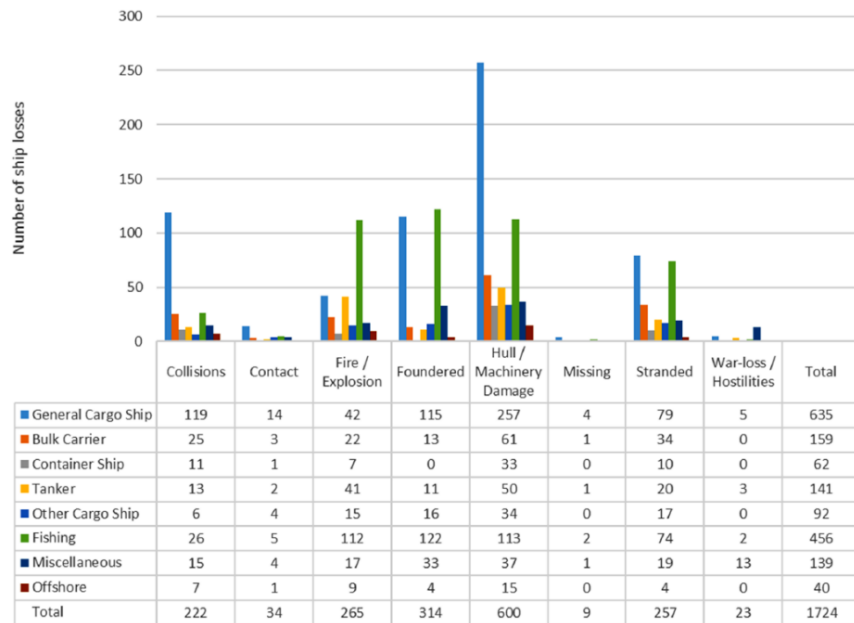
Συγκρίνοντας τις Εικόνα 23 και Εικόνα 24, είναι αντιληπτό ότι τα πιο θανατηφόρα ατυχήματα δεν είναι απαραίτητα και τα πιο συχνά εμφανιζόμενα. Για παράδειγμα, τα ατυχήματα της κατηγορίας «Βύθιση» είναι σχετικά σπάνια, αλλά

ευθύνονται για σημαντικές ανθρώπινες απώλειες (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).



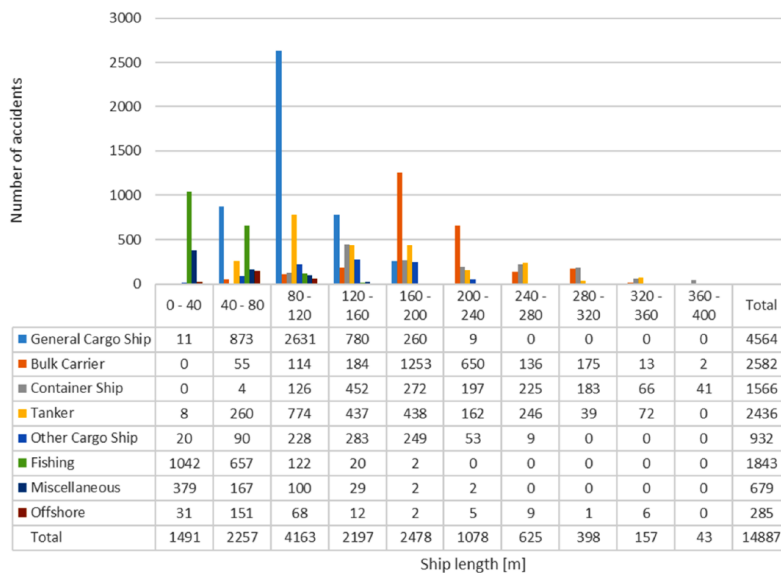
Εικόνα 24: Οι απώλειες ζωών συναρτήσει του τύπου πλοίου και της κατηγορίας του ατυχήματος (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Μια ακόμη περίπτωση που εξετάστηκε από τους de Vos, Hekkenberg και Valdez Banda (2021) είναι η απώλεια των πλοίων συναρτήσει της κατηγορίας του ατυχήματος και του τύπου του πλοίου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 25, τα φορτηγά πλοία (general cargo ships) είναι αυτά που αγνοούνται συχνότερα, γεγονός που εξηγεί και την υψηλή θνησιμότητα που παρατηρείται στην Εικόνα 24. Παράλληλα, στα δεξαμενόπλοια (tankers), οι περισσότερες απώλειες ζωών σχετίζονται με περιστατικά φωτιάς ή έκρηξης, κάτι που είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι αυτά τα πλοία μεταφέρουν συνήθως εύφλεκτες ουσίες.

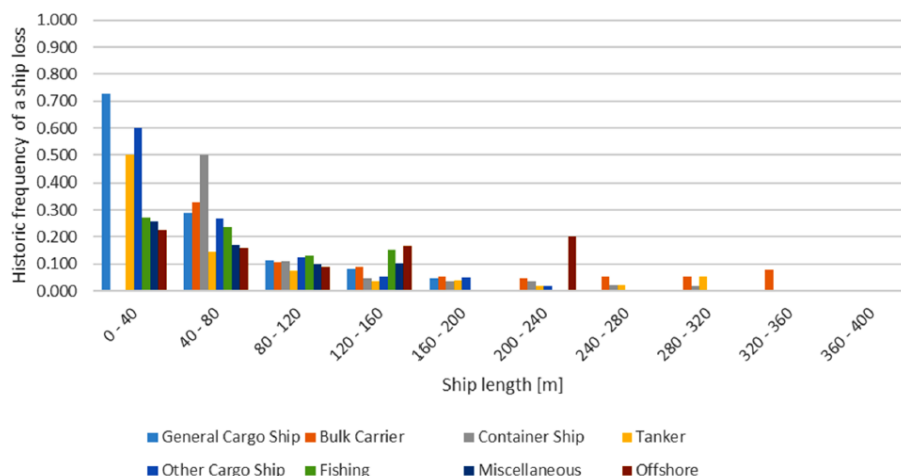


Εικόνα 25: Οι απώλειες πλοίων ανά κατηγορία ατυχήματος και τύπο πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

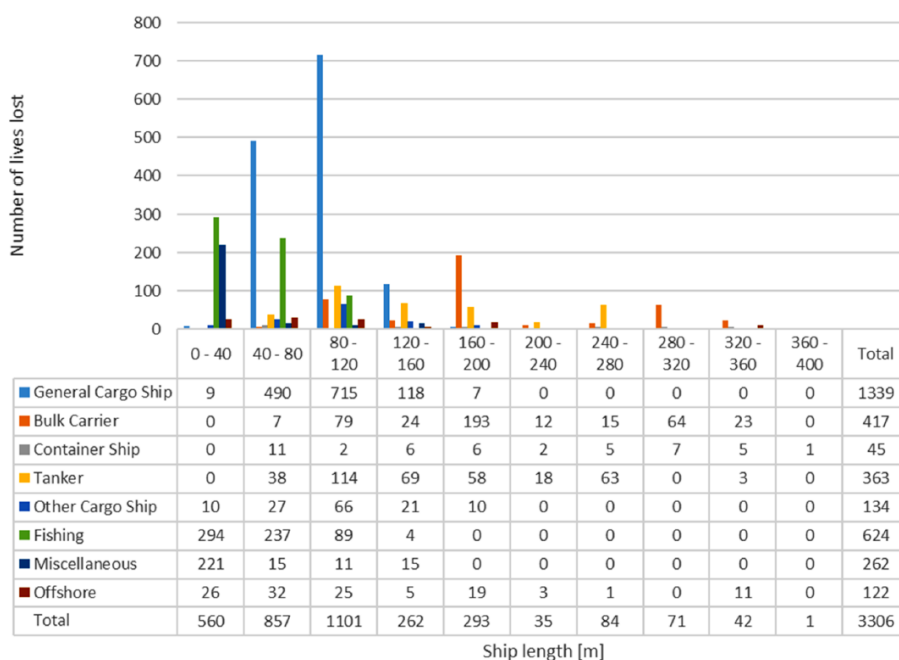
Στη συνέχεια παρατίθενται τα κάτωθι ραβδογράμματα στις Εικόνα 26, Εικόνα 27 και Εικόνα 28, όπου το μήκος του πλοίου εξετάζεται ως μία επιπλέον παράμετρος.



Εικόνα 26: Τα ατυχήματα στη θάλασσα συναρτήσει του τύπου και μήκους του πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).



Εικόνα 27: Η συχνότητα απώλειας των πλοίων συναρτήσει του μήκους και του τύπου του εμπλεκόμενου πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).



Εικόνα 28: Οι απώλειες ζωών ανά τύπο και μήκος του πλοίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται και από τα παραπάνω ραβδογράμματα, το μήκος των πλοίων επηρεάζει την πιθανότητα εμπλοκής τους σε ατυχήματα και τη συχνότητα απώλειας των σκαφών, αλλά και των ζωών. Ειδικότερα, για τα

μικρότερα πλοία έχουν καταγραφεί τα περισσότερα σχετικά περιστατικά (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

4.3.2 Η προβλεπόμενη συμβολή της αυτονομίας στη βελτίωση της ασφάλειας

Στην ερευνά τους, οι de Vos, Hekkenberg και Valdez Banda (2021) μελέτησαν έξι διαφορετικά σενάρια, τα οποία παρουσιάζονται στην Εικόνα 29. Σε κάθε σενάριο έχει αποδοθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός αναφοράς, ο οποίος χρησιμοποιείται για διευκόλυνση στο κείμενο παρακάτω.

	All cargo ships <120 m autonomous	All cargo ships autonomous	All ships autonomous
Ship becomes completely unmanned, but autonomy has no influence on number of accidents	1	2	3
Autonomy decreases number of navigation- related accidents by X%, but no significant reduction in crewing level	4	5	6

Εικόνα 29: Τα έξι σενάρια που εξετάστηκαν (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Η πρώτη διάκριση μεταξύ των έξι σεναρίων αφορά στην επίδραση της αυτονομίας στον αριθμό των ατυχημάτων και στα επίπεδα στελέχωσης των πλοίων. Είναι δύσκολο να προβλεφθεί εάν η αυτονομία θα μειώσει τον αριθμό των ναυτικών ατυχημάτων. Ωστόσο, η μείωση του αριθμού του πληρώματος θα οδηγήσει εκ του αποτελέσματος σε λιγότερες ανθρώπινες απώλειες, συμβάλλοντας έτσι στη βελτίωση της ασφάλειας στη θάλασσα. Τα σενάρια 1, 2 και 3 επικεντρώνονται σε αυτή την υπόθεση, θεωρώντας ότι τα αυτόνομα πλοία θα είναι μη επανδρωμένα, αλλά ο αριθμός των ναυτικών ατυχημάτων θα παραμείνει παρόμοιος με αυτόν που παρατηρείται στα συμβατικά πλοία. Εν αντιθέσει, τα

σενάρια 4, 5 και 6 υποθέτουν ότι τα αυτόνομα συστήματα θα μειώσουν τον αριθμό των ατυχημάτων που σχετίζονται με την πλοήγηση (όπως συγκρούσεις, επαφές και προσaráξεις), χωρίς όμως να σημειωθεί σημαντική μείωση στα επίπεδα στελέχωσης (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021). Αναμένεται δηλαδή ότι η αυτοματοποίηση της πλοήγησης θα έχει περιορισμένη επίδραση στη μείωση των επιπέδων στελέχωσης (Kooij & Hekkenberg, 2019). Ως εκ τούτου, ενώ η ασφάλεια της πλοήγησης των αυτόνομων πλοίων μπορεί να βελτιωθεί, ο αριθμός των μελών του πληρώματος πιθανότατα θα παραμείνει σχεδόν αμετάβλητος (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Επιπλέον, τα έξι σενάρια διακρίνονται και ανάλογα με τους τύπους των πλοίων που θα μετατραπούν σε αυτόνομα. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη περίπτωση αφορά μόνο σε μικρά φορτηγά πλοία με μήκος μικρότερο από 120 μέτρα, τα οποία θα μετατραπούν σε πλήρως αυτόνομα και μη επανδρωμένα. Αυτό το εγχείρημα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί, καθώς σε αυτά τα πλοία το πλήρωμα αντιπροσωπεύει μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους συγκριτικά με τα μεγάλα πλοία, ενώ η αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων του με αυτόνομα είναι λιγότερο δαπανηρή. Η δεύτερη περίπτωση θεωρεί ότι όλα τα φορτηγά πλοία θα γίνουν μη επανδρωμένα. Παράλληλα, η τρίτη περίπτωση υποθέτει ότι όλα τα πλοία, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων γενικής υποστήριξης και των αλιευτικών σκαφών, θα μετατραπούν σε μη επανδρωμένα, παρά το γεγονός ότι οι εργασίες που εκτελούνται σε αυτά τα πλοία είναι πιο περίπλοκο να αυτοματοποιηθούν σε σύγκριση με τα φορτηγά πλοία. Αυτό αποτελεί σημαντικό λόγο για να μην επενδυθούν κεφάλαια για την μετατροπή των πλοίων αυτών σε αυτόνομα.

Στα σενάρια 1, 2 και 3 θεωρείται ότι οι ζημιές στο πλοίο και στο φορτίο του παραμένουν αμετάβλητες, ενώ παρατηρείται μείωση μόνο στον αριθμό των ανθρώπινων ζωών που χάνονται. Στα σενάρια 4, 5 και 6 εξετάζονται τα αποτελέσματα της αυτόνομης πλοήγησης, χωρίς όμως να προκύπτει σημαντική μείωση του επιπέδου στελέχωσης στα πλοία αυτά. Αυτό οδηγεί σε λιγότερα ατυχήματα που σχετίζονται με την πλοήγηση, γεγονός που με τη σειρά του μειώνει την απώλεια ανθρώπινων ζωών και τον αριθμό των πλοίων που χάνονται.

Για κάθε σενάριο υπολογίζεται η μείωση που αναμένεται στον αριθμό των ζώων και των πλοίων που χάνονται, αναδεικνύοντας έτσι τη συμβολή της αυτονομίας στη βελτίωση της ασφάλειας.

Ειδικότερα, η μελέτη έδειξε ότι με την πλήρη αυτοματοποίηση των μικρών φορτηγών πλοίων με μήκος μικρότερο των 120 μέτρων (Σενάριο 1), που αντιπροσωπεύουν το 23% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου, οι ανθρώπινες απώλειες θα μπορούσαν να μειωθούν κατά 47,4%. Αν όλα τα φορτηγά πλοία (περιλαμβανομένων των bulk carriers) μετατραπούν σε μη επανδρωμένα (Σενάριο 2), το ποσοστό μείωσης μπορεί να φτάσει το 69,5%. Επιπρόσθετα, εάν όλα τα πλοία μετατραπούν σε αυτόνομα (Σενάριο 3), οι ανθρώπινες απώλειες θα εκμηδενιστούν σχεδόν.

Στην περίπτωση που η στελέχωση στα πλοία παραμένει ίδια, το μέγιστο όφελος στην ασφάλεια μπορεί να επιτευχθεί με την εξάλειψη όλων των ατυχημάτων που σχετίζονται με την πλοήγηση και αφορούν τα μικρά φορτηγά πλοία με μήκος μικρότερο των 120 μέτρων (Σενάριο 4). Αυτό θα οδηγούσε σε μείωση κατά 14,2% στις απώλειες πλοίων, διασώζοντας δηλαδή περίπου 13 πλοία ετησίως. Οι ανθρώπινες απώλειες θα μειώνονταν ακολούθως κατά 12,8%. Αν αυτή η στρατηγική επεκταθεί σε όλα τα φορτηγά πλοία (Σενάριο 5), η απώλεια των πλοίων θα μειωθεί κατά 20,8%, ενώ οι ανθρώπινες απώλειες θα μειωθούν κατά 15,7%. Στην περίπτωση που η ίδια στρατηγική εφαρμοστεί αυτή τη φορά σε ολόκληρο το στόλο (Σενάριο 6), η μείωση στην απώλεια πλοίων θα ανέλθει σε 29,8% για τα πλοία και 20,8% για τις ανθρώπινες απώλειες αντίστοιχα.

Τα σενάρια 1, 2 και 3 αξιολογούν το πώς θα βελτιωθεί η ασφάλεια στην περίπτωση πλήρους αυτονομίας των πλοίων. Περίπου το 50% των ανθρώπινων απωλειών συνδέεται με μικρά φορτηγά πλοία. Για να περιοριστούν περαιτέρω οι απώλειες, η αυτονομία θα πρέπει να επεκταθεί και στα μεγαλύτερα φορτηγά πλοία, στα πλοία γενικής υποστήριξης και στα αλιευτικά σκάφη (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021). Ωστόσο, η πλήρης αυτοματοποίηση αυτών των πλοίων είναι πιο δαπανηρή και δύσκολη λόγω του μεγαλύτερου αριθμού πληρώματος και της πολυπλοκότητας των εργασιών, συγκριτικά με τα μικρά φορτηγά πλοία. Πιο συγκεκριμένα, στα πλοία γενικής υποστήριξης και στα αλιευτικά σκάφη, αρκετές

εργασίες που χειρίζεται το πλήρωμα, μπορεί να είναι πιο δύσκολο να εκτελεστούν από ένα αυτόνομο σύστημα (Chaal et al., 2020). Τοιουτοτρόπως, ειδικά για τα πλοία γενικής υποστήριξης και τα αλιευτικά σκάφη, η αφαίρεση του πληρώματος αποτελεί μία μεγαλύτερη πρόκληση.

Συμπληρωματικά, ο CEO της Maersk, Søren Skou, έχει δηλώσει ότι τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων δεν αναμένεται να γίνουν σύντομα αυτόνομα και ότι η πλήρης αυτονομία έχει περιοριστεί αρχικά στα μικρότερα πλοία (World Maritime News, 2018). Όσον αφορά στο επιπρόσθετο όφελος στην ασφάλεια που προκύπτει από την αυτοματοποίηση των μεγάλων αυτόνομων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αυτό είναι μικρό, δεδομένου ότι τα θανατηφόρα ατυχήματα είναι σπάνια σε αυτά τα πλοία. Επομένως, το προαναφερθέν όφελος δεν αποτελεί επαρκή λόγο για να επενδύσει κανείς σε μεγάλα αυτόνομα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, ενισχύοντας έτσι και την άποψη του Skou (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Στα σενάρια 4, 5 και 6 εξετάζεται κατά πόσο μειώνονται μέσω της αυτονομίας τα ατυχήματα που σχετίζονται με την πλοήγηση. Οι υπόλοιπες κατηγορίες ατυχημάτων θεωρείται ότι δεν επηρεάζονται. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ατυχήματα που σχετίζονται με την πλοήγηση αποτελούν το 44% των σοβαρών ναυτικών ατυχημάτων, το 30% των περιπτώσεων απώλειας πλοίων και το 21% των ανθρώπινων απωλειών. Συνεπώς, το μέγιστο δυνατό όφελος στην ασφάλεια για αυτά τα σενάρια θα ήταν οι απώλειες πλοίων να μειωθούν έως και 30% και οι ανθρώπινες απώλειες έως 21%. Ωστόσο, αυτό απαιτεί αυτόνομα συστήματα πλοήγησης που λειτουργούν με απόλυτη ακρίβεια. Κλείνοντας την αξιολόγηση αυτών των τριών σεναρίων, αν και σχεδόν το μισό του συνόλου των ατυχημάτων σχετίζεται με την πλοήγηση, αυτά δεν είναι τα πιο σοβαρά ατυχήματα.

Τέλος, για τα σενάρια που παρουσιάστηκαν, το μέγιστο δυνατό όφελος στην ασφάλεια παραμένει ακόμη αβέβαιο, καθώς δεν είναι σαφές πόσα ατυχήματα που σχετίζονται με την πλοήγηση μπορούν να αποφευχθούν χάρη στην αυτονομία. Οι εκτιμήσεις δίνονται ως ένα εύρος και κυμαίνονται από 0% έως 100%, υπογραμμίζοντας την ανάγκη περαιτέρω έρευνας και τεχνολογικής ανάπτυξης. Ως εκ τούτου, οι μειώσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 δίνονται επίσης ως

εύρος. Ήδη, το μισό αυτών των μειώσεων μπορεί να επιτευχθεί αν μόνο τα μικρά φορτηγά πλοία μετατραπούν σε αυτόνομα (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Scenario	Percentage of the fleet that is affected	Reduction in ship losses		Reduction in lives lost	
		Percentage	Ships saved per year	Percentage	Lives saved per year
1 – small cargo ships become unmanned	23%	n/a	n/a	47.4%	83
2 – all cargo ships become unmanned	50%	n/a	n/a	69.5%	121
3 – all ships become unmanned	100%	n/a	n/a	100%	174
4 – reduced number of accidents for small cargo ships	23%	0% – 14.2%	0 – 13	0% – 12.8%	0 – 22
5 – reduced number of accidents for cargo ships	50%	0% – 20.8%	0 – 19	0% – 15.7%	0 – 27
6 – reduced number of accidents for all ships	100%	0% – 29.8%	0 – 27	0% – 20.8%	0 – 36

Πίνακας 7: Τα ευρήματα κάθε σεναρίου (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Συγκρίνοντας τα πρώτα τρία σενάρια με τα επόμενα τρία, και στις δύο τριάδες παρουσιάζεται σημαντική βελτίωση στην ασφάλεια χάρη στην αυτονομία. Η εισαγωγή αυτόνομων συστημάτων πλοήγησης δύναται να μειώσει τον αριθμό των ατυχημάτων και να σώσει ζωές, υπό την προϋπόθεση ότι αυτά τα συστήματα θα αποδειχθούν όντως ικανά να μειώσουν σημαντικά τα εν λόγω περιστατικά. Η πλήρης μετατροπή των πλοίων σε μη επανδρωμένα θα οδηγήσει σίγουρα σε σημαντική μείωση των ανθρώπινων απωλειών στη θάλασσα.

Συνεπώς, οι προσπάθειες που καταβάλλονται για την ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων πλοήγησης κρίνονται ως εξαιρετικά σημαντικές. Παρ' όλα αυτά, δεδομένου ότι η αυτόνομη πλοήγηση αφορά μόνο ένα μέρος των λειτουργιών ενός πλοίου και αφαιρεί σχετικά μικρό αριθμό ατόμων από το πλήρωμα, υπογραμμίζεται η ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις που θα επιτρέψουν την ασφαλή πλήρη απομάκρυνση του πληρώματος από όλες τις λειτουργίες του πλοίου. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται έρευνα βασισμένη στο σχεδιασμό με γνώμονα την ασφάλεια (safety-by-design). Δεδομένου ότι το πλήρωμα δεν θα είναι πλέον διαθέσιμο για να επιλύει όσα προβλήματα μπορεί να προκύψουν, ο σχεδιασμός των αυτόνομων πλοίων πρέπει να διασφαλίζει ότι τα συστήματα είναι απόλυτα αξιόπιστα και ασφαλή, αποτρέποντας πιθανές αστοχίες (de Vos, Hekkenberg & Valdez Banda, 2021).

