



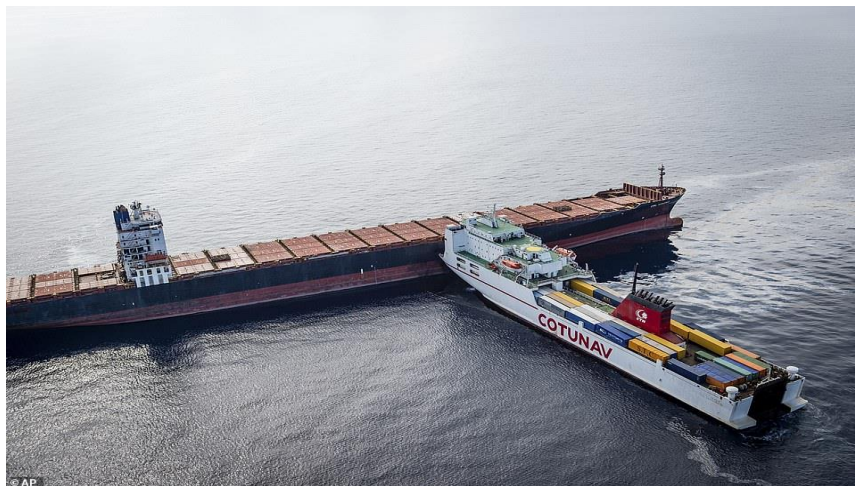
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΣΤΟ ΑΙΓΑΙΟ ΠΕΛΑΓΟΣ



Παναγιώτης Δημητριάδης

Επιβλέπων: Νικόλαος Π. Βεντικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2020

Ευχαριστίες

Αρχικά, νιώθω την ανάγκη να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου κ. Νικόλαο Π. Βεντίκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Παναγιώτη Σωτήραλη για την αμέριστή βοήθεια και καθοδήγηση του χωρίς την οποία θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη στήριξη και τη συμπαράσταση που μου έχει προσφέρει σε όλους τους τομείς όλα αυτά τα χρόνια. Ιδιαίτερη μνεία όμως θα ήθελα να κάνω στον συμφοιτητή μου Δημήτρη Σβορώνο για την ανεκτίμητη βοήθειά που πάντα προσέφερε ανιδιοτελώς όποτε του ζητήθηκε από μέρους μου και στον ξάδερφό μου Στέλιο Χατζηχρόνη, η συμβολή του οποίου υπήρξε καθοριστική κατά την ανάπτυξη του κώδικα.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες	1
Πίνακας Περιεχομένων	3
Κατάλογος Πινάκων	6
Κατάλογος Σχημάτων	8
Ακρωνύμια/Συντομογραφίες	12
Περίληψη	14
Abstract	16
1 Βιβλιογραφική Επισκόπηση	18
2 ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ.....	22
2.1 Ναυτικά Ατυχήματα	22
2.2 Συγκρούσεις	23
2.3 Αίτια Συγκρούσεων	24
2.3.1 Ανθρώπινοι και Οργανωτικοί Παράγοντες	24
2.3.2 Τεχνικοί Παράγοντες.....	25
2.3.3 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες	26
2.4 Νομοθετικό Πλαίσιο	26
2.4.1 Ιστορική Εξέλιξη	26
2.4.2 COLREGs 1972.....	28
3 ΤΟ ΡΙΣΚΟ ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ.....	34
3.1 Γενικά για το Ρίσκο	34
3.2 Διαφορετικοί Ορισμοί του Ρίσκου	34
3.3 Formal Safety Assessment	35
3.3.1 Ιστορική Αναδρομή.....	35
3.3.1 Η Προσέγγιση της FSA	36
3.3.3.1 Αναγνώριση Κινδύνων (Βήμα 1 ^ο)	37
3.3.3.2 Ανάλυση Ρίσκου (Βήμα 2 ^ο)	38
3.3.3.3 Επιλογές Ελέγχου του Ρίσκου (Βήμα 3 ^ο)	41
3.3.3.4 Ανάλυση Κόστους - Οφέλους (Βήμα 4 ^ο).....	42
3.3.3.5 Προτάσεις για τη Λήψη Αποφάσεων (Βήμα 5 ^ο).....	43
3.4 Μοντέλα Σύγκρουσης	43