Η κατεύθυνση αυτή υπογραμμίζει την ανάγκη για τεχνολογικές καινοτομίες, καθώς και την ανάπτυξη πρωτοκόλλων ασφαλείας που θα διασφαλίζουν την επιτυχή και αποδοτική λειτουργία των μη επανδρωμένων πλοίων, τόσο για την πρόληψη ατυχημάτων όσο και για τη διαχείριση κρίσεων χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

4.4 Ανθρώπινοι παράγοντες και οι σχετικές προκλήσεις στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα

Το 2020 μόνο, αναφέρθηκαν συνολικά 2632 ατυχήματα, στα οποία καταγράφηκαν 36 θάνατοι και 618 τραυματισμοί, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Ασφάλεια στη Θάλασσα (European Maritime Safety Agency ή EMSA). Περίπου το 43% των ατυχημάτων αποδίδεται σε συμβάντα που σχετίζονται με την πλοήγηση, όπως συγκρούσεις, προσaráξεις και άλλα παρόμοια περιστατικά (EMSA, 2021).

Σύμφωνα με τον EMSA (2018), τα MASS (Maritime Autonomous Surface Ships) έχουν τη δυνατότητα να εξαλείψουν τα ανθρώπινα σφάλματα, τα οποία ευθύνονται για το 65,8% των ατυχημάτων στην Ευρώπη κατά την περίοδο 2011-2018. Ωστόσο, ανεξάρτητα από τον βαθμό αυτονομίας ενός συστήματος, οι άνθρωποι

παράγοντες συνεχίζουν να υφίστανται (Ahvenjärvi, 2016; Veitch, Hynnekleiv & Lützhöft, 2020; Porathe, Prison & Man, 2014). Οι άνθρωποι θα συνεχίσουν να εμπλέκονται σε διάφορες φάσεις των λειτουργιών ενός αυτόνομου συστήματος, όπως ο σχεδιασμός (Valdez Banda et al., 2019), η συντήρηση (Chae, Kim & Kim, 2020) και η επίλυση προβλημάτων (Wrobel, Gil & Chae, 2021).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, οι Man, Lundh και Porathe (2014) χρησιμοποίησαν ειδικές μεθόδους για την αναγνώριση των ανθρώπινων παραγόντων που εμπλέκονται στον απομακρυσμένο έλεγχο των πλοίων. Οι Zhang et al. (2020) ανέπτυξαν πιθανολογικά μοντέλα για την αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων και των αυτόνομων συστημάτων. Οι Ramos et al. (2019) εξέτασαν τις διαδράσεις μεταξύ των καθηκόντων που εκτελούν οι απομακρυσμένοι χειριστές. Παράλληλα, οι Man et al. (2018) διερεύνησαν μέσω προσομοιώσεων τον τρόπο με τον οποίο οι ναυτικοί διαχειρίζονται την απομακρυσμένη εποπτεία και τον απομακρυσμένο έλεγχο των πλοίων. Παρόμοιες έρευνες πραγματοποιήθηκαν και από τους Baldauf et al. (2019), ενώ οι Fan et al. (2020) εξέτασαν τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την πλοήγηση ενός αυτόνομου πλοίου κατά τα διάφορα στάδια του ταξιδιού του. Η ασφάλεια των MASS είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τους ανθρώπινους παράγοντες, όπως π.χ. την εκπαίδευση του πληρώματος, την εξάρτηση του ανθρώπινου χειριστή από τους αυτοματισμούς και το σχεδιασμό συστημάτων με γνώμονα τον άνθρωπο (Dreyer & Oltedal, 2019).

4.4.1 Η εκπαίδευση του πληρώματος

Η ανάγκη συνεχούς κατάρτισης των ναυτικών, των απομακρυσμένων χειριστών, των ναυπηγών, των τεχνικών και των μηχανικών αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις. Η συνεχής διεύρυνση των γνώσεων είναι αναγκαία, αλλά και απαιτητική (Dreyer & Oltedal, 2019). Οι Hogg και Ghosh (2016) υποστηρίζουν ότι απαιτούνται νέες δεξιότητες, τονίζοντας συγχρόνως την απουσία σχετικών κανονισμών. Παράλληλα, εκφράζουν έντονη ανησυχία σχετικά με το πώς οι

μελλοντικοί χειριστές των MASS θα αποκτήσουν πρακτική εμπειρία στη θάλασσα, δεδομένου ότι οι ευκαιρίες εργασίας εν πλω θα μειωθούν δραματικά στο μέλλον.

4.4.2 Η εξάρτηση του ανθρώπινου χειριστή από τους αυτοματισμούς

Ένα αξιόπιστο αυτόνομο σύστημα ενός MASS ενδέχεται να προκαλέσει την υπερβολική εξάρτηση του χειριστή από τους αυτοματισμούς, με συνέπεια να χαθεί η απαραίτητη επαγρύπνηση. Επιπλέον, η χρήση των MASS μπορεί να καταστήσει τον χειριστή ανίκανο να αναλάβει γρήγορα και αποτελεσματικά τον έλεγχο του πλοίου σε περιπτώσεις αστοχίας του αυτόνομου συστήματος (Dreyer & Olstedal, 2019). Οι Man et al. (2018) τονίζουν ότι από τη φύση τους οι άνθρωποι δεν είναι κατάλληλοι να λειτουργούν ως εφεδρικοί χειριστές σε αυτόνομα συστήματα. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή των MASS μπορεί να οδηγήσει σε φθορά των δεξιοτήτων (skill degradation) των απομακρυσμένων χειριστών, λόγω έλλειψης εξάσκησης τους (Dreyer & Olstedal, 2019).

4.4.3 Σχεδιασμός συστημάτων με γνώμονα τον άνθρωπο

Ο σχεδιασμός των αυτόνομων συστημάτων με επίκεντρο τον χρήστη ενισχύει την ικανότητα του χειριστή να διατηρεί την επίγνωση της κατάστασης του πλοίου. Ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η διάθεση όλων των απαραίτητων δεδομένων στο χειριστή, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Σε περιπτώσεις έκτακτων και ανεπιθύμητων καταστάσεων, οι αυτοματισμοί ενδέχεται να μην παρέχουν πληροφορίες για την πραγματική κατάσταση των συστημάτων, καθιστώντας τον χειριστή ευάλωτο σε λάθη και αστοχίες (Man et al., 2018; Dreyer & Olstedal, 2019). Ο χειριστής μπορεί να αδυνατεί να λάβει σωστές αποφάσεις λόγω υπερπληροφόρησης ή/και κακής προτεραιοποίησης των εντολών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμο ένα κεντρικό σύστημα παρακολούθησης συναγερμών, το οποίο θα προτεραιοποιεί τα διάφορα εκκρεμή ζητήματα με το βέλτιστο τρόπο (Wrobel, Montewka & Kujala, 2017; Dreyer & Olstedal, 2019).

4.4.4 Μείωση των ανθρώπινων σφαλμάτων

Τα παραδοσιακά συστήματα βασίζονται κυρίως στην ανθρώπινη καθοδήγηση, με αποτέλεσμα το 75-96% των ναυτικών ατυχημάτων και δυστυχημάτων να αποδίδεται σε ανθρώπινα λάθη (Antão & Guedes Soares, 2008). Επειδή οι περισσότερες εσφαλμένες ενέργειες των ανθρώπων έχουν οδηγήσει σε απώλειες ζωών και περιβαλλοντικές καταστροφές, η αντικατάσταση των ανθρώπων με ένα ευφυές σύστημα λήψης αποφάσεων για την πλοήγηση και την αποφυγή συγκρούσεων θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τα ατυχήματα και τις σχετικές με αυτά απώλειες (Perera, Carvalho & Guedes Soares, 2009).

4.5 Απειλές στον Κυβερνοχώρο

Τη στιγμή που τα αυτόνομα πλοία διατηρούν το ανθρώπινο δυναμικό των πλοίων ασφαλές, η απουσία ενεργού πληρώματος προκαλεί νέους κινδύνους. Στην εποχή της μη επανδρωμένης ναυτιλίας, θα ήταν αφελές να περιμένουμε ότι οι ήδη υπάρχουσες πειρατικές και τρομοκρατικές ενέργειες θα περιοριστούν και τελικά θα εξαφανιστούν. Τουναντίον, τα μη επανδρωμένα πλοία πιθανόν να θεωρηθούν ως εύκολοι στόχοι κλοπής του φορτίου ή ακόμη και εξ ολοκλήρου κατάληψής τους, με απώτερο σκοπό τη διεκδίκηση λύτρων ή τη διενέργεια τρομοκρατικών ενεργειών. Μάλιστα, πλοία που μεταφέρουν εκρηκτικά, εύφλεκτα ή τοξικά υλικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως όπλα από τρομοκράτες. Η καθολική ψηφιακή υποδομή και η λειτουργία των πλοίων αυτών από συστήματα αυτοματισμού και τεχνητής νοημοσύνης, τα καθιστούν πολύ πιο ευάλωτα σε πειρατικές ενέργειες. Το φαινόμενο της αυτοματοποίησης έχει παρατηρηθεί, άλλωστε, και στα συμβατικά πλοία, στα οποία όλο και περισσότερες διαδικασίες εκτελούνται βασισμένες σε συστήματα αυτοματισμού. Έτσι, δεν είναι αξιοπερίεργο το γεγονός ότι οι ναυτιλιακές εταιρείες εκφράζουν διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον στον τομέα της κυβερνοασφάλειας, φαινόμενο που αναμένεται να γίνει σαφώς πιο έντονο με την άνθιση στα αυτόνομα πλοία. Για τους ανωτέρω λόγους, η ανάπτυξη

νέων και καινοτόμων μεθόδων προστασίας των πλοίων ενάντια σε κυβερνοεπιθέσεις κρίνεται υψίστης σημασίας για την ομαλή λειτουργία τους και γενικά την υπεράσπισή τους (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

Γνωρίζοντας ότι οι δύο βασικές κατηγορίες της ναυτιλιακής βιομηχανίας είναι οι λιμενικές εγκαταστάσεις και τα πλοία, θα επικεντρωθούμε στα ψηφιακά συστήματά τους, τα οποία ενδέχεται να στοχεύσουν οι κακόβουλοι χρήστες, λόγω της ευπάθειας που παρουσιάζουν (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

Box: Ορισμός ευπάθειας εφαρμογής

Ευπάθεια (vulnerability) μιας εφαρμογής ή ενός συστήματος ορίζεται ως μια αδυναμία ή ατέλεια στο σχεδιασμό, την υλοποίηση ή τη λειτουργία της/του, η οποία επιτρέπει σε έναν επιτιθέμενο (χάκερ ή κακόβουλο χρήστη) να εκμεταλλευτεί αυτήν την αδυναμία και να προκαλέσει ζημιά ή να αποκτήσει μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε απόρητες πληροφορίες (Yoo & Park, 2021).

Μια ευπάθεια μπορεί να προκύψει από διάφορους παράγοντες, όπως:

1. **Σφάλματα στον Κώδικα (Bugs):** Λάθη στον προγραμματισμό που καθιστούν την εφαρμογή ευάλωτη σε επιθέσεις.
2. **Αδύναμος Σχεδιασμός:** Η έλλειψη ασφαλών σχεδιαστικών πρακτικών που ενδέχεται να δημιουργήσουν αδυναμίες για κακόβουλη εκμετάλλευση.
3. **Ανεπαρκής Επικύρωση Δεδομένων:** Εάν μια εφαρμογή δεν ελέγχει επαρκώς τα δεδομένα που εισάγονται από τον χρήστη, μπορεί να επιτρέψει επιθέσεις όπως η εκτέλεση κακόβουλου κώδικα.
4. **Ανασφαλείς Αλγόριθμοι Κρυπτογράφησης:** Χρήση αδύναμων αλγορίθμων κρυπτογράφησης ή ακόμα και έλλειψη κρυπτογράφησης ευαίσθητων δεδομένων.
5. **Ανεπαρκής Διαχείριση Συσκευών και Πρόσβασης:** Η ανεπαρκής διαχείριση των δικαιωμάτων χρηστών ή η έλλειψη ασφαλών πολιτικών πρόσβασης σε συστήματα και δεδομένα.

Όταν υπάρχει η δυνατότητα παραβίασης της ασφάλειας, θεωρείται απειλή. Ο πιθανός κίνδυνος εκμετάλλευσης μιας ευπάθειας του συστήματος που συνδέεται με τη χρήση δικτύου ονομάζεται κυβερνοαπειλή. Μια κυβερνοαπειλή χαρακτηρίζεται ως σκόπιμη όταν εκτελούνται εκ προθέσεως, είτε από εγκληματικές οργανώσεις, είτε από μεμονωμένους φορείς. Από την άλλη, ακούσιες είναι οι απειλές που προκύπτουν από δυσλειτουργίες υπολογιστών ή φυσικές καταστροφές όπως σεισμοί, πυρκαγιές, πλημμύρες, ανεμοστρόβιλοι. Το Διαδίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο διαφορετικών συσκευών, συνδεδεμένων μέσω ενός αυξανόμενου αριθμού δικτύων και υπηρεσιών. Ευπάθειες παρατηρούνται σε όλους τους τομείς – το λογισμικό (software), το υλισμικό (hardware), τα πρωτόκολλα, οι αλγόριθμοι, οι αλυσίδες αξίας (value chains), οι διαδικασίες οργάνωσης και το ανθρώπινο δυναμικό περιέχουν παραμέτρους ευπάθειας, οι οποίες χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη. Πιθανές αδυναμίες κατά το σχεδιασμό μιας εφαρμογής οδηγούν σε εμφάνιση νέων ευπαθειών. Παρά τις εκτενείς προσπάθειες περιορισμού ευπαθειών σε διαδικασίες ασφαλείας, συνεχώς εμφανίζονται αναδυόμενες απειλές, απαιτώντας τη διαρκή επαγρύπνηση και εξέλιξη του εξειδικευμένου προσωπικού κυβερνοασφαλείας (Yoo & Park, 2021).

4.5.1 Οι ευπάθειες των πλοίων

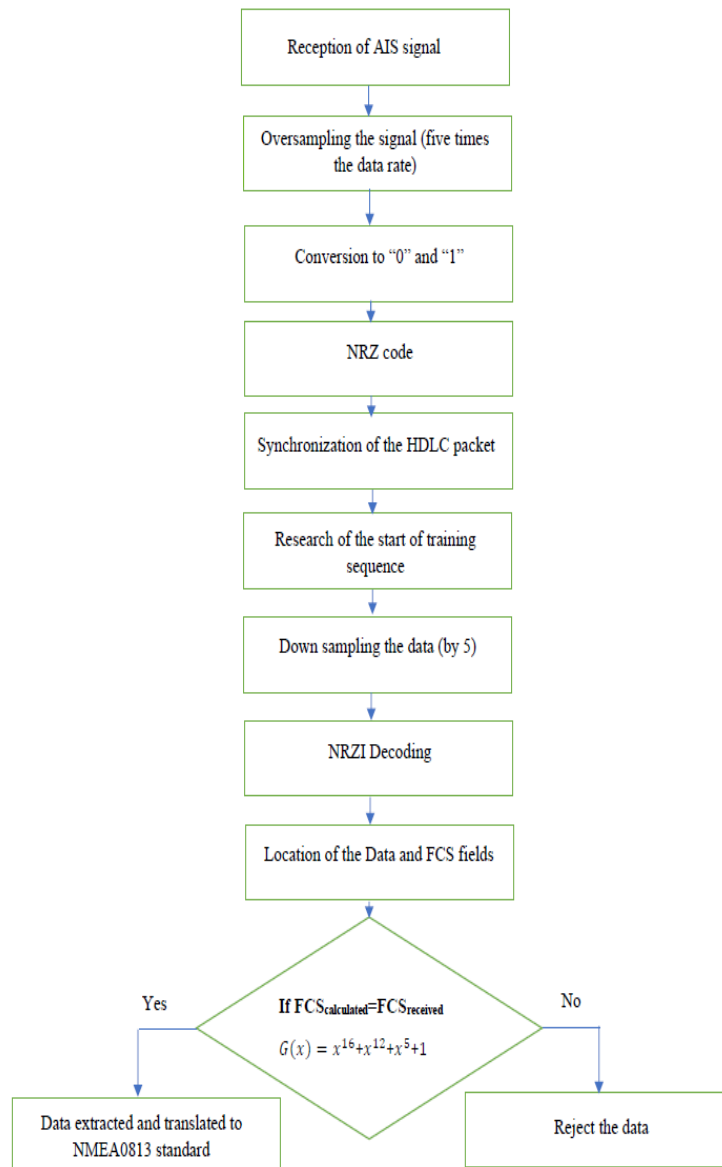
Στα πλοία, διακρίνονται τα ηλεκτρονικά-ηλεκτρομηχανικά συστήματα και τα συστήματα επικοινωνιών που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής σε θέματα κυβερνοασφάλειας. Ως ηλεκτρονικά-ηλεκτρομηχανικά συστήματα θεωρούμε τα συστήματα πρόωσης και ενέργειας, όπως οι προωστήριες μηχανές του πλοίου, το σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικών φορτίων με τους κύριους πίνακες, το Programmable Logic Controllers (PLC), το σύστημα ανίχνευσης εισερχόμενων υδάτων, τα συστήματα που αφορούν τα καύσιμα, τα έλαια, τον αέρα, ενώ ως συστήματα επικοινωνιών θεωρούμε το εσωτερικό σύστημα επικοινωνίας (ασύρματους επικοινωνίας), το διαδίκτυο, το σύστημα πλοήγησης, το Radar, το Electronic Chart Systems (ECDIS) και το Automatic Identification System (AIS) (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

4.5.2 Παραδείγματα κυβερνοεπιθέσεων στα πλοία

Παρακάτω, ακολουθούν ορισμένα παραδείγματα πιθανών κυβερνοεπιθέσεων, με σκοπό την ανάδειξη των σημαντικών επιπτώσεων τους σε διάφορους τομείς της ναυτιλίας. Μία επικίνδυνη επίθεση με μεγάλο αντίκτυπο στα αυτόνομα πλοία αφορά το αυτοματοποιημένο σύστημα ενδείξεων τοποθεσιών τους (automated indicator sharing, AIS). Το διάγραμμα ροής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 30 απεικονίζει τα βήματα επεξεργασίας σήματος για το AIS, παρέχοντας τη δυνατότητα αναγνώρισης ευάλωτων σημείων και της ενδεχόμενης προσέγγισης των επιθέσεων από κακόβουλους χρήστες (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

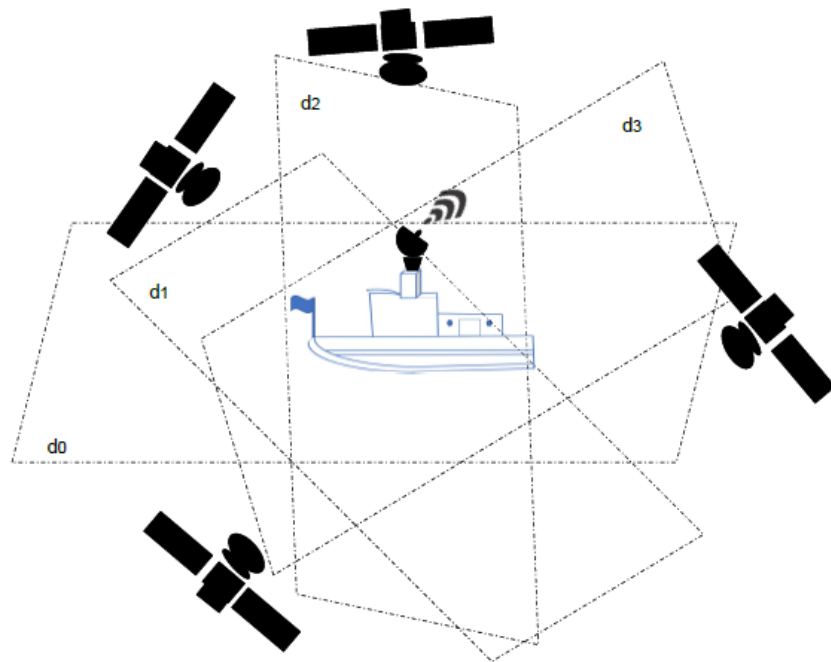
Η αναγνώριση της πληροφορίας πραγματοποιείται υπολογίζοντας και αφαιρώντας την ακολουθία ελέγχου πλαισίου (frame check sequence, FCS) χρησιμοποιώντας μία πολυωνυμική εξίσωση ελέγχου κυκλικής επανάληψης 6-bit του ITU-T (6-bit ITU-T cyclic redundancy check, CRC). Η συγκεκριμένη διαδικασία δηλαδή, είναι η μέθοδος προστασίας του απεσταλμένου σήματος χρησιμοποιώντας πρόσθετα ψηφία, γνωστά μόνο ύστερα από τη χρήση του CRC.

Έτσι, υπάρχει ένας συνδυασμός των πληροφοριών και του FCS, τον οποίο αν τον κατανοήσει ο κακόβουλος χρήστης μπορεί να μεταδώσει μήνυμα στην κατάλληλη ραδιοφωνική συχνότητα του δέκτη AIS και να εκτελέσει με επιτυχία μια επίθεση παραπλάνησης (spoofing), η οποία ενδέχεται να οδηγήσει σε σύγκρουση μεταξύ πλοίων (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).



Εικόνα 30: Αποκωδικοποιητής AIS (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

Άλλος στόχος κυβερνοεπιθέσεων πιθανόν να είναι το παγκόσμιο σύστημα δορυφορικής πλοήγησης (global navigation satellite systems, GNSS) ενός πλοίου: Το GPS (ΗΠΑ), το GLONASS (Ρωσία), το Galileo (ΕΕ) και το BeiDou (Κίνα) ανήκουν όλα στην κατηγορία των GNSS. Οι κυβερνοεπιθέσεις στα GNSS διευκολύνονται λόγω της ελλείψεως αυθεντικοποίησης και κρυπτογράφησης, καθιστώντας το σύστημα αρκετά ευάλωτο σε παραβιάσεις (Oligeri, Sciancalepore & Di Pietro, 2020). Ψευδείς πληροφορίες θέσεων αυξάνουν σημαντικά την πιθανότητα συγκρούσεων με τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα να λαμβάνουν χώρα στη Μαύρη Θάλασσα. Μια επίθεση παραπλάνησης GNSS (spoofing) εκτελείται κυρίως σε δύο βήματα: i) συγχρονισμός με το σήμα του δορυφόρου και στη συνέχεια ii) αύξηση της ισχύος του μεταδιδόμενου σήματος. Η Εικόνα 31 και η εξίσωση μας υποδεικνύουν πως το GPS καθορίζει τη θέση, δηλαδή ότι το πλοίο βρίσκεται ενδιάμεσα από τα d_0 , d_1 , d_2 και d_3 .



Εικόνα 31: Προσδιορισμός θέσης από τους δορυφόρους (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (13)$$

Όπου $i \in [0,3]$ (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

Συμπερασματικά, τα υψηλότερα επίπεδα προστασίας της τοποθεσίας απαιτούνται για την επιτυχή λειτουργία πλοηγώσεως ενός αυτόνομου πλοίου. Συνεπώς, η έρευνα για αξιόπιστη και έγκαιρη ανίχνευση επιθέσεως μέσω παραπλάνησης του GNSS είναι εξαιρετικά εκτενής (Oligeri, Sciancalepore & Di Pietro, 2020; Dobryakova, Lemieszewski & Ochinnikov, 2018). Στην έρευνα των Magiera και Katulski (2015), πολλές μέθοδοι χωρικής επεξεργασίας μελετήθηκαν αλλά το μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει μία μέθοδος ανίχνευσης GNSS βασισμένη σε αποκωδικοποιημένα μηνύματα Ring Alert (IRA) που μεταδίδονται από το δορυφόρο IRIDIUM. Αυτή η μέθοδος διατηρεί μια αποδεκτή πολυπλοκότητα δέκτη και διαθεσιμότητα σήματος δορυφόρου πετυχαίνοντας την ασφαλή μετάδοση πληροφοριών.