3.4.1 Γεωμετρικά Μοντέλα	44
3.4.1.1 Γεωμετρική Πιθανότητα (N_A)	45
3.4.1.2 Υπολογισμός Παράγοντα Αιτιώδους Συνάφειας (Causation Factor)	48
3.4.1.3 Στατιστικά Μοντέλα	50
4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	52
4.1 Γενικό Περίγραμμα	52
4.2 Συλλογή Δεδομένων.....	53
4.3 Χάραξη Διαδρομής.....	53
4.4 Πορεία των Πλοίων εντός της Διαδρομής	53
4.5 Εκτίμηση Αφίξεων	57
4.6 Κατανομή Τύπων Πλοίων	58
4.7 Κατανομή Διαστάσεων	58
4.7.1 Έλεγχοι Υποθέσεων	59
4.7.1.1 Έλεγχοι Καλής Προσαρμογής: Το Κριτήριο Kolmogorov – Smirnov (K-S Test)	62
4.7.2 Επιλεγμένες Κατανομές	63
4.8 Κατανομές Μέσων και Μέγιστων Ταχυτήτων.....	68
4.9 Δημιουργία Κυκλοφοριακού Συμβάντος	74
4.10 Επιλογή Κριτηρίου και Ανίχνευση Υποψηφιοτήτων Σύγκρουσης	76
4.11 Επιλογή Παράγοντα Αιτιώδους Συνάφειας P_C	78
4.12 Σύνοψη Μοντέλου και Ανάπτυξη Κώδικα Matlab	79
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ	82
5.1 Κεντρικό Οριακό Θεώρημα και Διάστημα Εμπιστοσύνης των Δεδομένων Εξόδου.....	82
5.2 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	82
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	90
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Καταγεγραμμένες παρατηρήσεις και πιθανότητες κατανομής Bernoulli περάσματος της Κέας.....	56
Πίνακας 4.2: Καταγεγραμμένες αφίξεις πλοίων στις δύο πύλες εισόδου και εξαγωγή αντίστοιχων λ	58
Πίνακας 4.3: Κατανομή τύπων πλοίων.....	59
Πίνακας 4.4: Κατανομές διαστάσεων και παράμετροί τους.....	68
Πίνακας 4.5: Κατανομές ταχυτήτων και παράμετροί τους.....	74
Πίνακας 4.6: Σύνοψη χαρακτηριστικών στοιχείων και ταυτότητας μοντέλου σύγκρουσης.....	79
Πίνακας 5.1: Μέσος αριθμός υποψήφιων συγκρούσεων N_A κώδικα μέσω ταχυτήτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το μοντέλο του Ράκα.....	83
Πίνακας 5.2: Εμπλεκόμενοι τύποι πλοίων στις υποψήφιες συναντήσεις (κώδικας μέσω ταχυτήτων).....	84
Πίνακας 5.3: Μέσος αριθμός υποψήφιων συγκρούσεων N_A κώδικα μέγιστων ταχυτήτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το μοντέλο του Ράκα.....	84
Πίνακας 5.4: Εμπλεκόμενοι τύποι πλοίων στις υποψήφιες συναντήσεις (κώδικας μέγιστων ταχυτήτων).....	85
Πίνακας 5.5: Πιθανότητες αιτιώδους συνάφειας P_C που έχουν προταθεί από διαφορετικούς μελετητές ανα τον κόσμο	85
Πίνακας 5.6: Ετήσιος αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων κώδικα μέσω ταχυτήτων, μετά από εφαρμογή των αντίστοιχων πιθανοτήτων αιτιώδους συνάφειας επί των τιμών του Πίνακα 5.1	86
Πίνακας 5.7: Ετήσιος αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων κώδικα μέγιστων ταχυτήτων, μετά από εφαρμογή των αντίστοιχων πιθανοτήτων αιτιώδους συνάφειας επί των τιμών του Πίνακα 5.3	88
Πίνακας 5.8: Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων που έχει εξαχθεί από διάφορους μελετητές μετά από εφαρμογή των ίδιων παραγόντων P_C σε διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές.....	88

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Κατανομή ναυτικών ατυχημάτων για το 2019 (EMSA, 2020)	23
Σχήμα 2.2: Σύγκρουση μεταξύ πλοίων κοντά στις ακτές της Σιγκαπούρης το 2003 (Calle and Alves, 2011)	24
Σχήμα 2.3: Σύστημα Διαχωρισμού της Κυκλοφορίας (Traffic Separation Scheme) στο Στενό της Μεσσήνης στην Ιταλία (Cucinotta et al., 2017).....	29
Σχήμα 2.4: Σωστός και λανθασμένος τρόπος διέλευσης μέσα από μία κυκλοφοριακή λωρίδα σύμφωνα με τους CORLEGS	29
Σχήμα 2.5: Απαιτούμενη ελιγμοί αποφυγής σύγκρουσης σε κάθε περίπτωση συνάντησης κατά CORLEGS (Kufoalor et al., 2019).....	30
Σχήμα 2.6: Απαιτούμενη διάταξη για τα φώτα ναυσιπλοίας πλοίων μήκους μεγαλύτερου των 50 μέτρων όπως καθορίζεται στο Γ'Μέρος των CORLEGS (Zaccone et al., 2019).....	31
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (FSA) (IMO, 2013)	36
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (FSA) (IACS – MSC 75, 2002)	37
Σχήμα 3.3: Τυπικό Event Tree συνεπειών σύγκρουσης (Konovessis and Vassalos, 2008)	39
Σχήμα 3.4: Δείκτες ποσοτικών συνεπειών (IMO,2018)	41
Σχήμα 3.5: Δείκτες ποσοτικών συχνοτήτων (IMO, 2018).....	41
Σχήμα 3.6: Ενδεικτική μήτρα αξιολόγησης κινδύνων και δείκτες ρίσκου (IMO, 2018).....	42
Σχήμα 3.7: Αιτιακή αλυσίδα (IMO, 2018).....	42
Σχήμα 3.8: Μοντέλο ρίσκου για σενάριο σύγκρουσης LNG (Li et al., 2012).....	44
Σχήμα 3.9: Πλησιέστερο σημείο προσέγγισης CPA και παράμετροί του (DCPA, TCPA) (Chen et al., 2019).....	45
Σχήμα 3.10: Διάμετρος σύγκρουσης D_{ij} (Pedersen, 1995)	46
Σχήμα 3.11: Ενδεικτικά γεωμετρικά όρια που έχουν προταθεί για τον καθορισμό του τομέα του πλοίου (ship domain) από διάφορους συγγραφείς (Goerlandt and Kujala, 2014)	47
Σχήμα 3.12: Σχηματική απεικόνιση της περιοχής CTPA (Chen et al., 2019)	48
Σχήμα 3.13: Bayesian Network για τον υπολογισμό του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας P_C (Sotiralis et al., 2016).....	49
Σχήμα 4.1: Προσέγγιση της διαδρομής μέσω συντεταγμένων	54
Σχήμα 4.2: Πύλη εισόδου/εξόδου 1-2 και κόμβος διέλευσης 3-4	55
Σχήμα 4.3: Πύλη εισόδου/εξόδου 15-16 και κόμβος διέλευσης 13-14	55
Σχήμα 4.4: Κόμβοι διέλευσης 5-6, 6-9, 10-12, 5-7, 7-8 και 11-12.....	56
Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση της κρίσιμης τιμής και των περιοχών αποδοχής και απόρριψης της H_0 συναρτήσεως του επίπεδου εμπιστοσύνης α (Abdelkhalik and Darani, 2016).....	61