4.5.3 Οι ευπάθειες σε περιοχές ελλιμενισμού

Στην περίπτωση μελέτης των λιμένων, μια πληθώρα συστημάτων μπορούν να αποτελέσουν ευπαθή όργανα από κακόβουλες επιθέσεις. Αρχικά, υπάρχουν τα συστήματα ασφάλειας και ελέγχου, όπως ο σαρωτής X-ray, το σύστημα επιτήρησης με κάμερες και το σύστημα ανίχνευσης μετάλλων. Τα ανωτέρω όργανα είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τον έλεγχο εισερχομένων αντικειμένων εντός του λιμένα. Εφόσον κάποιος καταφέρει να παρέμβει στα ανωτέρω συστήματα, έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει αντικείμενα επικίνδυνου χαρακτήρα. Επιπλέον, στόχοι κακόβουλων επιθέσεων πιθανόν να είναι οι ασύρματες συνδέσεις για τη χρήση παροχών και λειτουργικών συστημάτων (π.χ. γερανοί, πυροσβεστικά μέσα, παροχή ηλεκτρικού ρεύματος) και τα ρυμουλκά, τα οποία είναι πιθανό να ελέγχονται μέσω κέντρων ελέγχων ξηράς στο σύντομο μέλλον. Τέλος, όπως και στα πλοία, έτσι και εδώ ένα τμήμα που οφείλουμε να μελετήσουμε είναι το σύστημα επικοινωνιών στα λιμάνια, τόσο σε εσωτερικό επίπεδο όσο και με τα πλοία που προγραμματίζουν να ελλιμενιστούν στο λιμάνι (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset,

Bures, Andonovic & Bellekens, 2022). Πιο αναλυτικά έχουν καταγραφεί οι κάτωθι καταστάσεις που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής:

- **Κατανεμημένη Άρνηση Υπηρεσίας (Distributed Denial of Service, DDoS):** Οι επιθέσεις DDoS είναι παραβατικές ενέργειες που στοχεύουν στην υπερφόρτωση και την αναίρεση λειτουργικότητας του δικτύου. Συγκεκριμένα, ο κακόβουλος χρήστης στοχεύει στη διακοπή της κανονικής λειτουργίας του πληροφοριακού συστήματος του λιμένα κατακλύζοντάς το με τεράστιο όγκο ψεύτικης κίνησης ή αιτημάτων. Ο σκοπός είναι να εξαντληθούν οι διαδικτυακοί πόροι του στοχευόμενου συστήματος, καθιστώντας το μη διαθέσιμο για νόμιμους χρήστες. Ως αποτέλεσμα, επηρεάζονται τόσο οι ναυτιλιακές υπηρεσίες όσο και η δυνατότητα παρακολούθησης των εμπορευμάτων. Ο αντίκτυπος των επιθέσεων DDoS στα ναυτιλιακά συστήματα έχει παρουσιαστεί εκτενώς από τους Bou-Harb, Kaisar και Austin (2017) σε σχετικό συνέδριο με τη χρήση μοντέλων προσομοίωσης. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιελάμβανε ένα πλοίο, έναν ελεγκτή και μία πύλη, με την προσομοιωμένη επίθεση να στοχεύει την επικοινωνία μεταξύ αυτών των στοιχείων (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).
- **Εφοδιαστική Αλυσίδα (Supply chain):** Οι επιθέσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα επικεντρώνονται στη δημιουργία ζητημάτων στο από άκρη σε άκρη δίκτυο (end-to-end network). Η διεθνής ναυτιλία, από την αφετηρία έως τον τελικό προορισμό, βασίζεται σε βασικές διαδικασίες με σκοπό την παρακολούθηση κοντέινερ, την ασφάλεια και τα διεθνή δικαιώματα εξουσιοδότησης. Για παράδειγμα, η επιπτώση μιας τέτοιου τύπου επιθέσεως είναι η επανακαθορισμένη κατεύθυνση ενός κοντέινερ. Η συγκεκριμένη ενέργεια για να πραγματοποιηθεί απαιτεί γνώση της εφοδιαστικής αλυσίδας και των τρωτών σημείων της από τον κακόβουλο χρήστη. Ένα παράδειγμα της ευπάθειας της κυβερνοασφάλειας στην παγκόσμια ναυτιλία και την εφοδιαστική της αλυσίδα αναδείχθηκε πρόσφατα με την κυβερνοεπίθεση στην εταιρεία AP Moller-Maersk, τον Ιούνιο του 2017. Στη συγκεκριμένη περίπτωση διεκόπη η δυνατότητα

διαδικτυακών κρατήσεων και άλλων υπηρεσιών. Έτσι, η εταιρεία προχώρησε σε αναστολή δρομολογίων προκαλώντας ζημία 300 εκατομμυρίων δολαρίων ΗΠΑ (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

- **Κακόβουλο Λογισμικό/Λυτρισμικό/Δούρειοι Ίπποι (Malware/Ransomware/Trojans):** Γενικά, στόχος αυτών των επιθέσεων είναι η πρόκληση ζημιάς στις ηλεκτρονικές συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο εταιρικό δίκτυο. Σε αυτού του είδους τις επιθέσεις, είναι πολύ σημαντικό το πλοίο και το λιμάνι να διαθέτουν στρατηγικές ασφαλείας. Για παράδειγμα, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται διαφορετικά ονόματα χρήστη και κωδικοί πρόσβασης σε κάθε ηλεκτρονική συσκευή, χωρίς να επιτρέπεται σε κανένα σύστημα να αλλάξει μαζικά τις πληροφορίες (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).
- **Σάρωση Θυρών (Port Scanning):** Οι επιτιθέμενοι εντοπίζουν τις πιο ευάλωτες θύρες του δικτύου χρησιμοποιώντας μία τεχνική αποκαλούμενη σάρωση. Στόχος είναι να ανακαλύψουν την κατάσταση των υπηρεσιών, να ορίσουν τη βέλτιστη στρατηγική για την πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων και να εντοπίσουν ποιοι χρήστες παρακολουθούν τις υπηρεσίες. Σε υψηλότερο επίπεδο, ο επιτιθέμενος χρησιμοποιεί κατακερματισμό IP για να παραπλανήσει το τείχος προστασίας, με αποτέλεσμα να παρακάμπτονται τα φίλτρα προστασίας. Μια άλλη τεχνική βασίζεται στην ανάκριση μιας ανοιχτής θύρας User Datagram Protocol για τη σάρωση διευθύνσεων IP μέσω δοκιμών διαφόρων πρωτοκόλλων και άλλων θυρών. Τα μοντέλα δοκιμών που χρησιμοποιούνται από έναν κακόβουλο χρήστη δημιουργούνται συνεχώς και τυχαία. Οι TCP-wrappers προτιμώνται για την αντιμετώπιση αυτών των επιθέσεων, δίνοντας τη δυνατότητα στο διαχειριστή δικτύου να επιτρέπει ή να αποκλείει την πρόσβαση ανάλογα της διεύθυνσης IP (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

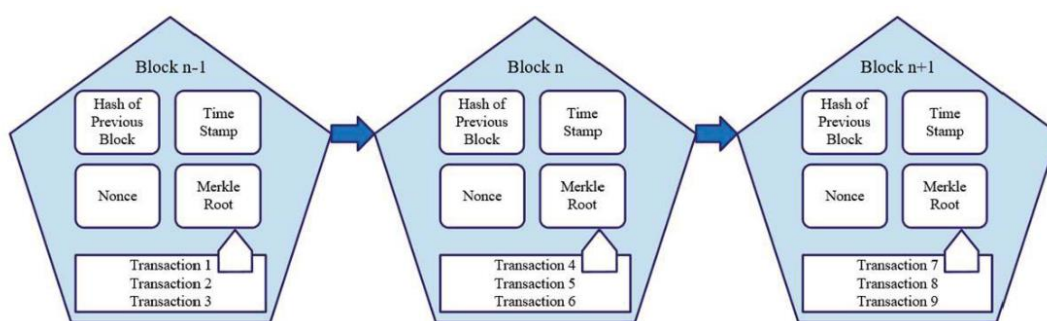
4.6 Το Blockchain στην κυβερνοασφάλεια

Δεδομένου ότι η συνδεσιμότητα μεταξύ πλοίων και διαδικτύου είναι κρίσιμος παράγοντας για τα MASS, η επικοινωνία πρέπει να είναι αμφίδρομη, ασφαλής και υποστηριζόμενη από πολλαπλά συστήματα. Η ασφαλής επικοινωνία είναι υποχρεωτική, προκειμένου να αποφευχθεί η παρεμβολή κακόβουλων φορέων και η απόπειρα απόκτησης ελέγχου των πλοίων. Μία πρόταση για την εξασφάλιση της ασφάλειας επικοινωνίας και της ασφαλούς αποθήκευσης δεδομένων μεταξύ αυτόνομου πλοίου και του κέντρου διαχείρισης πληροφοριών, είναι η χρήση της τεχνολογίας του Blockchain. Η χρήση του Blockchain θα χρησιμοποιηθεί στην ταυτοποίηση και στην πιστοποίηση του παραλήπτη και του αποστολέα, εξασφαλίζοντας έτσι την προστασία ακεραιότητας των πληροφοριών (Petkonić, Mihaonović & Vujović, 2019).

4.6.1 Η τεχνολογία του Blockchain

Το Blockchain πρόκειται για μια αξιόπιστη, αποκεντρωμένη και μοναδική βάση δεδομένων. Η τεχνολογία Blockchain αποτελείται από ένα αυτοδιοικούμενο δίκτυο, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον επιμερισμό των λειτουργιών σε πολλούς υπολογιστές peer-to-peer. Η διαδικασία αυτή έχει ως στόχο να μοιράζονται οι πόροι των υπολογιστών, δηλαδή η επεξεργαστική ισχύς, ο χώρος αποθήκευσης και το εύρος ζώνης, δημιουργώντας έτσι έναν εικονικό υπερυπολογιστή. Αυτή η προσέγγιση διαφέρει εντελώς από τη παραδοσιακή κατανεμημένη βάση δεδομένων, όπου η συνέπεια των δεδομένων δεν είναι εγγυημένη και η επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστών αν υπάρχει θα είναι αναξιόπιστη. Η πιο θεμελιώδης διαφορά μεταξύ της τεχνολογίας Blockchain και της παραδοσιακής κατανεμημένης βάσης δεδομένων είναι η ικανότητά της να αντιμετωπίζει απειλές. Αυτό πραγματοποιείται αποθηκεύοντας τη πληροφορία σε ένα block, απαγορεύοντας να αλλάξει η πληροφορία αναδρομικά χωρίς να γνωρίζει κάποιος πληροφορίες από τα γειτονικά blocks. Για να επικυρωθεί μία ψευδής πληροφορία ως σωστή, απαιτείται να συμφωνήσουν το 50% των συμμετέχοντων υπολογιστών. Γνωστό είναι ότι η τεχνολογία Blockchain έχει αντέξει με επιτυχία σε

κυβερνοεπιθέσεις για περισσότερα από 10 χρόνια χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των blocks. Για τη διευκόλυνση της κατανόησης της συγκεκριμένης τεχνολογίας παρουσιάζεται η Εικόνα 32 όπου φαίνεται απλοποιημένα η δομή των blocks και των πληροφοριών που μεταφέρουν. Κάθε block περιέχει ένα τίτλο, τα δεδομένα που μεταφέρονται και μια χρονολογική ταυτότητα. Για να εξασφαλιστεί λοιπόν η ασφάλεια και η ακεραιότητα των πληροφοριών ο τίτλος κάθε νέου block που προστίθεται συνδέεται με το προηγούμενο block (Liu & Xu, 2018). Όταν εισάγεται δηλαδή μία καινούργια πληροφορία και δημιουργείται ένα block, καθορίζεται αυτόματα ο τίτλος, αποθηκεύεται η πληροφορία και προστίθεται και η χρονολογική ταυτότητα του block όπως αναφέρει ο Swan (2015). Οι χρονολογικές ταυτότητες ή οι χρονοσφραγίδες όπως αποκαλούνται δείχνουν ότι τα μπλοκ είναι συνδεδεμένα σε χρονολογική σειρά και καταγράφουν την ώρα κάθε συναλλαγής στο blockchain, αποδεικνύοντας πότε και τι έχει συμβεί στο δίκτυο. Σε αντίθεση με τις μέχρι σήμερα καταγραφές δεδομένων, η τεχνολογία Blockchain δεν καταγράφει και δεν αποθηκεύει δεδομένα σε ένα κέντρο δεδομένων κάνοντας τη πληροφορία δυσπρόσβαστη σε κακόβουλους χρήστες. Ένα άλλο από τα μεγαλύτερα προτερήματα αυτής της τεχνολογίας είναι ότι η παραβίαση σε έναν από τους κόμβους δεν θα επηρεάσει τα δεδομένα και τις πληροφορίες που έχουμε στο δίκτυο μας (Petkonić, Mihaonović & Vujonić, 2019).



Εικόνα 32: Απλοποιημένη δομή των block (Petkonić, Mihaonović & Vujonić, 2019).

4.6.2 Η εισαγωγή του Blockchain στη ναυτιλία

Τον Αύγουστο του 2018 έγινε η πρώτη επίσημη συναλλαγή με τη χρήση της τεχνολογίας του Blockchain. Πραγματοποιήθηκε για την τοποθέτηση containers σε πλοίο μεταφοράς και έλαβε χώρα στο λιμάνι Κόπερ της Σλοβενίας. Η ηλεκτρονική πληρωμή διήρκεσε μόλις μερικά λεπτά σε αντίθεση με τις εναλλακτικές πληρωμές, οι οποίες χρειάζονται μέρες ή και εβδομάδες για να υλοποιηθούν. Επιπλέον η επικινδυνότητα της συναλλαγής, λόγω της τεχνολογίας του Blockchain και το τρόπο λειτουργίας που προαναφέρθηκε, θεωρείται σχεδόν μηδενική. Τέλος αξίζει να αναφέρουμε ότι η προμήθεια της συναλλαγής, καθώς και τα δικαιολογητικά με το γνήσιο της υπογραφής ήταν περίπου το 15% του κόστους αποστολής των δικαιολογητικών μέσω εταιρείας μεταφορών (courier). Ένα δεύτερο παράδειγμα χρήσης της τεχνολογίας του Blockchain στη ναυτιλία εμφανίζεται μέσω της εταιρίας DNV GL , η οποία μετέφερε το σύνολο των κατεχόμενων πιστοποιητικών της, 90.000 σε αριθμό, σε ιδιωτικό Blockchain όπως φαίνεται στο (Farah, Ukwandu, Hindy, Brosset, Bures, Andonovic & Bellekens, 2022).

5. Μεθοδολογία αξιολόγησης κινδύνων

5.1 Το μοντέλο STAMP και η μέθοδος STPA

Με την πάροδο των χρόνων, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης νέων μεθόδων ανάλυσης επικινδυνότητας, καθώς οι παραδοσιακές μέθοδοι εφαρμόζονται σε συστήματα που ξεπερνούν τα πενήντα χρόνια λειτουργίας. Πρόσφατα αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος ανάλυσης επικινδυνότητας, η System-Theoretic Process Analysis ή αλλιώς STPA. Αυτή η μέθοδος στοχεύει στη βελτίωση της ασφάλειας σε σύγχρονα και σύνθετα συστήματα όπως τονίζει ο Leveson (2011) και έχει ήδη βρει εφαρμογή σε ποικίλους τομείς (Aps, Fetissov, Goerlandt, Helferich, Kopti & Kujala, 2015; Meng, Chen, Shi, Zhu, & Zhu, 2018; Abdulkhaleq, Lammering, Wagner, Röder, Balbierer, Ramsauer, Raste, & Boehmert, 2017). Η STPA βασίζεται στο μοντέλο αιτιότητας ατυχημάτων System-Theoretic Accident Model and Process ή αλλιώς STAMP (Leveson, 2002), το οποίο παρέχει ένα σύνολο στοιχείων και παραδοχών για την αξιολόγηση της ασφάλειας και την κατανόηση των ατυχημάτων, βασιζόμενο στη θεωρία των συστημάτων. Το μοντέλο STAMP εξετάζει το κοινωνικο-τεχνικό σύστημα στο σύνολό του (Chatzimichailidou & Dokas, 2015), αναλύοντας τους κινδύνους συνολικά και όχι μεμονωμένα για τα επιμέρους στοιχεία (Banda & Kannos, 2017). Στα πλαίσια του STAMP, η ασφάλεια προσεγγίζεται ως ένα δυναμικό πρόβλημα ελέγχου και όχι απλώς ως ζήτημα αξιοπιστίας ή αποφυγής αποτυχιών. Το μοντέλο STAMP αναλύει πολύπλοκες διαδικασίες και τις μη ασφαλείς αλληλεπιδράσεις των στοιχείων ενός συστήματος, διευρύνοντας το παραδοσιακό μοντέλο αιτιότητας ατυχημάτων.

Η STPA εφαρμόζεται κατά την ανάπτυξη ενός συστήματος για τη δημιουργία σεναρίων ατυχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο της διαδικασίας ενός ατυχήματος και όχι μόνο τις μεμονωμένες αποτυχίες των επιμέρους στοιχείων και την επίδρασή τους στη λειτουργία του συστήματος (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).

Σύγχρονες έρευνες των Aps, Meng, Abdulkhaleq et. al (2015, 2018, 2017) έχουν επιβεβαιώσει την αποτελεσματικότητα των STAMP και STPA στην αξιολόγηση της ασφάλειας σύγχρονων, αυτοματοποιημένων συστημάτων, καθώς παρέχουν τρόπους μείωσης των κινδύνων (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021). Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των STAMP και STPA είναι η δημιουργία μίας δομής ελέγχου (Control Structure ή αλλιώς CS), η οποία αποτυπώνει τις λειτουργικές σχέσεις και τις αλληλεπιδράσεις μέσω μοντελοποίησης του συστήματος ως ένα σύνολο βρόχων ανάδρασης (Leveson & Thomas, 2018).

5.2 Η προτεινόμενη μέθοδος STPA-SynSS

Γενικότερα, η διαδικασία ανάλυσης κινδύνων εστιάζει στον εντοπισμό κινδύνων που μπορεί να προκύψουν από το σύστημα ή το περιβάλλον του, καταγράφοντας τις ανεπιθύμητες συνέπειες και αναλύοντας τις πιθανές αιτίες τους. Η ασφάλεια επιτυγχάνεται μέσω της ταυτοποίησης, αξιολόγησης και ελέγχου των κινδύνων που παρουσιάζουν μη αποδεκτά επίπεδα επικινδυνότητας, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 33 (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).



Εικόνα 33: Η διαδικασία ανάλυσης κινδύνων (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).

Παρότι η προστασία (safety) και η ασφάλεια συστημάτων (security) συνήθως θεωρούνταν ως διαφορετικές ιδιότητες ενός συστήματος, υπάρχει στενή

αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, αιτίες που σχετίζονται με την ασφάλεια συστημάτων μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες σχετικές με την προστασία, και αντίστροφα, αιτίες που σχετίζονται με την προστασία μπορούν να οδηγήσουν σε απώλειες σχετικές με την ασφάλεια συστημάτων. Υποστηρίζεται ότι η κύρια διαφορά μεταξύ προστασίας και ασφάλειας συστημάτων έγκειται στις προθέσεις των εμπλεκόμενων χρηστών. Ενώ η προστασία επικεντρώνεται στην αποτροπή ακούσιων ενεργειών από καλόβουλους χρήστες, η ασφάλεια συστημάτων αφορά την αποτροπή εσκεμμένων ενεργειών από κακόβουλους χρήστες. Και οι δύο προσεγγίσεις επιδιώκουν τον κοινό στόχο της πρόληψης ενεργειών (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).

Στηριζόμενη στην ταυτοποίηση των αιτιών και των επιπτώσεων των κινδύνων, μία προτεινόμενη μέθοδος, η STPA-SynSS, μπορεί να αξιολογήσει τη σοβαρότητα των κινδύνων και να καθορίσει μέτρα για την εξάλειψη ή τη μείωσή τους. Η συγκεκριμένη μέθοδος συνδυάζει την προστασία και την ασφάλεια συστημάτων (safety-security) και επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση των πιθανών κινδύνων έως ότου ληφθούν ενέργειες για την οριστική αντιμετώπισή τους. Το διάγραμμα ροής της μεθόδου STPA-SynSS παρουσιάζεται στην Εικόνα 34 (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).

Πιο συγκεκριμένα, για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου ακολουθούνται τα εξής έξι βήματα (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021):

1. Καθορισμός του σκοπού της ανάλυσης

Η διαδικασία ξεκινά με τον καθορισμό του σκοπού της ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένης της σαφούς οριοθέτησης του συστήματος και της διατύπωσης των στόχων που εξυπηρετεί. Οι κίνδυνοι ταυτοποιούνται σε επίπεδο συστήματος μέσω ανάλυσης των καταστάσεων ή συνθηκών που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε απώλειες. Αυτοί οι κίνδυνοι στη συνέχεια αναλύονται περαιτέρω σε υποκατηγορίες, ώστε να επιτευχθεί η βαθύτερη κατανόησή τους και να αναπτυχθούν οι σχετικές ιεραρχικές δομές ελέγχου.

2. Μοντελοποίηση της δομής ελέγχου

Οι λειτουργικές απαιτήσεις που προκύπτουν από τους περιορισμούς προστασίας/ασφάλειας συστημάτων αποτελούν τη σύνδεση μεταξύ της δομής ελέγχου και των περιορισμών του συστήματος. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι απροσδιόριστοι περιορισμοί του συστήματος μετατρέπονται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις.

3. Ταυτοποίηση μη ασφαλών ενεργειών ελέγχου

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου της δομής ελέγχου, οι μη ασφαλείς ενέργειες ελέγχου (Unsafe Control Actions ή UCAs) ταυτοποιούνται μέσω της ανάλυσης των ενεργειών ελέγχου και των μεταβλητών που σχετίζονται με το μοντέλο διεργασίας. Αυτές οι ενέργειες αποτελούν μετρήσιμους δείκτες που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος. Τα στοιχεία ενός συστήματος εκτελούν τις αρμοδιότητές τους μέσω ενεργειών ελέγχου. Ανεπαρκής εκτέλεση των αρμοδιοτήτων προκύπτει σε περιπτώσεις μη εκτέλεσης της ενέργειας ελέγχου, εσφαλμένης εκτέλεσης της ενέργειας ελέγχου, προβλημάτων συγχρονισμού (π.χ. παροχή μίας ενέργειας ελέγχου πολύ νωρίς, πολύ αργά ή με λάθος σειρά) και προβλημάτων διάρκειας (π.χ. η ενέργεια ελέγχου διαρκεί πολύ ή διακόπτεται πρόωρα).