Σχήμα 4.6: Γραφική απεικόνιση του ελέγχου Kolmogorov – Smirnov και της μέγιστης απόστασης D μεταξύ των αθροιστικών συναρτήσεων πιθανότητας (Sanaei et al., 2019).....	62
Σχήμα 4.7: Κατανομή t Location - Scale της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου Bulk Carrier.....	63
Σχήμα 4.8: Κατανομή Logistic της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου Bulk Carrier.....	63
Σχήμα 4.9: Κατανομή Birnbaum - Saunders της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου Containership.....	64
Σχήμα 4.10: Κατανομή Log - Logistic της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου Containership.....	64
Σχήμα 4.11: Κατανομή Lognormal της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου General Cargo.....	65
Σχήμα 4.12: Κατανομή Log - Logistic της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου General Cargo.....	65
Σχήμα 4.13: Κατανομή Generalized Extreme Value της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου RoRo.....	66
Σχήμα 4.14: Κατανομή Generalized Pareto της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου RoRo.....	66
Σχήμα 4.15: Κατανομή Nakagami της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου Tanker.....	67
Σχήμα 4.16: Κατανομή Generalized Pareto της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου Tanker.....	67
Σχήμα 4.17: Κατανομή Extreme Value της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου Bulk Carrier.....	69
Σχήμα 4.18: Κατανομή Logistic της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου Bulk Carrier.....	69
Σχήμα 4.19: Κατανομή Nakagami της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου Containership.....	70
Σχήμα 4.20: Κατανομή Nakagami της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου Containership.....	70
Σχήμα 4.21: Κατανομή Gamma της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου General Cargo.....	71
Σχήμα 4.22: Κατανομή Log – Logistic της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου General Cargo.....	71
Σχήμα 4.23: Κατανομή Generalized Pareto της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου RoRo.....	72
Σχήμα 4.24: Κατανομή Extreme Value της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου RoRo.....	72
Σχήμα 4.25: Κατανομή Extreme Value της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου Tanker.....	73
Σχήμα 4.26: Κατανομή Extreme Value της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου Tanker.....	73
Σχήμα 4.27: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης της κυκλοφορίας.....	75

Εικόνα 4.28: Σχηματική απεικόνιση των τριών τύπων συναντήσεων σύμφωνα με τους COLREGs (Goerlandt and Kujala, 2011).....	77
Σχήμα 4.29: Αλγόριθμος ανίχνευσης υποψηφιοτήτων σύγκρουσης	78
Σχήμα 4.30: Ανάπτυξη κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab	80

Ακρωνύμια/Συντομογραφίες

AIS	Automatic Identification System
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
BBN	Bayesian Belief Network
CCFA	Common Cause Failure Analysis
CORLEGs	Collision Regulations
CPA	Closest Point of Approach
CTPA	Collision Threat Parameter Area
DCPA	Distance to Closest Point of Approach
EMSA	European Maritime Safety Agency
FMECA	Failure Mode Effects and Criticality Analysis
FQSD	Fuzzy Quaternion Ship Domain
FSA	Formal Safety Assessment
GCAF	Gross Cost of Averting a Fatality
GGRS87	Hellenic Geodetic Reference System 1987
HAZID	Hazard Identification
HAZOP	Hazard Operability
HRA	Human Reliability Analysis
IACS	International Association of Classification Societies
IAIN	International Association of Institutes of Navigation
IMCO	Inter-Governmental Maritime Consultative Organisation
IMO	International Maritime Organisation
LNG	Liquefied Natural Gas carriers
LPG	Liquefied Petroleum Gas carriers
MDTC	Minimum Distance to Collision
MSC	Mediterranean Shipping Company
NCAF	Net Cost of Averting a Fatality
NL - VO	Non Linear – Velocity Obstacle
RCO	Risk Control Option
RCM	Risk Control Measure
ROPAX	Roll – on Roll – off Passenger ship-ferries
RORO	Roll – on Roll - off
SOLAS	Safety of Life at Sea
SWIFT	Structured What if Technique
TCPA	Time to the Closest Point of Approach
TMSRCC	Turkish Maritime Search and Rescue Coordination Center
TSS	Traffic Separation Scheme
VCRO	Vessel Conflict Ranking Operator
VO	Velocity Obstacle
WGS84	World Geodetic System 1984