4. Δημιουργία σεναρίων απωλειών

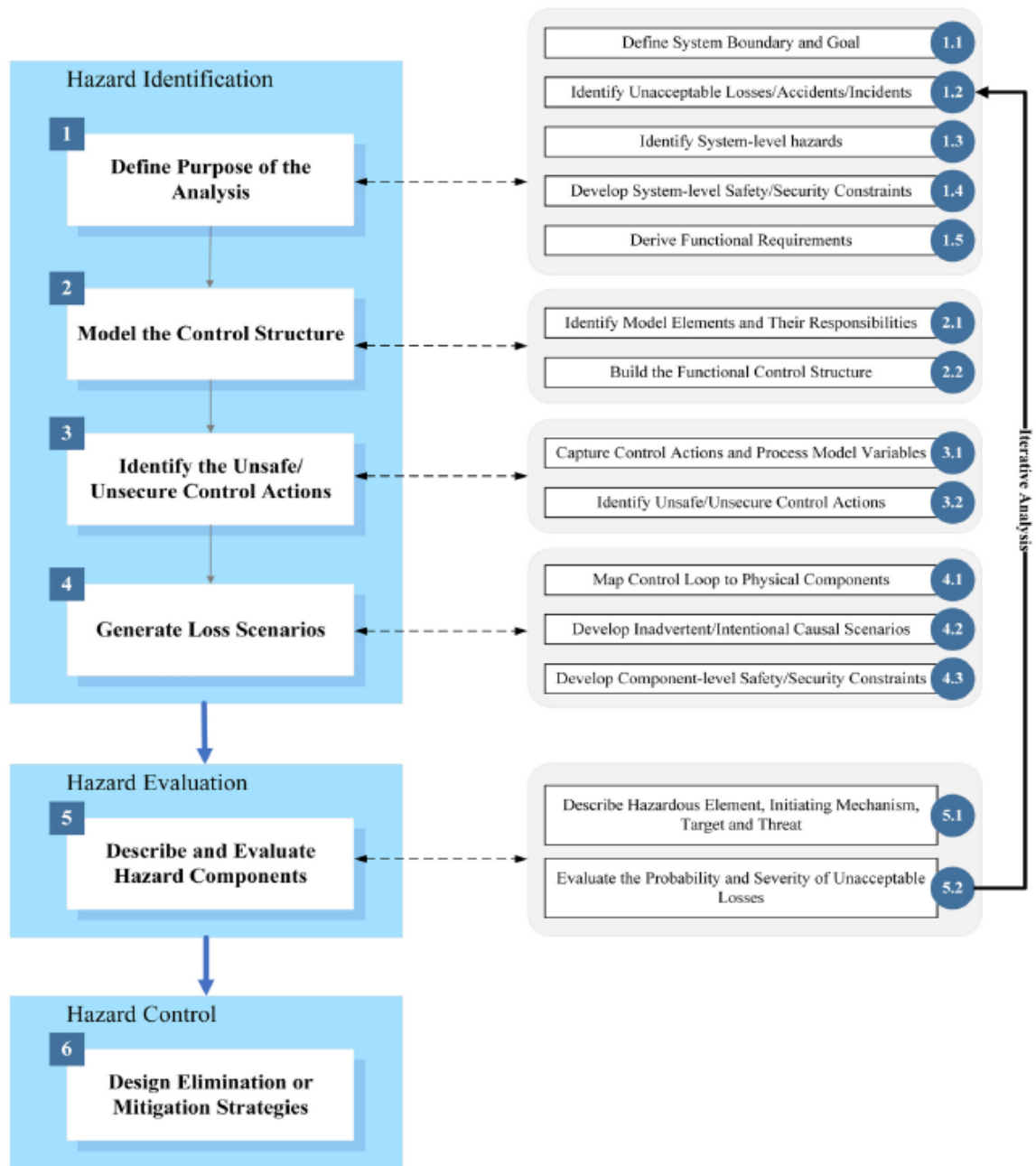
Σε αυτό το βήμα περιγράφονται οι αιτίες που οδηγούν σε UCAs και κινδύνους. Εξετάζονται στοιχεία του συστήματος, όπως οι ελεγκτές, οι ενεργοποιητές και οι αισθητήρες, όπως επίσης και οι αλληλεπιδράσεις τους. Οι πιθανές αιτίες κατηγοριοποιούνται είτε ως ακούσιες είτε ως εσκεμμένες ενέργειες, δημιουργώντας τη βάση για την ανάπτυξη περιορισμών προστασίας και ασφάλειας συστημάτων για τα επιμέρους στοιχεία.

5. Περιγραφή και αξιολόγηση των στοιχείων κινδύνου (Αξιολόγηση κινδύνου)

Κατά την αξιολόγηση κινδύνου, ο κίνδυνος προκύπτει ως ένα σύνολο στοιχείων, όπως το Hazardous Element ή HE, Initiating Mechanism ή IM και Target and Threat ή T/T, τα οποία δύνανται να οδηγήσουν σε ατυχήματα. Ο προσδιορισμός της πιθανότητας κατάληξης σε επικίνδυνες καταστάσεις παραμένει μία πρόκληση, ειδικά κατά τα πρώιμα στάδια ανάπτυξης, λόγω έλλειψης επαρκών ιστορικών δεδομένων και μοντέλων.

6. Σχεδιασμός στρατηγικών εξάλειψης ή μείωσης κινδύνων

Η ανάλυση κινδύνων είναι μια διαδικασία που αποσκοπεί στη βελτίωση της ασφάλειας. Ο εντοπισμός, η εξάλειψη ή η μείωση των κινδύνων αποτελούν κεντρικούς άξονες αυτής της διαδικασίας. Για την ύπαρξη κινδύνου απαιτείται η ταυτόχρονη παρουσία τριών στοιχείων: του Hazardous Element (HE), του Initiating Mechanism (IM) και του Target and Threat (T/T). Η απομάκρυνση οποιουδήποτε από αυτά τα στοιχεία μπορεί να εξαλείψει τον κίνδυνο. Στην περίπτωση που η πλήρης εξάλειψη του κινδύνου δεν είναι εφικτή, προτεραιότητα δίνεται στη μείωση της πιθανότητας πραγματοποίησης του ατυχήματος ή/και στον περιορισμό της σοβαρότητάς του (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).



Εικόνα 34: Το διάγραμμα ροής της μεθόδου STPA-SynSS (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).

5.3 Η εφαρμογή των μεθόδων STPA και STPA-SynSS

Οι Zhou, Liu, Wang και Wu (2021) εφάρμοσαν τη μέθοδο ανάλυσης επικινδυνότητας STPA-SynSS, η οποία βασίζεται στη STPA, σε τηλεχειριζόμενο

πλοίο του οποίου το πλήρωμα βρίσκεται επί του σκάφους. Στόχος της μελέτης αυτής ήταν η βελτίωση της ασφάλειας στην πλοήγηση των αυτόνομων πλοίων. Με τη χρήση της μεθόδου STPA-SynSS, το σύστημα ακολουθεί όλα τα στάδια της διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένης της ταυτοποίησης, της αξιολόγησης και του ελέγχου των κινδύνων (Zhou, Liu, Wang & Wu, 2021).

Παράλληλα, η μέθοδος STPA εφαρμόστηκε σε δύο αυτόνομα πλοία (τύπου ferry) τα οποία επιχειρούσαν στα θαλάσσια ύδατα της Φινλανδίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης συμπεριελάμβαναν τον εντοπισμό δεκαπέντε επικίνδυνων καταστάσεων και δέκα πιθανών ατυχημάτων (Banda, Kannos, Goerlandt, Gelder, Bergström & Kujala, 2019). Παρόλο που το STPA αναγνωρίζεται ως μία από τις καταλληλότερες μεθόδους ανάλυσης επικινδυνότητας, μέσω της συγκεκριμένης μελέτης διαπιστώθηκε ότι σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό και με άλλες μεθόδους για την ολοκλήρωση της τελικής ανάλυσης (Shiokari, Itoh, Yuzui, Ishimura, Miyake, Kudo & Kawashima, 2024). Ως εκ τούτου, παρακάτω εξετάζεται και μια διαφορετική προσέγγιση για την αντιμετώπιση των κινδύνων.

5.4 Η μέθοδος SMB-HAZID

Στην έρευνα των Shiokari, Itoh, Yuzui, Ishimura, Miyake, Kudo και Kawashima (2024) παρουσιάζεται μια εναλλακτική προσέγγιση για την ταυτοποίηση κινδύνων, ειδικά σχεδιασμένη για αυτόνομα πλοία, η οποία ονομάζεται Structure Model-Based Hazard Identification ή αλλιώς SMB-HAZID. Η μέθοδος SMB-HAZID περιλαμβάνει διαδικασίες μοντελοποίησης του συστήματος καθώς και αναγνώρισης κινδύνων, ενώ ένα διάγραμμα που δημιουργείται κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των κινδύνων (Itoh, Yuzui, Shiokari, Ishimura, Miyake, & Kudo, 2021; Shiokari, Itoh & Yuzui, 2020).

Η προτεινόμενη μέθοδος μοντελοποίησης, η οποία αποτελεί μέρος της SMB-HAZID, βασίζεται στη χρήση διαγραμμάτων κλάσεων (Seidl, Scholz, Huemer & Kappel, 2015). Η μέθοδος ανάπτυξης συστημάτων που βασίζεται σε μοντέλα (Model-based development) έχει εισαχθεί ως μία κατάλληλη μέθοδος σχεδιασμού

μεγάλων και πολύπλοκων συστημάτων, αποτελούμενων από πολλά στοιχεία. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη μεθόδων μοντελοποίησης που εφαρμόζονται σε αυτόνομα πλοία, τα οποία διαθέτουν πολλαπλά λογισμικά. Η προτεινόμενη μέθοδος μοντελοποίησης παρέχει τη δυνατότητα περιγραφής της συνολικής δομής ενός συστήματος, προσδιορίζοντας τις αρμοδιότητες κάθε επιμέρους στοιχείου, καθώς και τις πληροφορίες που απαιτούνται για την υλοποίηση αυτών των αρμοδιοτήτων. Οι κίνδυνοι, επομένως, μπορούν να προσδιοριστούν κατά την αποδόμηση του συστήματος. Τέλος, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος αναπαρίστανται σε ένα διάγραμμα, το οποίο ονομάζεται Structure and Task ή αλλιώς ST (Shiokari, Itoh, Yuzui, Ishimura, Miyake, Kudo & Kawashima, 2024). Η τεχνική ταυτοποίησης κινδύνων που εφαρμόζεται στη μέθοδο SMB-HAZID βασίζεται σε υπάρχουσα μεθοδολογία, ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ST, μία λίστα ελέγχου (checklist) και λέξεις-κλειδιά για την αναγνώριση κινδύνων σε αυτόνομα πλοία. Η βασική τεχνική που αξιοποιείται είναι η Structured What-If Technique ή αλλιώς SWIFT, η οποία είναι μια ευέλικτη και υψηλού επιπέδου τεχνική αναγνώρισης κινδύνων που βασίζεται σε δομημένο καταιγισμό ιδεών (structured brainstorming) (Card, Ward & Clarkson, 2012).

Με τη χρήση αυτής της τεχνικής, σε συνδυασμό με τη λίστα ελέγχου και τις λέξεις-κλειδιά που σχετίζονται με τα διαγράμματα ST που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία μοντελοποίησης, μπορούν να ληφθούν υπόψη πιθανές αστοχίες που αφορούν στις αρμοδιότητες των επιμέρους στοιχείων του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις τους. Τοιουτοτρόπως, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει το γρήγορο εντοπισμό κρίσιμων κινδύνων, την ανάλυση των αιτιών και συνεπειών τους, καθώς και την αξιολόγηση αποτελεσματικών μέτρων προστασίας για τα αυτόνομα πλοία χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SMB-HAZID (Shiokari, Itoh, Yuzui, Ishimura, Miyake, Kudo & Kawashima, 2024).

Παραταύτα, η συγκεκριμένη μέθοδος αδυνατεί να αναγνωρίσει επαρκώς όλους τους κινδύνους και συνεπώς, προτείνεται η χρήση επιπλέον μεθόδων, συμπληρωματικών ως προς αυτή (Shiokari, Itoh, Yuzui, Ishimura, Miyake, Kudo & Kawashima, 2024).

5.5 Η μέθοδος Bayesian BWM

Μια πρόσφατη μελέτη των Chang et al. (2019) ανέδειξε ότι οι κυβερνοεπιθέσεις συγκαταλέγονται στις κυριότερες απειλές για τα MASS. Η εξάρτηση των βοηθημάτων πλοήγησης (όπως π.χ. το AIS, το GNSS και το ECDIS) από το GPS και την επικοινωνία μέσω ραδιοσυχνοτήτων VHF, δημιουργεί σημαντικές ευπάθειες. Η υπερβολική αυτή εξάρτηση από την τεχνολογία επιφέρει ποικίλες επιπτώσεις.

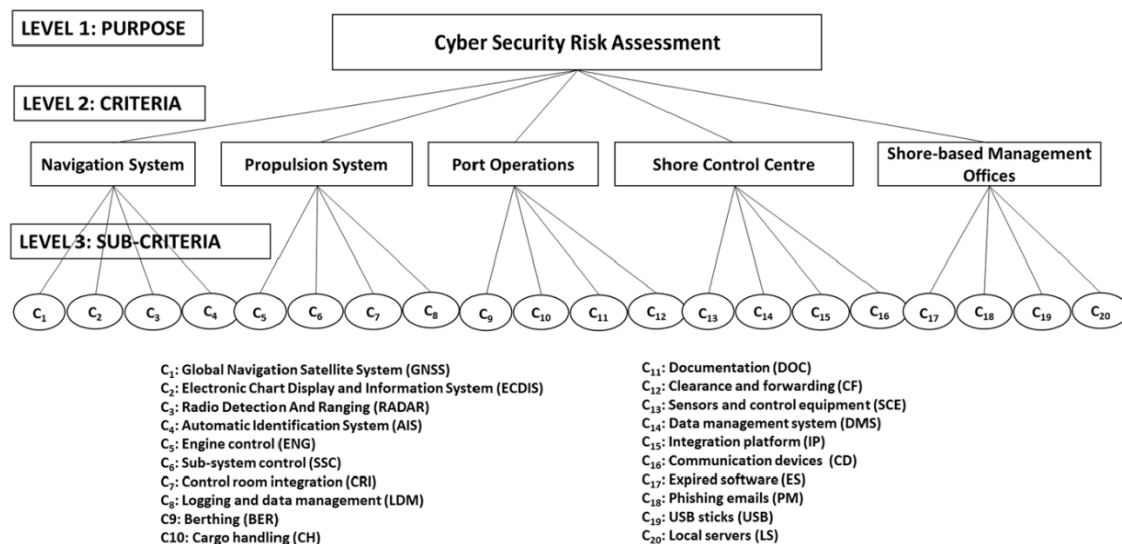
Τα πλήρως αυτόνομα πλοία ανταλλάσσουν μεγάλο όγκο δεδομένων μέσω ραδιοσυχνοτήτων ή δορυφορικής επικοινωνίας, γεγονός που τα καθιστά ευάλωτα σε απειλές και κινδύνους στον κυβερνοχώρο. Αυτή η ευπάθεια ενισχύεται και από κινδύνους που δεν σχετίζονται με την πλοήγηση. Η ζημία που προκύπτει από τις κυβερνοεπιθέσεις ανέρχεται στα 1 τρισεκατομμύριο δολάρια, ενώ αναμένεται στα επόμενα χρόνια η εκθετική της αύξηση (Sen, 2016).

Προς αυτή την κατεύθυνση, η κυβερνοασφάλεια αποσκοπεί στην προστασία του υλισμικού, του λογισμικού, των υποδομών, των δικτύων και δεδομένων από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, βλάβη, κατάχρηση ή καταστροφή (CYBOK, 2019). Στη ναυτιλία, οι απειλές είναι πολυάριθμες και μπορεί να προέρχονται από ακτιβιστές, ανταγωνιστές, εγκληματίες ή ακόμη και τρομοκράτες. Διαφορετικού τύπου κυβερνοαπειλές που θέτουν σε κίνδυνο τη ναυτιλιακή βιομηχανία περιλαμβάνουν την παράνομη εξαγωγή, κλοπή ή τροποποίηση δεδομένων για τον επηρεασμό της αγοράς, την καταστροφή πλοίων, τη δολιοφθορά, το λαθρεμπόριο, την κλοπή αγαθών ή ακόμη και την απαγωγή πλοίων (Tam & Jones, 2018). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το περιστατικό σύγκρουσης του πολεμικού πλοίου USS John S. McCain με ένα δεξαμενόπλοιο, το οποίο πιθανολογείται ότι προκλήθηκε από κυβερνοεπίθεση που αλλοίωσε το σήμα καθορισμού θέσης του πολεμικού πλοίου (Groll, 2017). Επιπρόσθετα, τα γραφεία διοικήσεως ξηράς είναι εξίσου ευάλωτα σε τέτοιου είδους απειλές. Η κυβερνοεπίθεση στην A.P. Moller Maersk τον Ιούνιο του 2017 προκάλεσε σοβαρές ζημιές και διακοπές στις λειτουργίες περισσότερων από 600 πλοίων, γραφείων διοικήσεως ξηράς και τερματικών σταθμών παγκοσμίως (Gronholt-Pedersen, 2017).

Για την αξιολόγηση των πιθανών κυβερνοαπειλών σε αυτόνομα πλοία, οι Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson και Spiegelhalter (2022) εφάρμοσαν τη Bayesian Best-Worst Method ή αλλιώς BWM. Η BWM, μια παραλλαγή της μεθόδου Multi-Criteria Decision-Making ή αλλιώς MCDM, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες μεθόδους MCDM, ιδιαίτερα όσον αφορά τη βελτίωση της συνέπειας στα αποτελέσματα. Για την εφαρμογή της Bayesian BWM ακολουθούνται πέντε βασικά βήματα (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022):

- **Βήμα 1:** Ταυτοποίηση των κριτηρίων και υποκριτηρίων

Σε αυτό το βήμα, προσδιορίζονται τα πέντε κύρια κριτήρια που χρησιμοποιούνται κατά την αξιολόγηση των κυβερνοαπειλών: το σύστημα πλοήγησης (navigational system), το σύστημα ελέγχου πρόωσης (propulsion control system), οι λιμενικές λειτουργίες (port operations), το κέντρο ελέγχου ξηράς (shore-based control center) και τα γραφεία διοικήσεως ξηράς (shore-based management offices). Για καθένα από τα κύρια κριτήρια, εντοπίστηκαν τέσσερα υποκριτήρια. Η μέθοδος MCDM που εφαρμόζεται για την αξιολόγηση των κυβερνοαπειλών στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα παρουσιάζεται στην Εικόνα 35 (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



Εικόνα 35: Μέθοδος αξιολόγησης των κυβερνοαπειλών στα αυτόνομα πλοία (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

- **Βήμα 2:** Ταυτοποίηση του πιο ευάλωτου (MV) και του λιγότερο ευάλωτου (LV) κριτηρίου

Σε μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε 28 επαγγελματίες του κλάδου της ναυτιλίας στα πλαίσια της μεθόδου BWB, οι συμμετέχοντες αναγνώρισαν το πιο ευάλωτο (Most Vulnerable ή αλλιώς MV) και το λιγότερο ευάλωτο (Least Vulnerable ή αλλιώς LV) κριτήριο. Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα MV και LV κριτήρια, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων πλοήγησης (Navigational System ή αλλιώς NGS), των συστημάτων ελέγχου πρόωσης (Propulsion Control System ή αλλιώς PCS), των λιμενικών λειτουργιών (Port Operations ή αλλιώς PO), του κέντρου ελέγχου ξηράς (Shore Control Centre ή αλλιώς SCC) και των γραφείων διοικήσεως ξηράς (Shore-based Management Offices ή αλλιώς SMO), όπως προέκυψαν από τις απαντήσεις της έρευνας (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

No.	MV	NGS	PCS	PO	SCC	SMO	LV	NGS	PCS	PO	SCC	SMO
1	NGS	1	4	7	5	5	PO	7	5	1	4	4
2	NGS	1	1	1	1	3	SMO	9	7	5	7	1
3	NGS	1	9	9	7	3	PCS	9	1	3	3	5
4	SMO	5	4	3	3	1	NGS	1	3	4	5	5
5	NGS	1	3	5	4	7	PO	5	4	1	3	1
6	NGS	1	7	3	4	5	PO	9	7	1	5	6
7	SMO	9	9	3	1	1	NGS	1	1	3	9	9
8	NGS	1	7	7	7	5	SMO	5	5	5	7	1
9	NGS	1	7	9	1	1	PCS	9	1	7	9	7
10	SMO	5	3	7	7	1	PCS	3	1	3	3	3
11	NGS	1	3	5	9	7	PCS	7	1	9	9	7
12	NGS	1	4	7	7	7	PO	7	7	1	4	4
13	PCS	5	1	3	3	3	SMO	5	5	1	3	1
14	NGS	1	5	3	5	3	PCS	5	1	1	1	1
15	NGS	1	5	3	3	3	PCS	2	1	2	2	2
16	NGS	1	3	3	5	5	SMO	5	5	3	3	1
17	NGS	1	3	3	5	3	SCC	4	3	4	1	4
18	NGS	1	3	5	7	7	SMO	7	5	5	5	1
19	SMO	5	2	4	4	1	PCS	3	1	3	3	2
20	SCC	7	7	4	1	2	PCS	3	1	7	8	7
21	SCC	5	5	1	1	1	NGS	1	3	5	9	9
22	SMO	3	3	3	1	1	PCS	7	1	3	3	3
23	NGS	1	5	5	3	3	PCS	5	1	3	5	5
24	NGS	1	3	3	7	7	PCS	9	1	9	9	9
25	SCC	5	7	6	1	4	PO	7	7	1	8	8
26	NGS	1	7	5	2	1	PCS	9	1	7	6	7
27	NGS	1	9	7	7	7	SCC	9	7	9	1	1
28	NGS	1	3	5	2	4	PO	9	7	1	8	6

Πίνακας 8: Οι απαντήσεις των συμμετεχόντων της έρευνας (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

- **Βήμα 3:** Σύγκριση του πιο ευάλωτου (MV) κριτηρίου με τα υπόλοιπα

Μετά την επιλογή του πιο ευάλωτου (MV) κριτηρίου, οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να το συγκρίνουν με τα υπόλοιπα κριτήρια, χρησιμοποιώντας μια αριθμητική κλίμακα από το 1 έως το 9. Η βαθμολογία 1 υποδεικνύει ότι το MV κριτήριο είναι ισοδύναμα ευάλωτο με το άλλο. Η βαθμολογία 9 δείχνει ότι το MV κριτήριο είναι σαφώς πιο ευάλωτο από το άλλο. Επομένως, αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει δύο

στάδια: την επιλογή του πιο ευάλωτου κριτηρίου και την εκτίμηση του βαθμού ευαλωτότητάς του σε σύγκριση με τα υπόλοιπα (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

- **Βήμα 4:** Σύγκριση των υπόλοιπων κριτηρίων με το λιγότερο ευάλωτο (LV)

Μετά την επιλογή του λιγότερο ευάλωτου (LV) κριτηρίου, οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να συγκρίνουν τα υπόλοιπα κριτήρια με αυτό, χρησιμοποιώντας την ίδια αριθμητική κλίμακα από το 1 έως το 9. Η βαθμολογία 1 υποδηλώνει ότι το LV κριτήριο είναι ισοδύναμα ευάλωτο με το άλλο. Η βαθμολογία 9 δείχνει ότι το άλλο κριτήριο είναι σαφώς πιο ευάλωτο από το LV. Μέσω αυτής της διαδικασίας αξιολογείται η ευαλωτότητα των κριτηρίων με βάση το LV ως σημείο αναφοράς (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

- **Βήμα 5:** Εκτίμηση βαρών και συνολική αξιολόγηση των κριτηρίων

Αφού υπολογιστεί το w^r , δηλαδή το βάρος για κάθε συμμετέχοντα ($r = 1, \dots, 28$), εφαρμόζεται η μέθοδος Bayesian BWM για την εκτίμηση των συνολικών βαρών όλων των συμμετεχόντων $w^* = w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*$.

$$X_{MV}^r | w^r \sim M\left(\frac{1}{w^r}\right), \forall r = 1, \dots, r \quad (14)$$

$$X_{LV}^r | w^r \sim M(w^r), \forall r = 1, \dots, r \quad (15)$$

$$w^r | w^* \sim D(\gamma \times w^*), \forall r = 1, \dots, r \quad (16)$$

$$\gamma \sim G(0.1, 0.1)$$

$$w^* \sim D$$

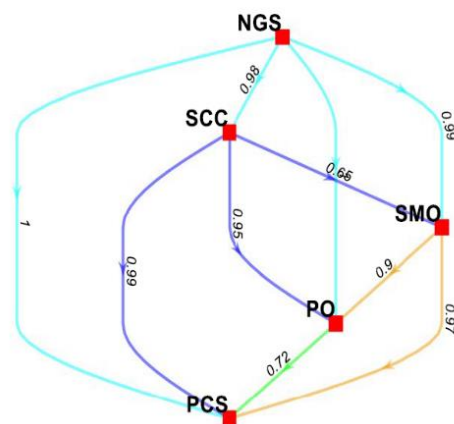
Όπου το M και το D αντιπροσωπεύουν τις πολυωνυμικές κατανομές και τις κατανομές Dirichlet, αντίστοιχα. Επίσης, το $G(0.1, 0.1)$ είναι μια κατανομή γάμμα με παραμέτρους σχήματος ίσες με 0.1 (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

Η επίλυση του συνόλου των παραπάνω εξισώσεων απαιτεί τη χρήση της μεθόδου Markov-chain Monte Carlo (MCMC) (Gilks, Richardson, & Spiegelhalter, 1995). Στη λύση παρουσιάζεται η σύγκριση των κριτηρίων, η οποία απεικονίζεται μέσω γραφημάτων (Mohammadi, & Rezaei, 2020).

5.5.1 Τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου Bayesian BWM

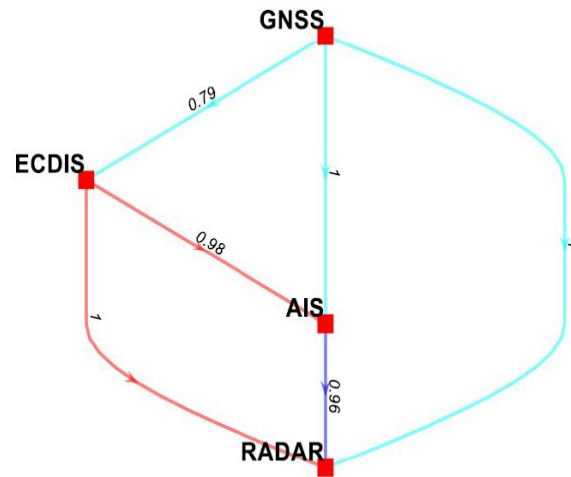
Από τη συλλογή 28 απαντήσεων από επαγγελματίες της ναυτιλίας, κατά την περίοδο Μαρτίου-Μαΐου 2021, κατασκευάστηκαν τα γραφήματα τα οποία παρουσιάζονται στις Εικόνα 36, Εικόνα 37, Εικόνα 38, Εικόνα 39, Εικόνα 40 και Εικόνα 41.

Στην Εικόνα 36, το σύστημα πλοήγησης αναγνωρίζεται ως το πιο ευάλωτο. Ακολουθεί το κέντρο ελέγχου ξηράς (shore control centre), τα γραφεία διοικήσεως ξηράς (shore-based management offices), οι λιμενικές λειτουργίες (port operations) και το σύστημα ελέγχου πρόωσης (propulsion control system). Οι τιμές στις ακμές του κατευθυνόμενου γραφήματος υποδεικνύουν το επίπεδο εμπιστοσύνης των κατατάξεων. Για παράδειγμα, μπορεί να ειπωθεί με 100% εμπιστοσύνη ότι το σύστημα πλοήγησης είναι πιο ευάλωτο σε κυβερνοεπιθέσεις από το σύστημα ελέγχου πρόωσης. Με 72% εμπιστοσύνη μπορεί να υποστηριχθεί ότι οι λιμενικές λειτουργίες θεωρούνται πιο ευάλωτες από το σύστημα ελέγχου πρόωσης (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



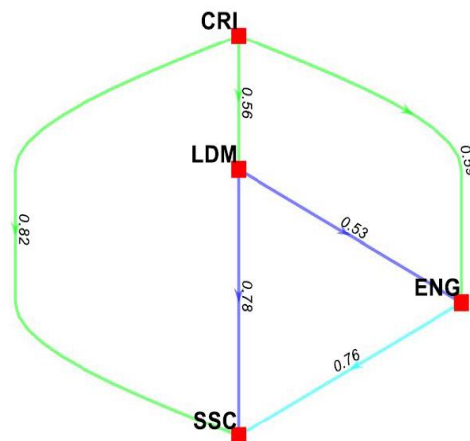
Εικόνα 36: Η κατάταξη των κριτηρίων (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

Μεταξύ των υποκριτηρίων του συστήματος πλοήγησης, οι συμμετέχοντες αναγνώρισαν το GNSS ως το πιο ευάλωτο σε κυβερνοεπιθέσεις, ενώ το RADAR θεωρήθηκε ως το λιγότερο ευάλωτο (Εικόνα 37) (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



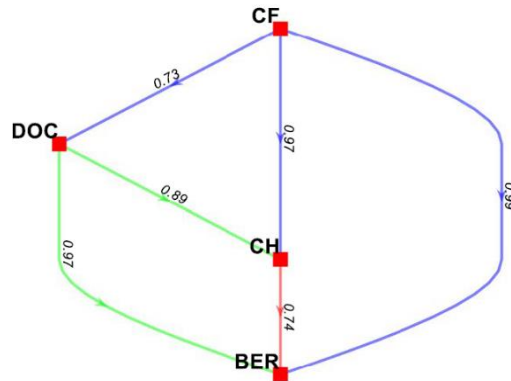
Εικόνα 37: Η κατάταξη των υποκριτηρίων του συστήματος πλοήγησης (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

Σχετικά με το σύστημα ελέγχου πρόωσης, το control room integration ή αλλιώς CRI χαρακτηρίστηκε ως το πιο ευάλωτο, ενώ το sub-system control ή αλλιώς SSC εκτιμήθηκε ως το λιγότερο ευάλωτο (Εικόνα 38) (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



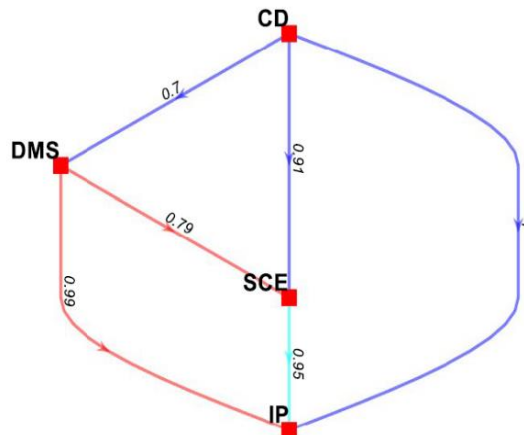
Εικόνα 38: Η κατάταξη των υποκριτηρίων του συστήματος ελέγχου πρόωσης (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

Αναφορικά με τις λιμενικές λειτουργίες, η διαδικασία clearance and forwarding ή αλλιώς CF κρίθηκε ως η πιο ευάλωτη, ενώ το berthing ή αλλιώς BER θεωρήθηκε ως το λιγότερο ευάλωτο (Εικόνα 39) (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



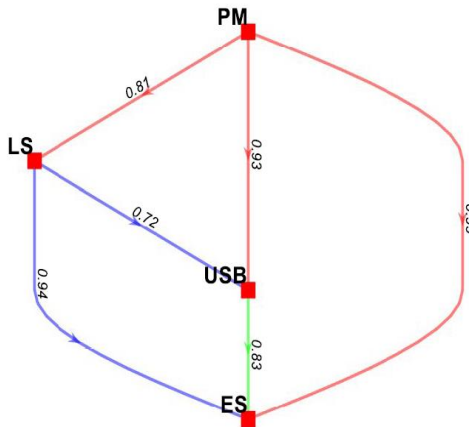
Εικόνα 39: Η κατάταξη των υποκριτηρίων των λιμενικών λειτουργιών (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

Όσον αφορά στο κέντρο ελέγχου ξηράς, τα communication devices ή αλλιώς CD αναγνωρίστηκαν ως τα πιο ευάλωτα, ενώ οι integration platforms ή αλλιώς IP ήταν οι λιγότερο ευάλωτες (Εικόνα 40) (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



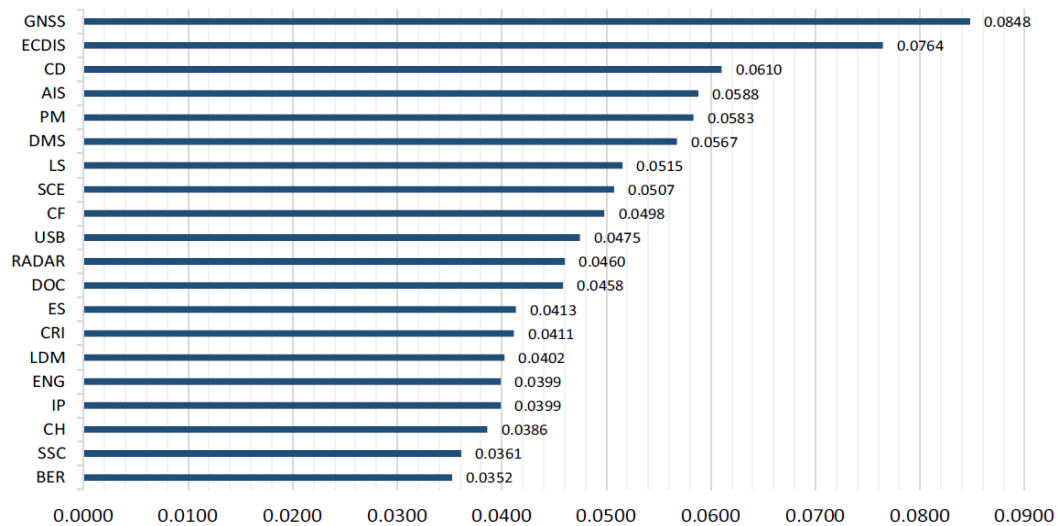
Εικόνα 40: Η κατάταξη των υποκριτηρίων των κέντρων ελέγχου ξηράς (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

Τέλος, σχετικά με τα γραφεία διοικήσεως ξηράς, τα phishing emails ή αλλιώς PM αξιολογήθηκαν ως τα πιο ευάλωτα, ενώ το expired software ή αλλιώς ES θεωρήθηκε ως το λιγότερο ευάλωτο (Εικόνα 41) (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



Εικόνα 41: Η κατάταξη των υποκριτηρίων των γραφείων διοικήσεως ξηράς (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

Παράλληλα, η παγκόσμια κατάταξη των υποκριτηρίων παρέχει πολύτιμες πληροφορίες. Ειδικότερα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 42, προσφέρει μία συνολική εικόνα για τα πιο ευάλωτα στοιχεία ενός αυτόνομου συστήματος. Πέντε από τα πιο ευάλωτα στοιχεία είναι τα GNSS, ECDIS, CD, AIS και PM. Από αυτά, τα τρία (GNSS, ECDIS, AIS) ανήκουν στο κύριο κριτήριο του συστήματος πλοήγησης, ενώ το CD ανήκει στο κέντρο ελέγχου ξηράς και το PM στα γραφεία διοικήσεως ξηράς (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).



Εικόνα 42: Η παγκόσμια κατάταξη των υποκριτηρίων (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

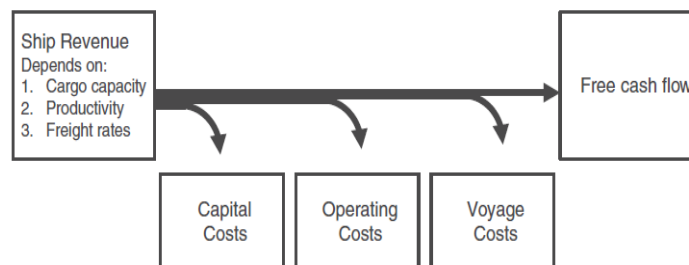
Καταληκτικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των κυβερνοαπειλών μπορούν να αξιοποιηθούν άμεσα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων από τους πλοιοκτήτες. Μέσω της αξιολόγησης αυτής, παρέχονται κατευθύνσεις στις ναυτιλιακές εταιρείες αναφορικά με τα μέτρα πρόληψης που απαιτείται να ληφθούν για τη μείωση των κινδύνων στους πιο ευάλωτους τομείς της ναυσιπλοΐας (Tusher, Munim, Notteboom, Gilks, Richardson & Spiegelhalter, 2022).

6. Η οικονομική διάσταση της αυτόνομης ναυσιπλοΐας

6.1 Το μοντέλο χρηματορροών στη ναυτιλία

Τα κύρια οικονομικά οφέλη των MASS σχετίζονται με τη μείωση των λειτουργικών εξόδων του πλοίου, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της αποδοτικότητας της πλοήγησης του πλοίου, των χαμηλότερων εξόδων ταξιδιού, καθώς και της τοποθέτησης του πληρώματος σε κέντρα ελέγχου ξηράς (Barzegari, Edrisi & Nourinejad, 2023). Κατά συνέπεια, τα ποσά τα οποία εξοικονομούν οι εταιρείες μπορούν να επενδυθούν σε προγράμματα εύρεσης εναλλακτικών τρόπων παροχής ενέργειας ώστε τα πλοία να είναι λιγότερο επιβλαβή για το περιβάλλον, καθώς και στην εξέλιξη της παρούσας τεχνολογίας με σκοπό τη βελτίωση της ασφάλειας (Rødseth, Nesheim, Rialland & Holte, 2023).

Η ανάλυση των χρηματορροών που πραγματοποιούνται στη ναυτιλία παρουσιάζονται στην Εικόνα 43. Πιο συγκεκριμένα, τα έσοδα του πλοίου (ship revenue) βασίζονται στη χωρητικότητα μεταφοράς φορτίων και στην αξία παροχής των υπηρεσιών τους. Στην περίπτωση των MASS, αισθητή αλλαγή αναμένεται στη χωρητικότητα που θα έχουν, δηλαδή στον όγκο αγαθών που θα μπορούν να μεταφερθούν. Πριν όμως εξαχθεί το τελικό συμπέρασμα για τα κέρδη, θα πρέπει να συνυπολογιστούν και τα έξοδα του πλοίου, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε κόστος κεφαλαίου, έξοδα λειτουργίας και έξοδα ταξιδιού (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).



Εικόνα 43: Το μοντέλο χρηματορροών στη ναυτιλία (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).

6.1.1 Κόστος κεφαλαίου

Μελετώντας το κόστος κεφαλαίου (capital costs), δηλαδή το αρχικό κεφάλαιο αγοράς, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που διαφοροποιούν το κοστολόγιο των συμβατικών πλοίων από των μη επανδρωμένων. Αρχικά, η εξάλειψη του επιβαίνοντος πληρώματος θα επηρεάσει την συνολική αξία του πλοίου, καθώς η αφαίρεση των θαλάμων ενδιαιτήσεως και άλλων συστημάτων παροχής υπηρεσιών θα τροποποιήσει το σχέδιο του πλοίου, θα μειώσει το βάρος του (lightship weight) και θα αυξήσει τη χωρητικότητα του φορτίου. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται καλύτερη κατανομή και εκμετάλλευση χώρου, διατηρώντας τα έξοδα κατασκευής στην ίδια κλίμακα. Επίσης, ενδεχόμενες αλλαγές στο σχέδιο του καταστρώματος, θα μειώσουν την αντίσταση του αέρα και σε συνδυασμό με τη χρήση AI και τη βελτιστοποίηση του δρομολογίου, βελτιώνεται η κατανάλωση του καυσίμου. Παραταύτα, τα κεφαλαιουχικά έξοδα πιθανώς να αυξηθούν στο σύνολό τους, εξαιτίας της εφαρμογής καινοτόμων τεχνολογιών που θα αντικαταστήσουν τους ανθρώπινους χειριστές, των αυστηρότερων απαιτήσεων παρακολούθησης και της αναγκαιότητας ύπαρξης πλεονάζοντων συστημάτων επιτήρησης (Jovanović et al., 2022).

6.1.2 Λειτουργικά κόστη

Εξετάζοντας τα λειτουργικά κόστη (operation costs) του πλοίου γίνεται αντιληπτή η μεταβολή του μισθολογίου του πληρώματος, διότι στην χειρότερη περίπτωση που θα υπάρχει προσωπικό στα αυτόνομα πλοία θα είναι πολύ μικρότερο αριθμητικά και λιγότερο εξειδικευμένο από το τωρινό. Παραταύτα, λόγω της απομάκρυνσης του πληρώματος, στην ξηρά θα συναντάται προσωπικό το οποίο θα είναι υπεύθυνο για την πλοήγηση και την ασφάλεια του πλοίου. Το ενδεχόμενο ύπαρξης προσωπικού στα κέντρα ελέγχου ξηράς είναι αρκετά πιθανό να συμβεί, χωρίς όμως αυτό να είναι και το τελικό όραμα για τη τεχνολογία των αυτόνομων πλοίων. Στη συνέχεια, τα έξοδα συντήρησης του πλοίου, αλλά και η ασφάλιση του πλοίου δε φαίνεται να παρουσιάζουν ιδιαίτερες μεταβολές. Για την

επίτευξη βέβαια ίδιου κοστολογίου ασφάλισης του πλοίου, θα πρέπει πρώτα να εξασφαλιστεί η επαρκής προστασία του, τόσο από ατυχήματα όσο και από τους κακόβουλους χρήστες (Jovanović et al., 2022).

6.1.3 Έξοδα ταξιδιού

Αναφορικά με τα έξοδα ταξιδιού (voyage costs), υπάρχουν τρεις βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το κόστος: η κατανάλωση καυσίμων, οι εκπομπές ρύπων και η παραμονή του πλοίου στο λιμένα. Αρχικά, η κατανάλωση καυσίμων και οι εκπομπές ρύπων αναμένεται να είναι μικρότερες συγκριτικά με αυτή των συμβατικών πλοίων, μειώνοντας έτσι τα κόστη ταξιδιού. Σχετικά με τα κόστη λιμανιού, σε αυτά περιλαμβάνονται διάφορες χρεώσεις και τέλη που σχετίζονται με τις υπηρεσίες που παρέχει το λιμάνι στο πλοίο κατά την παραμονή του εκεί. Το επίπεδο αυτών των εξόδων καθορίζεται κυρίως από την πολιτική τιμολόγησης του λιμανιού, με τις πρακτικές χρέωσης να διαφέρουν σημαντικά από λιμάνι σε λιμάνι (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).

6.2 Οικονομική μελέτη πέντε πλοίων μεταφοράς κοντέινερ

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, πραγματοποιήθηκε μελέτη από τους Jovanović et al. (2022) όπου εξετάστηκε σε διάρκεια εικοσαετίας η βιωσιμότητα αυτοματοποίησης πέντε διαφορετικών μεγεθών πλοίων μεταφοράς κοντέινερ (Πίνακας 9), συγκρίνοντας τα κόστη για τη συμβατική και αυτόνομη λειτουργία. Στη συγκεκριμένη έρευνα προστέθηκαν και τα έξοδα εκπομπών ρύπων, δηλαδή το κόστος που προκύπτει από τις εκπομπές ρύπων, μετά την ολοκλήρωση της καύσης. Στη ναυτιλία, ως εκπομπές ρύπων θεωρείται κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Οι παραδοχές της εν λόγω μελέτης ήταν οι ακόλουθες. Πρώτον, τα συμβατικά και αυτόνομα πλοία θεωρούνται εξίσου ασφαλή. Δεύτερον, οι διαδρομές, η ταχύτητα και ο χρόνος παραμονής στα λιμάνια είναι οι ίδιοι. Τρίτον, όλα τα πλοία πραγματοποιούν κυκλικές διαδρομές μεταξύ δύο συγκεκριμένων λιμανιών.

Ship Name	Bianca Rambow	Maersk Montana	CMA CGM Rigoletto	One Mackinac	Marit Maersk
Deadweight (t)	11,286	61,499	114,004	146,867	214,733
Length (m)	134	292	349	366	399
Beam (m)	23	32	43	52	59
Draught (m)	7.5	13	12	15	15
TEU	862	4544	9415	13,900	18,270

Πίνακας 9: Οι τεχνικές προδιαγραφές των υπό μελέτη πλοίων (Jovanović et al., 2022).

6.2.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα της εν λόγω μελέτης φαίνονται στον Πίνακας 10. Πιο συγκεκριμένα, στις στήλες σημειώνεται ο ελάχιστος ναύλος φορτίου που πρέπει να χρεώσει ο πλοιοκτήτης τον πελάτη προκειμένου να καλύψει το κόστος του (Required Freight Rate ή αλλιώς RFR), συνυπολογίζοντας και μη τα κόστη των εκπομπών ρύπων. Το RFR παρουσιάζεται είτε για τα συμβατικά πλοία (C) είτε για τα αυτόνομα πλοία (A), δίνοντας τη τελική ποσοστιαία διαφορά τους. Στο δεξιό τμήμα του πίνακα, δηλαδή στις τρεις τελευταίες στήλες έχουν συνυπολογιστεί και τα έξοδα εκπομπών ρύπων, ενώ στην αριστερό τμήμα του πίνακα φαίνεται το μέγεθος καθενός από τα πέντε πλοία που μελετήθηκαν (Jovanović et al., 2022).

Vessel	RFR (\$)			RFR (\$) <i>no Emission Costs</i>		
	C	A	Diff.	C	A	Diff.
862 TEU	44.3	41.14	−7.1%	34.96	32.73	−6.4%
4544 TEU	20.03	18.08	−8.2%	15.42	13.93	−9.7%
9415 TEU	15.52	14.86	−4.3%	12.34	12	−3%
13,900 TEU	13.09	11.87	−9.3%	10.41	9.46	−9.1
18,270 TEU	11.7	10.83	−7.4%	9.37	8.74	−6.7%

Πίνακας 10: Η πρόβλεψη του RFR για τις περιπτώσεις των συμβατικών και αυτόνομων πλοίων για το 2040, συμπεριλαμβανομένων και μη των κόστων των εκπομπών ρύπων (Jovanović et al., 2022).