Περίληψη

Οι συγκρούσεις αποτελούν έναν από τους πιο συνήθεις τύπους ναυτικών ατυχημάτων, ελλοχεύοντας σημαντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη ζωή, τις οικονομίες αλλά και το περιβάλλον. Επομένως η ρεαλιστική εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισής τους αλλά και των συνεπειών που αυτές μπορεί να επιφέρουν, αποτελεί ζήτημα ζωτικής σημασίας κατά τη διαδικασία της ανάλυσης ρίσκου αλλά και χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των αρμόδιων φορέων ναυτικής ασφάλειας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στον καθορισμό του αναμενόμενου αριθμού συγκρούσεων στο πυκνότερο από άποψη κυκλοφορίας κομμάτι του Αιγαίου Πελάγους, ανάμεσα στο Στενό της Ελαφονήσου και σε αυτό των Δαρδανελίων. Για το σκοπό αυτό, η κυκλοφορία στην περιοχή ενδιαφέροντος προσομοιώνεται στοχαστικά στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab για χρονικό διάστημα ενός μήνα. Ως εισροές χρησιμοποιούνται στοιχεία του τοπικού στόλου τα οποία αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα Marine Traffic. Σε αυτά αντιστοιχίζονται κατάλληλες κατανομές μέσω στατιστικών ελέγχων στη βάση της μεθόδου επαναλαμβανόμενης παραγωγής τυχαίων αριθμών Monte Carlo. Για την εξαγωγή του αναμενόμενου αριθμού ατυχημάτων εφαρμόζεται η δημοφιλής γεωμετρική μέθοδος σε συνδυασμό με το κριτήριο της διαμέτρου σύγκρουσης (collision diameter), ενώ κρίνεται αναγκαία η εκτέλεση του κώδικα για έναν επαρκή αριθμό επαναλήψεων. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση του απορρέοντος ρίσκου, παράλληλα με την εξαγωγή επωφελών συμπερασμάτων και την ανάλυση των περιθωρίων βελτίωσης του αναπτυχθέντος μοντέλου.

Στο 1^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση στην οποία περιγράφονται οι εξελίξεις και οι διαφορετικές προσεγγίσεις πάνω στον τομέα της μελέτης των συγκρούσεων από τον 20^ο αιώνα μέχρι σήμερα. Συν τοις άλλοις επεξηγούνται ορισμένες βασικές έννοιες, χρήσιμες κατά την ανάγνωση της διπλωματικής εργασίας.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται τα ναυτικά ατυχήματα συνολικά με έμφαση στην κατηγορία των συγκρούσεων μέσω της παράθεσης αντίστοιχων ιστορικών στατιστικών στοιχείων και ερευνών. Επιπροσθέτως, διενεργείται μία ιστορική αναδρομή στους διεθνείς κανονισμούς σύγκρουσης από τον 19^ο αιώνα. Οι κανονισμοί αυτοί, γνωστοί σήμερα ως COLREGs 1972, σκιαγραφούνται αναλυτικά ως προς τα πέντε κομμάτια που τους απαρτίζουν.

Στο 3^ο κεφάλαιο διεξάγεται μία ανασκόπηση της ασφάλειας και του ρίσκου στις θαλάσσιες μεταφορές παράλληλα με τη λεπτομερή περιγραφή της Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (Formal Safety Assessment) του IMO και των πέντε βημάτων από τα οποία αυτή αποτελείται. Ακόμη, παρατίθενται και κατηγοριοποιούνται υπάρχοντα μοντέλα σύγκρουσης (γεωμετρικά και στατιστικά) και τα αντίστοιχα κριτήρια υποψηφιότητας.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ενδελεχώς το μοντέλο σύγκρουσης και αναλύονται τα σημαντικά βήματα βελτίωσης σε σχέση με την προηγούμενη προσέγγιση του Δημήτρη Ράκα. Περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων τα οποία αποτελούν τις εισροές στον αλγόριθμο προσομοίωσης της κυκλοφορίας. Ακόμη, επεξηγείται η μέθοδος ανίχνευσης των υποψήφιων ζευγαριών σύγκρουσης συναρτήσει του επιλεγμένου κριτηρίου της διαμέτρου σύγκρουσης και του αντίστοιχου παράγοντα αιτιώδους συνάφειας.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα του κώδικα Matlab τα οποία σχολιάζονται διεξοδικά, συγκρινόμενα με παρόμοιες μελέτες επικεντρωμένες στην ίδια ή σε άλλες θαλάσσιες περιοχές.