6.2.2 Ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, χαμηλότερο RFR προκύπτει και στις δύο περιπτώσεις στα αυτόνομα πλοία, αναδεικνύοντας έτσι τη βιωσιμότητά τους. Μεταξύ των πέντε παραμέτρων (κόστος καυσίμων, κόστος εκπομπών ρύπων, κόστος λιμένων, κόστος κεφαλαίου και κόστος λειτουργίας), ο παράγοντας με την μεγαλύτερη θετική συνεισφορά και στον οποίο δείχνει τη μεγαλύτερη ευαισθησία το RFR, είναι η κατανάλωση καυσίμων. Επίσης, σημαντικός παράγοντας βάσει των αποτελεσμάτων είναι το κόστος εκπομπών ρύπων, ο οποίος βέβαια είναι άμεσα εξαρτώμενος από την κατανάλωση και φυσικά το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιεί το πλοίο. Τέλος, θα πρέπει να τονιστεί ότι το μέγεθος του πλοίου δεν σχετίζεται με την καταλληλότητα για αυτόνομες εφαρμογές. Παραδείγματος χάρη, στην περίπτωση των 13.900 TEU παρατηρούνται καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τα 9.415 TEU και τα 18.270 TEU (Jovanović et al., 2022).

6.3 Οικονομική μελέτη πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου

Στην έρευνα των Kretschmann, Burmeister και Jahn (2017) που αφορά σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carriers), μελετώνται οι οικονομικές διαφορές μεταξύ των συμβατικών και των αυτόνομων εκδοχών τους. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε βασισμένη σε ένα πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου με τα χαρακτηριστικά του Πίνακα 11. Τα αποτελέσματα της μελέτης θεωρείται ότι είναι εφαρμόσιμα για την κατηγορία των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου, στο σύνολό της.

Ship particular	Value
Length over all	230 m
Breadth	32 m
Design draught	14,5 m
Service speed	15,5 kn
Displacement	90,600 t
Main engine	10,230 kW

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά του πλοίου αναφοράς (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).

6.3.1 Τα οικονομικά οφέλη στα λειτουργικά κόστη

Αρχικά, όσον αφορά στον ανθρώπινο παράγοντα, η εταιρεία μπορεί να εξοικονομήσει για κάθε πλοίο 945.000 USD (United States Dollar) ετησίως από τις αμοιβές του πληρώματος, καθώς και 67.000 USD για την συντήρηση υλικών που διασφαλίζουν την ασφάλεια του προσωπικού, όπως είναι τα σωστικά μέσα (π.χ. σωσίβιες λέμβοι). Στη συνέχεια, ένα αυτόνομο πλοίο απαιτεί ορισμένες υπηρεσίες που βασίζονται στη ξηρά και δεν απαιτούνται από τα συμβατικά πλοία. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτές περιλαμβάνονται το κέντρο ελέγχου ξηράς και τα συνεργεία συντήρησης που πραγματοποιούν τις αναγκαίες επισκευές όσο το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017). Σύμφωνα με το (MUNIN, 2015c), τα συνολικά έξοδα του κέντρου ελέγχου ξηράς αντιστοιχεί σε 10,4 εκατομμύρια USD ετησίως. Όμως, κάθε κέντρο ελέγχου δεν απασχολείται με ένα πλοίο. Επομένως, το κόστος που αντιστοιχεί ανά πλοίο είναι 116.000 USD και σε αυτό προστίθεται επιπλέον 15% για διάφορα έξοδα, συνυπολογίζοντας τα κέρδη της εταιρείας που κατέχει το κέντρο ελέγχου ξηράς. Το τελικό ποσό ανέρχεται στα 133.400 USD. Τέλος, στα έξοδα αυτά πρέπει να συνυπολογιστούν και τα έξοδα του συνεργείου συντήρησης που ανέρχονται στα 135.000 USD ετησίως για κάθε πλοίο (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017). Παρατηρείται, δηλαδή, ότι το ετήσιο κέρδος προσεγγιστικά φτάνει τα 700-750 χιλιάδες USD.

6.3.2 Οι μεταβολές στα έξοδα ταξιδιού

Σχετικά με το κόστος κεφαλαίου, στη μελέτη των Kretschmann, Burmeister και Jahn (2017) εκτιμάται ότι δε θα υπάρξουν αξιόλογες διαφοροποιήσεις μεταξύ των συμβατικών και αυτόνομων πλοίων. Στα έξοδα ταξιδιού συναντάμε ποσοστά μείωσης κατανάλωσης καυσίμου από 6% (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017) έως και 15% (Arnsdorf, 2014). Στη συγκεκριμένη έρευνα που αφορά πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου, χρησιμοποιήθηκε το μικρότερο ποσοστό (6%). Στο ποσοστό αυτό δε συνυπολογίζονται τα κέρδη λόγω εφαρμογής της τεχνητής νοημοσύνης. Το ποσοστό αυτό προκύπτει όταν συνυπολογιστεί και το κέρδος

λόγω αλλαγής συμπεριφοράς του πλοίου στις διάφορες καιρικές συνθήκες, οδηγώντας σε λιγότερες απώλειες αντίστασης αέρα και μείωση της απαιτούμενης ισχύος προώσεως κατά 1% (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017). Εκτός όμως από την αντίσταση του αέρα, σημαντική επίδραση έχει και το αρχικό εκτόπισμα του πλοίου, αφού σύμφωνα με το American Bureau of Shipping (2013), για κάθε μείωση βάρους 1% το κέρδος στην κατανάλωση καυσίμου είναι 0,34%. Επιπρόσθετα, ύστερα από προσεγγιστικούς υπολογισμούς των Kretschmann, Burmeister και Jahn (2017) για το πλοίο αναφοράς, παρατηρήθηκε ότι η ποσοστιαία μείωση του βάρους ανέρχεται σε 7,6%, ενώ η μείωση στην κατανάλωση καυσίμων αντιστοιχεί σε περαιτέρω ποσοστό 2,6%. Καταληκτικά, σημαντική είναι και η μειωμένη ανάγκη ηλεκτρικής ισχύος που ανέρχεται στο 60% της αρχικής. Κατά αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εξαχθεί με ασφάλεια το συμπέρασμα ότι η κατανάλωση καυσίμου στις ηλεκτρομηχανές του πλοίου μειώνεται κατά 33% (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017).

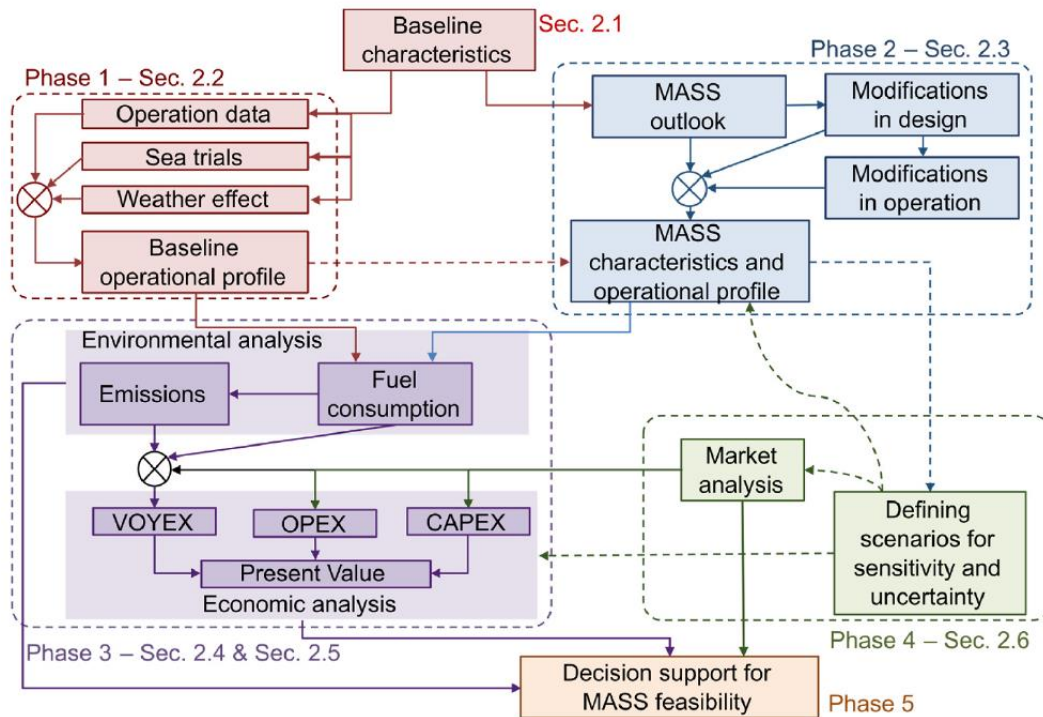
6.3.3 Προβληματισμός ως προς τη βιωσιμότητα της αυτόνομης ναυσιπλοΐας

Εξετάζοντας, λοιπόν, όλα τα ανωτέρω στοιχεία που αφορούν ένα πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου συμφώνως του Πίνακα 11, η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το RFR της αυτόνομης εκδοχής αντιστοιχεί στο 96,6% του RFR της συμβατικής στην εικοσιπενταετία (Kretschmann, Burmeister & Jahn, 2017). Αυτό το ποσοστό είναι ένας δείκτης των οικονομικών αλλαγών που θα επέλθουν στα έξοδα των ναυτιλιακών εταιρειών, ενώ παράλληλα η απόφαση για τη μετάβαση στην αυτόνομη ναυσιπλοΐα εξαρτάται από τον επενδυτικό χαρακτήρα των τελευταίων. Το 96,6% υποδεικνύει μια συγκρατημένη εκτίμηση, η οποία όμως ήταν και αναμενόμενη. Χρησιμοποιώντας το μικρότερο ποσοστό μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου (6%), παρατηρείται η μικρότερη μεταβολή στο τελικό RFR. Από αυτό συμπεραίνεται ότι εάν αξιοποιηθούν πλήρως οι λειτουργικές δυνατότητες του AI, το ποσοστό 96,6% θα παρουσιάσει ακόμη μεγαλύτερη μεταβολή.

6.4 Οικονομική μελέτη σε μικρότερα σκάφη

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Dantas και Theotokatos (2023), χρησιμοποιήθηκε μία αλληλουχία πέντε σταδίων για να μελετηθεί εάν η στροφή ενδιαφέροντος προς τα αυτόνομα πλοία, είτε ως Transition Autonomous Ship ή αλλιώς TAS είτε ως Next Generation of Autonomous Ship ή αλλιώς NGAS, είναι βιώσιμη. Με τον όρο TAS γίνεται αναφορά στα ήδη υπάρχοντα πλοία τα οποία μετατρέπονται με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν ως συμβατικά, αλλά και αυτόνομα. Παράλληλα, με τον όρο NGAS γίνεται αναφορά στα πλήρως αυτόνομα πλοία.

Κατά το Στάδιο 1, αναπτύσσεται το προφίλ λειτουργίας ενός συμβατικού πλοίου και ύστερα από αντιπαραβολή του με ένα MASS (Στάδιο 2), αναλύονται τόσο οι περιβαλλοντικές όσο και οι οικονομικές συνέπειες της μετάβασης στα μη επανδρωμένα πλοία (Στάδιο 3). Στη συνέχεια, αναλύεται η αγορά και λαμβάνοντας υπόψη την ευαισθησία και την αβεβαιότητα της (Στάδιο 4), παρουσιάζονται τα δεδομένα που προκύπτουν για τη μετάβαση σε αυτόνομα πλοία (Στάδιο 5). Η ανωτέρω διαδικασία παρουσιάζεται και στην Εικόνα 44.



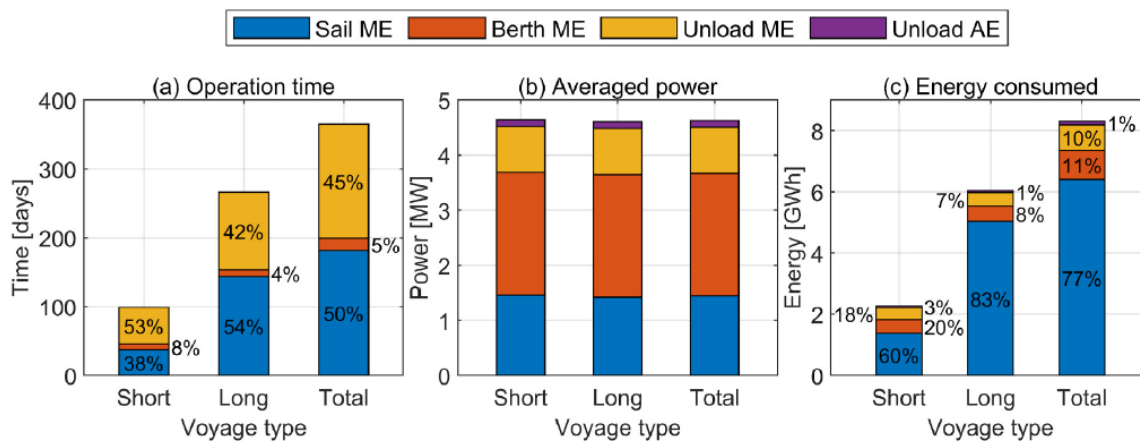
Εικόνα 44: Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας των πέντε σταδίων (Dantas & Theotokatos, 2023).

Το πλοίο μελέτης των Dantas και Theotokatos (2023) είναι ένα σκάφος μεταφοράς, το οποίο παραδίδει τροφή ψαριών από ένα εργοστάσιο σε ιχθυοκαλλιέργειες κατά μήκος των νορβηγικών ακτών, με τεχνικά χαρακτηριστικά 74,7m μέγιστο μήκος, 13,6m μέγιστο πλάτος και 5,1m βύθισμα. Αξίζει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο πλοίο τηρεί καθορισμένα δρομολόγια και απασχολεί δύο αξιωματικούς πλοήγησης, δύο αξιωματικούς μηχανικούς και τρία λοιπά μέλη χωρίς εξειδίκευση (Dantas & Theotokatos, 2023).

6.4.1 Περιγραφή του προφίλ λειτουργίας πλοίου

Γνωρίζοντας τα ανωτέρω και χρησιμοποιώντας δεδομένα από τη λειτουργία του πλοίου, τις δοκιμές στη θάλασσα και τις καιρικές συνθήκες, πραγματοποιείται μία συνολική εκτίμηση για το προφίλ λειτουργίας του (Dantas & Theotokatos, 2023).

Στην Εικόνα 45 παρουσιάζεται ο χρόνος λειτουργίας στο (a), η μέση ετήσια ισχύς στο (b) η οποία εκτιμήθηκε λαμβάνοντας υπόψη τις καιρικές συνθήκες ενός τυπικού έτους και τέλος, στο (c) φαίνεται η ενέργεια που καταναλώνεται, ανά κατάσταση σκάφους συναρτήσει της διάρκειας του ταξιδιού (short και long voyage). Πιο συγκεκριμένα, με το μπλε χρώμα συμβολίζεται η λειτουργία των κύριων μηχανών κατά την πλεύση, με το πορτοκαλί η λειτουργία των κύριων μηχανών κατά τη διάρκεια ελλιμενισμού, με το κίτρινο η λειτουργία των κύριων μηχανών τόσο κατά την εκφόρτωση στις ιχθυοκαλλιέργειες όσο και κατά τη φόρτωση στο εργοστάσιο, ενώ με μωβ η λειτουργία των βοηθητικών μηχανών τόσο κατά την εκφόρτωση στις ιχθυοκαλλιέργειες όσο και κατά τη φόρτωση στο εργοστάσιο (Dantas & Theotokatos, 2023).



Εικόνα 45: Οι λειτουργικές παράμετροι του πλοίου συναρτήσει της διάρκειας ταξιδιού (Dantas & Theotokatos, 2023).

6.4.2 Τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του πλοίου

Στην περίπτωση μετατροπής του σκάφους σε NGAS, υπολογίστηκε ότι στο χειρότερο σενάριο αφαίρεσης μόνο του χώρου του καταστρώματος και των χώρων ενδιαίτησεως, δηλαδή του 10% του συνολικού όγκου, το πλοίο γίνεται ελαφρύτερο κατά 151 τόνους. Στην περίπτωση που αφαιρούνται περαιτέρω συστήματα σχετικά με την ανθρώπινη διαβίωση στο πλοίο, όπως είναι οι δεξαμενές ποσίμου ύδατος, τα κλιματιστικά και τα σωστικά μέσα, το συνολικό όφελος αυξάνεται στους 223

τόνους. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι χώροι αυτοί θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως επιπρόσθετοι χώροι μεταφοράς, αλλά αυτό δεν αποτελεί αντικείμενο της συγκεκριμένης ανάλυσης. Συνεπώς, στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι ποσοστιαίες μειώσεις σε βάρος, σε βύθισμα και σε απαιτούμενη ισχύ πρόωσης, ενώ στον Πίνακα 13 παρατηρείται η μείωση της επιφάνειας που εμφανίζει αντίσταση με τον αέρα συγκριτικά με το πλοίο αναφοράς, καθώς και το όφελος που προκύπτει στην ισχύ (Dantas & Theotokatos, 2023).

Parameter	Baseline parameters	Parameter reduction/Percentage reduction	
		Worst scenario	Best scenario
Lightweight	1,507 mt	151 mt/10.0%	223 mt/14.8%
Draft	5.0 m	0.26 m/5.1%	0.38 m/7.5%
Power ^a	1,459 kW	59 kW/3.4%	88 kW/5.1%

Πίνακας 12: Η επίδραση της μείωσης του βάρους του πλοίου (lightship weight) στην ισχύ πρόωσης (Dantas & Theotokatos, 2023).

Parameter		Parameter/Percentage reduction ^a		
		Baseline ship	Worst scenario	Best scenario
Area (m ²)		221	113/49%	100/55%
Drag coefficient (—)		0.68	0.68/0%	0.45/34%
Power (kW)	Calm sea conditions	1,320	1,301/1.5%	1,292/2.1%
	Average sea conditions	1,459	1,409/2.7%	1,385/3.8%
	Rough sea conditions	1,724	1,665/5.5%	1,636/7.9%

Πίνακας 13: Αποτελέσματα από τη μείωση της επιφάνειας που εμφανίζει αντίσταση με τον αέρα (Dantas & Theotokatos, 2023).

6.4.3 Αλλαγή χρονοδιαγράμματος ελλιμενισμού

Μεταξύ των παραμέτρων που μελετώνται, συμπεριλαμβάνονται οι περίοδοι που σχετίζονται με την αλλαγή και ανάπαυση του πληρώματος, καθώς και με τη φόρτωση των αναλώσιμων, χωρίς όμως να συνυπολογίζεται στο χρόνο αυτό η μεταφορά του εμπορεύματος. Τοιουτοτρόπως, εξετάζονται πέντε ποσοστά μείωσης του χρόνου ελλιμενισμού του πλοίου, τα οποία είναι 0%, 25%, 50%, 75% και 100%. Δεδομένου, όμως, ότι είναι δύσκολο να επιτευχθεί μείωση 100%, δηλαδή ελλιμενισμός του πλοίου αποκλειστικά για συντήρηση και φορτοεκφόρτωση του εμπορεύματος, πιο ρεαλιστική θεωρείται η μείωση 50%. Στην περίπτωση αυτή, ο συνολικός χρόνος πλεύσης αυξάνεται κατά 29% και ο χρόνος αναμονής αναλώσιμων μειώνεται κατά 32%. Ο αντίκτυπος των ανωτέρω ποσοστών μείωσης του χρόνου ελλιμενισμού φαίνεται στον Πίνακα 14 (Dantas & Theotokatos, 2023).

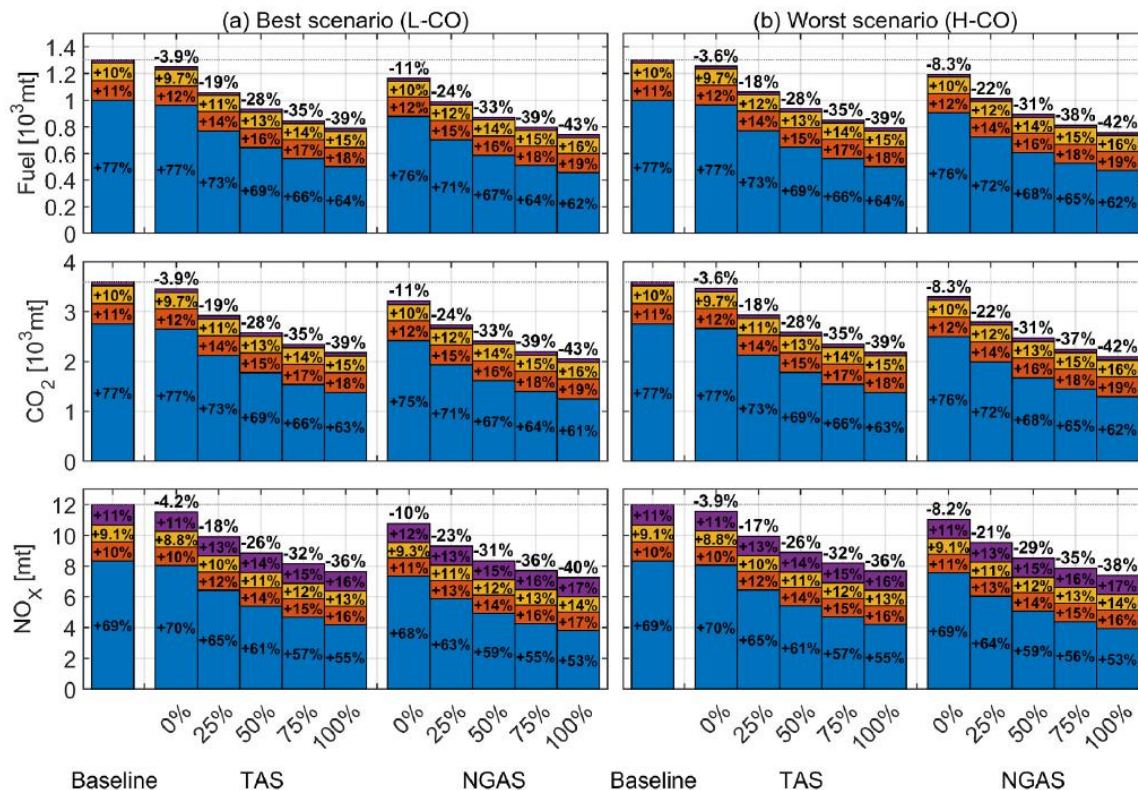
Cases	Reduction factor	Sail time increase	Wait time reduction	Total	Sailing	Berthing	Waiting	Waiting	
								Operational	Crew-related
				[h]	[h]/[%]	[h]/[%]	[h]/[%]	[h]/[%]	[h]/[%]
Ref. ^a	0%	0%	0%	168	83/50%	8.4/5%	76/45%	27/16%	49/29%
I	25%	15%	16%	168	96/57%	8.4/5%	64/38%	27/16%	37/22%
II	50%	29%	32%	168	108/64%	8.4/5%	52/31%	27/16%	25/15%
III	75%	44%	48%	168	120/72%	8.4/5%	39/23%	27/16%	12/7%
IV ^b	100%	59%	65%	168	133/79%	8.4/5%	27/16%	27/16%	0/0%

Πίνακας 14: Ο αντίκτυπος των ποσοστών μείωσης του χρόνου ελλιμενισμού (Dantas & Theotokatos, 2023).

6.4.4 Τα οφέλη στην κατανάλωση καυσίμων και στις εκπομπές ρύπων

Στο σενάριο του πλήρως αυτόνομου σκάφους (NGAS), αναφέρεται ότι η μείωση της απαίτησης ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να φθάσει το 40% στην καλύτερη εκδοχή και 37% στη χειρότερη, με βάση την έρευνα των Kretschmann, Burmeister και Jahn (2017), ενώ για τη μετατροπή σε TAS αναμένεται να φθάσει το 35% και 32%, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ανωτέρω, προκύπτουν δύο ομάδες διαγραμμάτων, μία για τη βέλτιστη περίπτωση και μία για τη χειρίστη,

οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 46. Ειδικότερα, απεικονίζονται οι καταναλώσεις καυσίμων, καθώς και οι εκπομπές CO₂ και NO_x ανά κατηγορία πλοίου (Baseline/TAS/NGAS) και συναρτήσει των πέντε ποσοστών μείωσης του χρόνου ελλιμενισμού που προαναφέρθηκαν. Παρατηρείται ότι η περιβαλλοντική επίπτωση είναι πολύ σημαντική, καθώς για το TAS οι εκπομπές CO₂ μειώνονται κατά 3,6% έως 3,9% και οι εκπομπές NO_x μειώνονται κατά 3,9% έως 4,2%. Για το NGAS εμφανίζεται μείωση των εκπομπών CO₂ και NO_x κατά 8,3% έως 11% και 8,2% έως 10% αντίστοιχα, χωρίς να έχει μεταβληθεί το πρόγραμμα που ακολουθεί το πλοίο. Συνυπολογίζοντας και το ποσοστό μείωσης 50%, παρατηρούνται ακόμα πιο αισθητές αλλαγές στις εκπομπές ρύπων. Πιο συγκεκριμένα, για τις εκπομπές CO₂ στην περίπτωση του NGAS προκύπτει μείωση από 31% έως 33% και για τις εκπομπές NO_x από 29% έως 31% (Dantas & Theotokatos, 2023).



Εικόνα 46: Το βέλτιστο και χειρίστο σενάριο των ετήσιων καταναλώσεων καυσίμου και εκπομπών ρύπων CO₂ και NO_x (Dantas & Theotokatos, 2023).

6.4.5 Οικονομική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Η εκτίμηση του κόστους κεφαλαίου για τα NGAS και TAS, προκύπτει υψηλότερη από το συμβατικό κατά 3% έως 14% και 8,3% έως 17%, αντίστοιχα. Το χαμηλότερο κόστος κατασκευής του NGAS συγκριτικά με το TAS βασίζεται στο γεγονός ότι το πλοίο δεν έχει καθόλου χώρους ενδιαιτήσεως και συστήματα παροχής υπηρεσιών για το πλήρωμα.

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές στα λειτουργικά κόστη, τα οποία προαναφέρθηκαν στην αρχή της ενότητας 6.4, τα λειτουργικά έξοδα του TAS υπολογίζονται 12% έως 34% χαμηλότερα από το συμβατικό πλοίο, ενώ του NGAS 13% έως 35% χαμηλότερα από το συμβατικό πλοίο. Η απαίτηση δε για το προσωπικό του κέντρου ελέγχου ξηράς μπορεί να ελαττώνεται σταδιακά, καθώς λιγότεροι άνθρωποι θα διαχειρίζονται περισσότερα πλοία, αυξάνοντας έτσι το περιθώριο κέρδους.

Επιπρόσθετα, τα έξοδα ταξιδιού αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην οικονομική μελέτη, δεδομένου ότι τα έξοδα της κατανάλωσης καυσίμων αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών εξόδων (72-77%) ακολουθούμενα από τα έξοδα εκπομπών ρύπων (13-23%). Έτσι, προκύπτει ότι στην περίπτωση του TAS τα έξοδα ταξιδιού είναι μειωμένα από 3,5% έως 3,9% συγκριτικά με το πλοίο αναφοράς, ενώ στην περίπτωση του NGAS από 8% έως 11%. Τα ανωτέρω ποσοστά προέκυψαν χωρίς να ληφθούν υπόψη οι περαιτέρω αλλαγές στον προγραμματισμό ελλιμενισμού του πλοίου. Συμπερασματικά, αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση που συνυπολογιστεί το ποσοστό μείωσης 50%, παρατηρείται συνολική μείωση εξόδων κατά 28% για το TAS και 32% για το NGAS.

Καταληκτικά, προκύπτει ότι η μετάβαση σε TAS μπορεί να μειώσει την παρούσα αξία (Present Value ή αλλιώς PV) του πλοίου αναφοράς από 0,5% μέχρι 10%, ενώ το NGAS μπορεί να επιτύχει μείωση από 3,3% μέχρι 15%. Η χαμηλότερη PV των TAS και NGAS αντιπροσωπεύει ένα θετικό οικονομικό πρόσημο, αποδεικνύοντας τη οικονομική βιωσιμότητά τους. Παραταύτα, οι PV των TAS και NGAS δύνανται να μειωθούν περαιτέρω, περιορίζοντας τον μη λειτουργικό χρόνο του πλοίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη το

ποσοστό μείωσης. Παραδείγματος χάρη, στην περίπτωση λήψης ποσοστού μείωσης 50%, το TAS μπορεί να επιτύχει μείωση στην PV από 7,4% μέχρι 22%, ενώ το NGAS από 10% μέχρι 25% (Dantas & Theotokatos, 2023).

6.5 Συγκριτική ανάλυση των οικονομικών μελετών

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 15, το πλοίο μεταφοράς κοντέινερ της μελέτης των Jovanović et al. (2022) μεγέθους 4544 TEU (Maersk Montana) έχει παρόμοιες διαστάσεις με το πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου που μελετάει η έρευνα των Kretschmann, Burmeister και Jahn (2023).

Τύπος	Μήκος (m)	Πλάτος (m)	Βύθισμα (m)
Containership	292	32	13
Bulk carrier	230	32	14,5

Πίνακας 15: Σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών του πλοίου μεταφοράς κοντέινερ Maersk Montana και του υπό μελέτη πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου.

Αρχικά, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των αυτόνομων εκδοχών των δύο τύπων πλοίων (χωρίς να συνυπολογιστεί όμως το όφελος που προκύπτει στα έξοδα εκπομπών ρύπων), η διαφορά των RFR τους ανέρχεται στο 4,8% (91,8% έναντι 96,6%). Το πλοίο που επιφέρει το μεγαλύτερο κέρδος θεωρείται το Maersk Montana, με RFR 91,8%. Παράλληλα, για την περίπτωση του Maersk Montana, συνυπολογίζοντας τα έξοδα εκπομπών ρύπων, προκύπτει επιπλέον μείωση του RFR κατά 1,5%. Αυτό οδηγεί στο 90,3% του RFR της συμβατικής εκδοχής του Maersk Montana. Με γνώμονα το παραπάνω και ενσωματώνοντας αυτή τη φορά τα έξοδα εκπομπών ρύπων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το ποσοστό RFR του αυτόνομου πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου έχει τη δυνατότητα περαιτέρω μείωσης, επαυξάνοντας τη βιωσιμότητα των αυτόνομων πλοίων στην κατηγορία μεταφοράς χύδην φορτίου.

Παραταύτα, μέσω της παραπάνω σύγκρισης δε δύναται να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για τον τύπο του πλοίου που κρίνεται καταλληλότερος για την εφαρμογή της αυτόνομης τεχνολογίας. Η δυσκολία εξαγωγής συμπερασμάτων

προκύπτει και από τις μεγάλες διακυμάνσεις στη διαφορά των RFR και PV μεταξύ αυτόνομης και συμβατικής εκδοχής. Ειδικότερα, στην πρώτη μελέτη (Jovanović et al., 2022), για το RFR προκύπτει μείωση από 3% έως 9,7%, ενώ στην τρίτη μελέτη (Dantas & Theotokatos, 2023) για το PV από 3,3% έως 25%. Για τα εύρη αυτά αναμένεται να αποκτηθεί σαφέστερη εικόνα αφού τα αυτόνομα πλοία μελετηθούν σε μεγαλύτερη κλίμακα και εισαχθούν εκτενώς στο χώρο της ναυτιλίας. Παρόλο που παρατηρούνται αποκλίσεις στις τιμές, όλες οι έρευνες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η ναυπήγηση και ένταξη αυτόνομων πλοίων στο στόλο των ναυτιλιακών εταιρειών οδηγεί σε μείωση των RFR και PV συγκριτικά με τη συμβατική εκδοχή.

Στα ανωτέρω πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι και στις τρεις μελέτες θεωρήθηκε ότι η ασφάλεια παραμένει ίδια για τις συμβατικές και τις αντίστοιχες αυτόνομες εκδοχές τους. Προς το παρόν, η διαφορά στην ασφάλεια μεταξύ των μη επανδρωμένων και συμβατικών πλοίων δε δύναται να υπολογιστεί επακριβώς, κυρίως λόγω μη επαρκούς διαθέσιμου δείγματος αυτόνομων πλοίων στην αγορά. Βέβαια, όπως παρουσιάστηκε και στο υποκεφάλαιο 4.3, η στρέψη στην αυτόνομη ναυτιλία θα μειώσει τις απώλειες ανθρώπινων ζωών. Παράλληλα, κοινό στόχο των ναυτιλιακών εταιρειών και των επιστημόνων της ναυτιλίας θα αποτελέσει η επίτευξη της βέλτιστης ασφαλούς πλοήγησης και η δημιουργία ενός αδιαπέραστου προστατευτικού τείχους έναντι των κυβερνοεπιθέσεων. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τόσο τον περιορισμό των κοστοβόρων ζημιών στις εταιρείες όσο και τη μείωση στα έξοδα ασφάλισης, αυξάνοντας τη διαφορά των RFR και PV μεταξύ της αυτόνομης και συμβατικής εκδοχής.

Επιπρόσθετα, μεγάλη είναι η συμβολή των εξόδων ταξιδιού στα συνολικά κόστη, καθώς σύμφωνα με τη μελέτη των Kretschmann, Burmeister και Jahn (2023) η κατανάλωση καυσίμων αποτελεί το 50%-70% των συνολικών εξόδων, ενώ στην περίπτωση της πρώτης μελέτης (Jovanović et al., 2022) αποτελεί το 72%-77%. Παραταύτα, για την περίπτωση της αυτόνομης ναυσιπλοΐας, και στις τρεις μελέτες χρησιμοποιείται ποσοστό μείωσης κατανάλωσης καυσίμων μικρότερο ή ίσο του 10%, το οποίο θεωρείται από τους ίδιους τους μελετητές αρκετά συγκρατημένο. Η περαιτέρω αύξηση του εν λόγω ποσοστού συνεπάγεται

και τη μείωση του RFR των αυτόνομων πλοίων, προσδίδοντας ακόμα μεγαλύτερο πλεονέκτημα στη νέα αυτή τεχνολογία.

Συμπληρωματικά, ένα ακόμα κοινό σημείο των τριών μελετών είναι ότι οι χώροι και τα συστήματα που αφορούν στην ανθρώπινη διαβίωση στο σκάφος αφαιρέθηκαν προκειμένου αφενός να μειωθεί το βάρος του πλοίου και αφετέρου η αντίσταση του αέρα. Συμπερασματικά, αυτό οδηγεί σε μείωση της κατανάλωσης των καυσίμων, λαμβάνοντας υπόψιν ότι η συγκεκριμένη κατανάλωση έχει τη μεγαλύτερη συμβολή στα έξοδα ενός πλοίου. Βέβαια, δε μπορεί να αξιολογηθεί εάν η μετατροπή και εκμετάλλευση των χώρων αυτών για μεταφορά εμπορευμάτων θα μπορούσε να αποτελέσει πηγή ακόμη μεγαλύτερων εσόδων. Η πιο συμφέρουσα επιλογή για τους επενδυτές και τις ναυτιλιακές εταιρείες δεν είναι προφανής - γι' αυτό το λόγο το συγκεκριμένο ερώτημα οφείλει να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής μελέτης.

Τέλος, στην τρίτη μελέτη, των Dantas και Theotokatos (2023), εν αντιθέσει με τις άλλες δύο, γίνεται αναφορά στον περιορισμό του χρόνου ελλιμενισμού του αυτόνομου σκάφους, για λόγους που αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο 6.4.3. Για την καλύτερη κατανόηση της σπουδαιότητας του περιορισμού του χρόνου ελλιμενισμού παρατίθεται ο Πίνακας 16, στον οποίο καταγράφονται τα ποσοστά μείωσης των εκπομπών ρύπων CO₂, NO_x και κατανάλωσης καυσίμων, συναρτήσει ενός συντελεστή μείωσης του ελλιμενισμού.

NGAS	0%	50%	100%
CO ₂	8,3-11%	31-33%	42-43%
NO _x	8,2-10%	29-31%	38-40%
Κατανάλωση Καυσίμων	8,3-11%	31-33%	42-43%

Πίνακας 16: Τα ποσοστά μείωσης των εκπομπών ρύπων CO₂, NO_x και κατανάλωσης καυσίμων, συναρτήσει ενός συντελεστή μείωσης του ελλιμενισμού.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η μείωση του χρόνου ελλιμενισμού επιφέρει αξιόλογες επιδράσεις στην κατανάλωση καυσίμων, στις εκπομπές ρύπων και συνεπώς, στα έξοδα των ναυτιλιακών εταιρειών. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι χρησιμοποιώντας πλήρως τις δυνατότητες ενός αυτόνομου πλοίου, τα ποσοστά

μείωσης των RFR μεταξύ της αυτόνομης και συμβατικής εκδοχής, τα οποία παρουσιάστηκαν στην πρώτη και δεύτερη μελέτη, μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω. Σίγουρα, ο περιορισμός του χρόνου ελλιμενισμού μικρότερων σκαφών με συχνότερους προγραμματισμένους ελλιμενισμούς, όπως του πλοίου που πραγματεύεται η τρίτη μελέτη (Dantas & Theotokatos, 2023), είναι πιο αποτελεσματικός, χωρίς αυτό να σημαίνει ωστόσο ότι δεν αξίζει να μελετηθεί και σε πλοία μεταφοράς κοντέινερ και χύδην φορτίου.

7. Συμπεράσματα - Επίλογος

Η αυτόνομη ναυσιπλοΐα αποτελεί μια καινοτομία που φέρνει την επανάσταση στον χώρο της ναυτιλίας, εισάγοντας σημαντικές αλλαγές και προκλήσεις. Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι η δυνατότητα μείωσης ή ακόμη και εξάλειψης του πληρώματος από τα πλοία. Αυτό όχι μόνο εξοικονομεί πολύτιμο χώρο στα πλοία, αλλά μειώνει και το λειτουργικό κόστος. Παράλληλα, η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων μπορεί να συμβάλει στη μείωση του οικολογικού αποτυπώματος, προάγοντας κατά αυτόν τον τρόπο μια πιο βιώσιμη ναυτιλία.

Ωστόσο, η μετάβαση στην πλήρη αυτονομία δεν είναι εύκολη ή άμεση - ακόμη απομένει δρόμος μέχρι να επιτευχθεί το εγχείρημα αυτό. Υπάρχουν πολυάριθμα ζητήματα που απαιτούν επίλυση και πολλές προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν πριν από την ευρεία εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας. Οι κίνδυνοι κυβερνοεπιθέσεων αποτελούν μια σοβαρή ανησυχία, καθώς η εξάρτηση από την ψηφιακή τεχνολογία καθιστά τα συστήματα αρκετά ευάλωτα. Επιπλέον, η διαχείριση απρόβλεπτων καταστάσεων, όπως ακραίες καιρικές συνθήκες ή μηχανικές βλάβες, εξακολουθεί να παραμένει μια πρόκληση. Ένα άλλο ζήτημα που απαιτεί προσοχή είναι η αλληλεπίδραση των αυτόνομων πλοίων με το περιβάλλον τους. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των πλοίων, καθώς και με τους λιμένες, είναι καίριας σημασίας για την αποφυγή ατυχημάτων και την ομαλή διεξαγωγή των εργασιών. Εξίσου σημαντική είναι και η κοινωνική διάσταση της αυτόνομης ναυσιπλοΐας.

Τέλος, παρά τις δυσκολίες, η αυτόνομη ναυσιπλοΐα αναμένεται να φέρει σημαντικά οφέλη. Η βελτίωση της ασφάλειας είναι ένα από αυτά. Οι νέες τεχνολογίες δύνανται να περιορίσουν την επίδραση των ανθρώπινων παραγόντων, οι οποίοι συχνά αποτελούν την αιτία πολυάριθμων σφαλμάτων. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα στη λειτουργία των πλοίων αναμένεται να ενισχυθεί, με την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων. Τέλος, η βιωσιμότητα που προσφέρει η αυτόνομη ναυσιπλοΐα την καθιστά ένα καίριο εργαλείο στην προσπάθεια για την προστασία του περιβάλλοντος.

Συνοψίζοντας, η αυτόνομη ναυσιπλοΐα δεν είναι μόνο μια τεχνολογική καινοτομία, αλλά και μία αλλαγή που αγγίζει βαθύτερες πτυχές της ναυτιλίας και της κοινωνίας μας. Παρά τις προκλήσεις που μένει να αντιμετωπιστούν, οι δυνατότητες που προσφέρει είναι τεράστιες. Το μέλλον της ναυτιλίας φαίνεται να στρέφεται προς μία πιο καινοτόμα, ασφαλή και φιλική προς το περιβάλλον εποχή, με την αυτονομία να αποτελεί τον πυρήνα αυτής της εξέλιξης.

8. Βιβλιογραφία

1. AAWA & Rolls-Royce Marine (2016) - Position paper “Remote and Autonomous Ship - The next steps”. [online] Retrieved from <http://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/marine/ship-intel/aawa-whitepaper-210616.pdf>
2. Abdulkhaleq, A., Lammering, D., Wagner, S., Röder, J., Balbierer, N., Ramsauer, L., Raste, T. & Boehmert, H. (2017). A systematic approach based on STPA for developing a dependable architecture for fully automated driving vehicles, *Procedia Engineering*, 179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.094>
3. Ahvenjärvi, S. (2016). The Human Element and Autonomous Ships, *TransNav - the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(3), 517-521. DOI: 10.12716/1001.10.03.18
4. Arnsdorf, I. (2014). Rolls-Royce drone ships challenge \$375 billion industry: Freight – Bloomberg. [online] Retrieved from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2014-02-25/rolls-royce-drone-ships-challenge-375-billion-industry-freight>
5. American Bureau of Shipping - ABS (2013). Ship energy efficiency measures - Status and guidance. [online] Retrieved from https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_Energy_Efficiency_Advisory.pdf
6. Antão, P. & Guedes Soares, C. (2008). Causal factors in accidents of high speed craft and conventional ocean going vessels, *Reliability Engineering and System Safety*, 93(9), 1292–1304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.07.010>
7. Aps, R., Fetissov, M., Goerlandt, F., Helferich, J., Kopti, M. & Kujala, P. (2015). Towards STAMP based dynamic safety management of eco-socio-technical maritime transport system, *Procedia Engineering* 128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.505>

8. Baldauf, M., Fischer, S., Kitada, M., Mehdi, R.A., Al-Quhali, M.A. & Fiorini, M. (2019). Merging Conventionally Navigating Ships and MASS - Merging VTS, FOC and SCC?, *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 13, 495-501. DOI: 10.12716/1001.13.03.02
9. Banda, O.A.V. & Kannos, S. (2017). Hazard analysis process for autonomous vessels. [online] Retrieved from <https://www.novia.fi/assets/Publikationer/Serie-R-Rapporter/Banda-Kannos-2019-.pdf>
10. Banda, O.A.V., Kannos, S., Goerlandt, F., Gelder, P.H.A.J.M., Bergström, M. & Kujala, P. (2019). A systemic hazard analysis and management process for the concept design phase of an autonomous vessel, *Reliability Engineering & System Safety*, 191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106584>
11. Barzegari, V., Edrisi, A. & Nourinejad, M. (2023). Fleet cost and capacity effects of automated vehicles in mixed traffic networks: a system optimal assignment problem, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2023.104020>
12. Bou-Harb, E., Kaisar, E. & Austin, M. (2017). On the impact of empirical attack models targeting marine transportation. *International Conference on Models and Technologies*. [online] Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8005665/>
13. Card, A., Ward, J. & Clarkson, P.J. (2012). Beyond FMEA: the structured what-if technique (SWIFT), *Journal of healthcare risk management : the journal of the American Society for Healthcare Risk Management*, 31. DOI: [10.1002/jhrm.20101](https://doi.org/10.1002/jhrm.20101)
14. Chaal, M., Valdez Banda, O.A., Glomsrud, J.A., Basnet, S., Hirdaris, S. & Kujala, P. (2020). A framework to model the STPA hierarchical control structure of an autonomous ship, *Safety Science*, 132, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104939>
15. Chae, C., Kim, M. & Kim, H. (2020). A Study on Identification of Development Status of MASS Technologies and Directions of Improvement, *Applied Sciences*, 10(13). DOI: <https://doi.org/10.3390/app10134564>

16. Chang, C.H., Wenming, S., Wei, Z., Changki, P. & Kontovas, C.A. (2019). Evaluating cybersecurity risks in the maritime industry: a literature review. [online] Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/337404079_Evaluating_cybersecurity_risks_in_the_maritime_industry_a_literature_review
17. Chatzimichailidou, M.M. & Dokas, M.I. (2015). The Risk Situation Awareness Provision Capability and Its Degradation in the Überlingen Accident over Time, *Procedia Engineering*, 128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.503>
18. Chen, L., Yang, P., Li, S., Liu, K., Wang, K. & Zhou, X. (2023). Online modeling and prediction of maritime autonomous surface ship maneuvering motion under ocean waves, *Ocean Engineering*, 276, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114183>
19. ComNav (2020). *G1 GNSS Satellite Compass*. [online] Retrieved from <https://comnav.com/gnss-position-heading/>
20. CyBOK (2019). *The cyber security body of knowledge - Version 1.0 - 31st October 2019*. [online] Retrieved from <https://www.cybok.org/media/downloads/CyBOK-version-1.0.pdf>
21. Dantas, J.L.D. & Theotokatos, G. (2023). A framework for the economic-environmental feasibility assessment of short-sea shipping autonomous vessels, *Ocean Engineering*, 279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114420>
22. de Vos, J., Hekkenberg, R.G. & Koelman, H.J. (2020). Damage stability requirements for autonomous ships based on equivalent safety, *Safety Science*, 130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104865>
23. de Vos, J., Hekkenberg, R.G. & Valdez Banda, O.A. (2021). The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea - A Statistical Analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, 210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107558>
24. Dobryakova, L. A., Lemieszewski, Ł. S. & Ochinnikov, E. F. (2018). Gps spoofing detection using static or rotating single-antenna of a static or moving victim. *IEEE Access*, 6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2879718>

25. Dreyer, L.O. & Oltedal, H.A. (2019). Safety Challenges for Maritime Autonomous Surface Ships: A systematic review, *Ergoship 2019*. Western Norway University of Applied Sciences.
26. Elkins, L., Sellers, D. & Monach, W.R. (2010). The autonomous maritime navigation (AMN) project: Field tests, autonomous and cooperative behaviors, data fusion, sensors, and vehicles, *Journal of Field Robotics*, 27(6), 790–818. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.20367>
27. Emad, G.R., Enshaei, H. & Ghosh, S. (2021). Identifying seafarer training needs for operating future autonomous ships: a systematic literature review, *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 14(2), 114-135. DOI: 10.1080/18366503.2021.1941725
28. DNV GL (2018). DNVGL-CG-0264 Autonomous and remotely operated ships. [online] Retrieved from <https://www.smashroadmap.com/files/dnvgl-cg-.pdf>
29. Eldwaik, O. & Li, F.F. (2018). Mitigating Wind-Induced Noise in Outdoor Microphone Signals Using a Singular Spectral Subspace Method, *Technologies*, 6(1), 19. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies6010019>
30. Emad, G.R. & Ghosh, S. (2023). Identifying essential skills and competencies towards building a training framework for future operators of autonomous ships: a qualitative study, *WMU Journal of Maritime Affairs*, 22, 427-445. DOI: 10.1007/s13437-023-00310-9
31. EMSA - European Maritime Safety Agency (2018). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents*. [online] Retrieved from <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/3406-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2018.html>
32. EMSA - European Maritime Safety Agency (2021). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents*. [online] Retrieved from <http://www.emsa.europa.eu/newsroom/latestnews/download/6955/4266/23.html>
33. Enevoldsen, T.T. (2023). Informed Sampling-based Collision and Grounding Avoidance for Autonomous Marine Crafts, Technical University of Denmark - Department of Electrical and Photonics Engineering. [online] Retrieved from

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/informed-sampling-based-collision-and-grounding-avoidance-for-aut>

34. European Commission (2016). Final Report Summary - MUNIN (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks). [online] Retrieved from <https://cordis.europa.eu/project/id/314286/reporting>
35. Fan, C., Wrobel, K., Montewka, J., Gil, M., Wan, C. & Zhang, D. (2020). A framework to identify factors influencing navigational risk for Maritime Autonomous Surface Ships, *Ocean Engineering*, 202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107188>
36. Farah, B.A.M., Ukwandu, E., Hindy, H., Brosset, D., Bures, M., Andonovic, I. & Bellekens, X. (2022). Cyber Security in the Maritime Industry - A Systematic Survey of Recent Advances and Future Trends, *Information*, 13(1), 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/info13010022>
37. Fiorini, P. & Shiller, Z. (1998). Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles, *International Journal of Robotics Research*, 17(7), 760–772. DOI: <https://doi.org/10.1177/02783649980170070>
38. Förstner, W. & Wrobel, B.P. (2016). *Photogrammetric Computer Vision*. Cham, Switzerland: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-11550-4
39. Fulgenzi, C., Spalanzani, A. & Laugier, C. (2007). Dynamic obstacle avoidance in uncertain environment combining PVOs and occupancy grid, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1610–1616. DOI: 10.1109/ROBOT.2007.363554
40. Glomsrud, J., Ødegårdstuen, A., Clair, A. & Smogeli, O. (2019). Trustworthy versus Explainable AI in Autonomous Vessels, *International Seminar on Safety and Security of Autonomous Vessels (ISSAV)*, 1-11.
41. Goodfellow, I., Bengio, Y. & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
42. Groll, E. (2017). U.S. navy investigating if destroyer crash was caused by cyberattack. [online] Retrieved from <https://foreignpolicy.com/2017/09/14/u-s-navy-investigating-if-destroyer-crash-was-caused-by-cyberattack/>

43. Gronholt-Pedersen, J. (2017). Maersk says global IT breakdown caused by cyber attack. [online] Retrieved from <https://www.reuters.com/article/us-cyber-attack-maersk-idUSKBN19I1NO>
44. Hadi, G. (2020). Chapter Eleven - Wider implications of autonomous vessels for the maritime industry: Mapping the unprecedented challenges, *Advances in Transport Policy and Planning*, 5, 263-289. DOI: 10.1016/bs.atpp.2020.05.002
45. Hogg, T. & Ghosh, S. (2016). Autonomous merchant vessels: examination of factors that impact the effective implementation of unmanned ships, *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 8(3), 206–222. DOI: <https://doi.org/10.1080/18366503.2016.1229244>
46. Huntsberger, T., Aghazarian, H., Howard, A. & Trotz, D.C. (2011). Stereo vision-based navigation for autonomous surface vessels, *Journal of Field Robotics*, 28(1), 3–18. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.20380>
47. IBM (2024). The Uncharted: Autonomous Ship Project. [online] Retrieved from <https://www.ibm.com/industries/federal/autonomous-ship>
48. International Maritime Organization (IMO) (1974). *International Convention for the Safety of Life at Sea - Chapter V - Regulation 19*. [online] Retrieved from [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)
49. International Maritime Organization (IMO) (2006) - Maritime Safety - Safety of navigation - E-navigation. [online] Retrieved from <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx>
50. Itoh, H., Yuzui, T., Shiokari, M., Ishimura, E., Miyake, R. & Kudo, J. (2021). Risk assessment of autonomous ship systems. [online] Retrieved from https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/rd/2021/04_e02.pdf
51. Jalonen, R., Tuominen, R. & Wahlström, M. (2017). *Safety of Unmanned Ships: Safe Shipping with Autonomous and Remote Controlled Ships*. Aalto University School of Engineering - Aalto University Publication Series Science + Technology No 5, <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-7480-1>

52. Jovanović, I., Perčić, M., Koričan, M., Vladimir, N. & Fan, A. (2022). Investigation of the viability of unmanned autonomous container ships under different carbon pricing scenarios, *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1991. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10121991>
53. Kearns, M.J. & Vazirani, U.V. (1994). *An Introduction to Computational Learning Theory*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
54. Kluge, B. & Prassler, E. (2004). Reflective navigation: Individual behaviors and group behaviors, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4, 4172–4177. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1308926
55. Kongsberg Maritime (2018) - Autonomous Ship Project. [online] Retrieved from <https://www.km.kongsberg.com>
56. Kooij, C. & Hekkenberg, R.G. (2019). The effect of autonomous systems on the crew size of ships. A Case Study, *Maritime Policy & Management*, 48(6), 860-876. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1805645>
57. Kostamovaara, J. et al. (2015). On Laser Ranging Based on High-Speed/Energy Laser Diode Pulses and Single-Photon Detection Techniques, *IEEE Photonics Journal*, 7(2), 1-15. DOI: 10.1109/JPHOT.2015.2402129
58. Kretschmann, L., Burmeister, H.-C. & Jahn, C. (2017). Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: an exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier, *Research in Transportation Business & Management*, 25, 76-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.06.002>
59. Kufoalor, D.K.M., Johansen, T.A., Brekke, E.F., Hepsø, A. & Trnka, K. (2019). Autonomous maritime collision avoidance: Field verification of autonomous surface vehicle behavior in challenging scenarios, *Journal of Field Robotics*, 37(6). DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21919>
60. Kuwata, Y., Wolf, M.T., Zarchitsky, D. & Huntsberger, T.L. (2014). Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110-119. DOI: 10.1109/JOE.2013.2254214

61. Latifov, K. (2019). A critical evaluation of potential outcomes of using modern artificial intelligence and big data analysis technology in maritime industry, *World Maritime University*. [online] Retrieved from https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=2222&context=all_dissertations
62. Lehtola, V.V., Montewka, J. & Salokannel, J. (2020). Sea Captains' Views on Automated Ship Route Optimization in Ice-covered Waters, *Journal of Navigation*, 73(2), 364-383. DOI: 10.1017/S0373463319000651
63. Leveson, N.G. (2002). *System Safety Engineering: Back to the Future*. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology.
64. Leveson, N.G. (2011). *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*, MIT press. [online] Retrieved from <https://doi.org/10.7551/mitpress/8179.001.0001>
65. Leveson, N.G. & Thomas, J.P. (2018). STPA handbook. [online] Retrieved from https://psas.scripts.mit.edu/home/get_file.php?name=STPA_handbook.pdf
66. Liu, L. & Xu, B. (2018). Research on information security technology based on blockchain. *2018 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA)*, 380–384. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCCBDA.2018.8386546>
67. Lloyd's Register (2017). ShipRight - Design and Construction - Additional Design Procedures - LR Code for Unmanned Marine Systems. [online] Retrieved from https://www.smashroadmap.com/files/LR_Code_for_Unmanned_Marine_Systems_February_2017_2.pdf
68. Lloyd's Register (2024a). Beyond the Horizon - Opportunities and Obstacles in the Maritime AI Boom. [online] Retrieved from <https://www.lr.org/en/knowledge/research-reports/2024/beyond-the-horizon/>
69. Lloyd's Register (2024b). Press Release - Lloyd's Register commissioned research reveals the rapid rise of AI in maritime. [online] Retrieved from <https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press->

[release/2024/lloyds-register-commissioned-research-reveals-the-rapid-rise-of-ai-in-maritime/](#)

70. Ma, L. & Smith, D. & Milner, B. (2003). Environmental Noise Classification for Context-Aware Applications, *Database and Expert Systems Applications (DEXA 2003)*, 2736, 360-370. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-45227-0_36
71. Mackinnon, S., Man, Y., Lundh, M. & Porathe, T. (2015). Command and Control of Unmanned Vessels: Keep Shore Based Operators In-The-Loop, 18th International Conference on Ships and Shipping Research. [online] Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/281934219_Command_and_Control_of_Unmanned_Vessels_Keep_Shore_Based_Operators_In-The-Loop
72. Magiera, J. & Katulski, R. (2015). Detection and Mitigation of GPS Spoofing Based on Antenna Array Processing. *Journal of Applied Research and Technology*, 13(1), 45–57. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(15\)30004-3](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(15)30004-3)
73. Man, Y., Lundh, M. & Porathe, T. (2014). Seeking Harmony in Shore-based Unmanned Ship Handling - From the Perspective of Human Factors, What Is the Difference We Need to Focus on from Being Onboard to Onshore?, *Proceedings of the Advances in Human Aspects of Transportation: Part I*, Boca Raton.
74. Man, Y., Weber, R., Cimbritz, J., Lundh, M. & MacKinnon, S.N. (2018). Human factor issues during remote ship monitoring tasks: An ecological lesson for system design in a distributed context, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 68, 231-244. DOI: 10.1016/j.ergon.2018.08.005
75. Mandic, D.P. & Chambers, J.A. (2001). *Recurrent Neural Networks for Prediction: Learning Algorithms, Architectures and Stability*. Hoboken, NJ, USA: Wiley.
76. Meng, X., Chen, G., Shi, J., Zhu, G. & Zhu, Y. (2018). STAMP-based analysis of deepwater well control safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.05.019>

77. Mohammadi, M. & Rezaei, J. (2020). Bayesian best–worst method: A probabilistic group decision making model, *Omega*, 96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.06.001>
78. Mooney, T. (2015). Study finds autonomous ships unlikely within next decade, *Journal of Commerce*. [online] Retrieved from https://www.joc.com/article/study-finds-autonomous-ships-unlikely-within-next-decade_20151201.html
79. Munim, Z.H. (2019). Autonomous ships: a review, innovative applications and future maritime business models, *Supply Chain Forum*, 20(4), 266-279. DOI: 10.1080/16258312.2019.1631714
80. MUNIN (2014). D4.5: Architecture Specification. [online] Retrieved from <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2014/02/d4-5-architecture-v11.pdf>.
81. MUNIN (2015a). D8.6: Final Report: Autonomous Bridge. [online] Retrieved from <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2015/09/MUNIN-D8-6-Final-Report-Autonomous-Bridge-CML-final.pdf>
82. MUNIN (2015b). D8.8: Final Report: Shore Control Centre. [online] Retrieved from <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2015/09/MUNIN-D8-8-Final-Report-Shore-Control-Centre-CTH-final.pdf>
83. MUNIN (2015c). D9.3: Quantitative assessment. [online] Retrieved from <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2015/10/MUNIN-D9-3-Quantitative-assessment-CML-final.pdf>
84. MUNIN (2016). About MUNIN - Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks. [online] Retrieved from <http://www.unmanned-ship.org/munin/about/>
85. National Marine Electronics Association (2020). *Standards NMEA 0183 & NMEA 2000*. [online] Retrieved from <https://www.nmea.org/content/STANDARDS/STANDARDS>

86. Negenborn, R.R., Goerlandt, F., Johansen, T.A., Slaets, P., Valdez Banda, O.A., Vanellander, T., Ventikos, N.P. (2023). Autonomous ships are on the horizon: here's what we need to know, *Nature*, 615(7950), 30-33. DOI: 10.1038/d41586-023-00557-5
87. Norris, A. (2008). *Radar and AIS: Integrated Bridge Systems*. London, UK: The Nautical Institute.
88. Oligeri, G., Sciancalepore, S., & Di Pietro, R. (2020). GNSS Spoofing Detection via Opportunistic IRIDIUM Signals. *WiSec 2020 - Proceedings of the 13th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, 20. DOI: <https://doi.org/10.1145/3395351.3399350>
89. Orolia Maritime (2020). *McMurdo AIS AtoN (Aids to Navigation)*. [online] Retrieved from <https://www.oroliamaritime.com/products/mcmurdo-ais-aton/>
90. Parlov, I. (2023). Can the International Regulatory Framework on Ships' Routing, Ship Reporting, and Vessel Traffic Service (VTS) Accommodate Marine Autonomous Surface Ships (MASS)?, *Ocean Development & International Law*, 54(2), 163-180. DOI: 10.1080/00908320.2023.2211781
91. Paine, L. (2014). *The sea and civilization: A maritime history of the world*. Atlantic Books Ltd.
92. Perera, L.P., Carvalho, J.P. & Guedes Soares, C. (2009). Autonomous guidance and navigation based on the COLREGs rules and regulations of collision avoidance, *Advanced Ship Design for Pollution Prevention*, 205-216. London, UK: Taylor & Francis Group. DOI: 10.1201/b10565-26
93. Petković, M., Mihanović, V. & Vujović, I. (2019). Blockchain security of autonomous maritime transport, *Journal of Applied Engineering Science*, 17. DOI: [10.5937/jaes17-22740](https://doi.org/10.5937/jaes17-22740)
94. Porathe, T., Prison, J. & Man, Y. (2014). Situation awareness in remote control centres for unmanned ships. *Human Factors in Ship Design & Operation*, DOI: 10.3940/rina.hf.2014.12
95. Ramos, M., Thieme, C., Utne, I. & Mosleh, A. (2019). Human-System Concurrent Task Analysis for Maritime Autonomous Surface Ship Operation

and Safety, *Reliability Engineering & System Safety*, 195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106697>

96. Rasmussen, C.E. & Williams, C.K.I. (2006). *Gaussian Processes for Machine Learning*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.
97. Reddy, N.P., Zadeh, M., Thieme, C., Skjetne, R., Sørensen, A., Aanonsen, S., Breivik, M. & Eide, E. (2019). Zero-Emission Autonomous Ferries for Urban Water Transport: Cheaper, Cleaner Alternative to Bridges and Manned Vessels, *IEEE Electrification Magazine*, 7(4), 32-45. DOI: 10.1109/MELE.2019.2943954
98. Riviera Maritime Media (2015). Can Autonomous Vessels Deliver Greater Efficiency and Safer Seas? - Riviera Newsletters. [online] Retrieved from <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/can-autonomous-vessels-deliver-greater-efficiency-and-safer-seas-35584>
99. Rivkin, B.S. (2021). Unmanned Ships: Navigation and More, *Gyroscopy and Navigation*, 12, 96-108. DOI: 10.1134/S2075108721010090
100. Rødseth, Ø.J. & Burmeister, H.-C. (2015). Risk Assessment for an Unmanned Merchant Ship. *TransNav - the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 9(3), 357-364. DOI: 10.12716/1001.09.03.08
101. Rødseth, Ø.J. & Nordahl, H. (2017). Definitions for Autonomous Merchant Ships, *Norwegian forum for unmanned ships (NFAS)*, DOI: 10.13140/RG.2.2.22209.17760. [online] Retrieved from <https://nfas.autonomous-ship.org/wp-content/uploads/2020/09/autonom-defs.pdf>
102. Rødseth, Ø.J., Nesheim, D.A., Rialland, A. & Holte, E.A. (2023). The societal impacts of autonomous ships: the Norwegian perspective, *Autonomous Vessels in Maritime Affairs*, 357-376. DOI: 10.1007/978-3-031-24740-8_18
103. Seidl, M., Scholz, M., Huemer, C. & Kappel, G. (2015). The class diagram. [online] Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-319-12742-2_4

104. Sen, R. (2016). Cyber and information threats to seaports and ships. [online] Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803672-3.00009-1>
105. Shiokari, M., Itoh, H. & Yuzui, T. (2020). Towards the development of risk analysis method for autonomous ships, *Conference Proceedings of the Japan Society of Nav Architects and Ocean Engineers*, 30, 393-396.
106. Shiokari, M., Itoh, H., Yuzui, T., Ishimura, E., Miyake, R., Kudo, J. & Kawashima, S. (2024). Structure model-based hazard identification method for autonomous ships, *Reliability Engineering & System Safety*, 247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110046>
107. Skredderberget, A. (2018). Knowledge grows - The first ever zero emission, autonomous ship. [online] Retrieved from <https://www.yara.com/knowledge-grows/game-changer-for-the-environment/>
108. Swan, M. (2015). Blockchain: blueprint for a new economy. [online] Retrieved from <https://books.google.com/books/about/Blockchain.html?hl=el&id=RHJmBqAAQBAJ>
109. Tam, K. & Jones, K. (2018). Cyber-risk assessment for autonomous ships. [online] Retrieved from <https://doi.org/10.1109/CyberSecPODS.2018.8560690>
110. Thombre, S. et al. (2022). Sensors and AI Techniques for Situational Awareness in Autonomous Ships: A Review, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 64-83. DOI: 10.1109/TITS.2020.3023957
111. TO VIMA (2024) – Ναυτιλία: “Τα πλοία ρομπότ φέρνουν την επανάσταση στην παγκόσμια ναυτιλία”. [online] Retrieved from <https://www.tovima.gr/2024/03/09/naytilia/ta-ploia-rompot-fernoun-tin-epanastasi-stin-pagkosmia-naytilia/>
112. Tusher, H.M., Munim, Z.H., Notteboom, T.E., Gilks, W. R., Richardson, S. & Spiegelhalter, D. (2022). Cyber security risk assessment in autonomous shipping, *Marit Econ Logist*, 24. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41278-022-00214-0>

- 113.** US DON - Department of the Navy (2007). *The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan*. [online] Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA504867.pdf>
- 114.** US Department of Homeland Security & US Coast Guard (2010). *Navigation rules*. Paradise Cay Publications.
- 115.** Valdez Banda, O.A., Kannos, S., Goerlandt, F., van Gelder, P.H.A.J.M., Bergström, M. & Kujala, P. (2019). A systemic hazard analysis and management process for the concept design phase of an autonomous vessel, *Reliability Engineering & System Safety*, 191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106584>
- 116.** van den Berg, J., Lin, M. & Manocha, D. (2008). Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1928-1935. DOI: 10.1109/ROBOT.2008.4543489
- 117.** van den Berg, J., Patil, S., Sewall, J., Manocha, D. & Lin, M.C. (2008). Interactive navigation of multiple agents in crowded environments, *Proceedings of the 2008 symposium on Interactive 3D graphics and games*, 139–147. DOI: <https://doi.org/10.1145/1342250.1342272>
- 118.** Veitch, E., Hynnekleiv, A. & Lützhöft, M. (2020). The operator's stake in shore control centre design: A stakeholder analysis for autonomous ships, *International Conference on Human Factors 2020 - The Royal Institution of Naval Architects*, 23-30. DOI:10.3940/hf.20.5
- 119.** Vidan, P., Bukljaš, M., Pavić, I. & Vukša, S. (2019). Autonomous Systems & Ships - Training and Education on Maritime Faculties, *International Maritime Science Conference*, 91-101.
- 120.** Wang, H. et al. (2015). Vision based long range object detection and tracking for unmanned surface vehicle, *2015 IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM)*, 101–105. DOI: 10.1109/ICCIS.2015.7274604
- 121.** Wang, D., Wu, D., Huang, C. & Wu, C. (2020). Marine Autonomous Surface Ship - A Great Challenge to Maritime Education and Training, *American*

Journal of Water Science and Engineering, 6(1), 10-16. DOI: 10.11648/j.ajwse.20200601.12

122. Wasilewski, W., Wolak, K. & Zaraś, M. (2021). Autonomous shipping. The future of the maritime industry?, *Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie*, 51(3), 155-163. DOI: 10.25944/znmwse.2021.03.155163
123. World Maritime News (2018). *Maersk CEO: Unmanned containerships not in my lifetime*. [online] Retrieved from <https://www.offshore-energy.biz/maersk-ceo-unmanned-containerships-not-in-my-lifetime/>
124. Wrobel, K., Gil, M. & Chae, C. (2021). On the Influence of Human Factors on Safety of Remotely-Controlled Merchant Vessels, *Applied Sciences*, 11(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/app11031145>
125. Wrobel, K., Montewka, J., & Kujala, P. (2017). Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety, *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 155-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.029>
126. Xu, H., Rong, H. & Guedes Soares, C. (2019). Use of AIS data for guidance and control of path-following autonomous vessels, *Ocean Engineering*, 194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106635>
127. Yara (2021). Corporate release - "Yara to start operating the world's first fully emission-free container ship". [online] Retrieved from <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-to-start-operating-the-worlds-first-fully-emission-free-container-ship/>
128. Yara (2024a). News and media - Media library - Yara Birkeland Press kit. [online] Retrieved from <https://www.yara.com/news-and-media/media-library/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>
129. Yara (2024b). Sustainability - Commitments and policies – United Nations Sustainable Development Goals. [online] Retrieved from <https://www.yara.com/sustainability/commitments-and-policies/un-sustainable-development-goals/>

- 130.** Yongwon, K. et al. (2019). Korean Technical Innovation: Toward Autonomous Ship and Smart Shipbuilding to Ensure Safety, *International Seminar on Safety and Security of Autonomous Vessels (ISSSAV)*, 83-94. DOI: 10.2478/9788395669606-008
- 131.** Yoo, Y. & Park, H.-S. (2021). Qualitative Risk Assessment of Cybersecurity and Development of Vulnerability Enhancement Plans in Consideration of Digitalized Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 565. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9060565>
- 132.** Zhang, M., Zhang, D., Yao, H. & Zhang, K. (2020). A probabilistic model of human error assessment for autonomous cargo ships focusing on human - Autonomy collaboration, *Safety Science*, 130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104838>
- 133.** Zhou, X.Y., Liu, Z.J., Wang, F.W. & Wu, Z.L. (2021). A system-theoretic approach to safety and security co-analysis of autonomous ships, *Ocean Engineering*, 222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108569>
- 134.** IMO (2022) – Autonomous Shipping – regulatory exercise. [online] Retrieved from https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx?utm_source=chatgpt.com