Στο 6^ο κεφάλαιο τέλος, συνοψίζονται τα χρήσιμα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις του μοντέλου για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: σύγκρουση; ανάλυση ρίσκου; Προσομοίωση; θαλάσσια κυκλοφορία; γεωμετρικό μοντέλο; Αιγαίο Πέλαγος; μοντελοποίηση

Abstract

Collisions are one of the most common types of maritime accidents, posing serious threats for human life, economies and the environment. Therefore the realistic estimation of the probability of their appearance as well as their consequences is of vital importance during risk analysis and makes for a very useful tool in the hands of maritime safety authorities.

The following thesis focuses on the determination of the expected number of collisions in the most dense, in respect to traffic, part of the Aegean sea: between the strait of Elafonisos and that of Dardanelia. To achieve that, the traffic in the area of interest is simulated stochastically using the programming environment Matlab for the timeframe of 1 month. The data of the local fleet found on the website Marine Traffic are used as the input of the program. Mathematical distributions are matched to the data through statistical tests in the base of the repeated random number generation method Monte Carlo. To assess the expected number of accidents as the output, the famous geometrical method is used in combination with the criterion of collision diameter, while at the same time the execution of the code for a sufficient number of repetitions is deemed necessary. The results are used for the evaluation of the resulting risk simultaneously with the output of beneficial conclusions and the analysis of the improvement margin for the developed model.

Chapter 1 includes the literature review, through which the advancements and the different approaches concerning the study of collisions from the 20th century up to the current day are analysed. In addition the chapter includes an explanation of basic terminology, useful during the reading of the thesis.

In Chapter 2 there is an analysis of maritime accidents with an emphasis in the category of collisions by citing relevant historical data and research. Moreover, a historical retrospect is conducted around international collision regulations from the 19th century. The regulations, known as COLREGs 1972, are outlined extensively in regard to the 5 parts that make them up.

Chapter 3 illustrates an overview of safety and risk in maritime alongside a detailed description of the Formal Safety Assessment of IMO and of the five steps from which it consists. Additionally, the collisions models (geometrical and statistical) and the responding candidacy criteria are listed.

Chapter 4 contains an in-depth presentation of the collision model as well as an analysis of the steps taken to improve it in comparison to the previous approach of Dimitris Rakas. There is a thorough description of the process for the collection and processing of the data which comprise the input of the maritime traffic simulation. Also explained, is the method of detection of collision candidates in relation to the selected criterion of the collision diameter and the corresponding causation factor.

In Chapter 5 Matlab code results, which are commented extensively, are listed and compared alongside other studies focused on the same or similar seaways.

Finally, in Chapter 6 there is a summary of the useful conclusions of the thesis and suggestions for possible future improvements to the model.

Keywords: collision; risk analysis; simulation; maritime traffic; geometrical model; Aegean Sea; modeling

1.Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Οι θαλάσσιες μεταφορές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας καθώς περίπου το 80% του παγκόσμιου φορτίου μεταφέρεται μέσω πλοίων (Asariotis et al., 2016). Οι συγκρούσεις όντας εκ των κυριότερων τύπων ναυτικών ατυχημάτων (16% του συνολικού αριθμού), αποτελούν έναν από τους βασικότερους παράγοντες του ρίσκου σε αυτές (EMSA, 2020). Συνεπώς, η προσπάθεια αποφυγής τους και η βελτίωση της ναυτικής ασφάλειας αποτελούσαν ανέκαθεν αντικείμενο μελέτης και ενδιαφέροντος.

Η πιθανολογική ανάλυση ρίσκου των θαλάσσιων συγκρούσεων προσέλκυε διαχρονικά το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας, δεδομένου του ότι παρέχει συνοπτικά και ποσοτικά αποτελέσματα τόσο για την αξιολόγηση του κινδύνου, όσο και για την εκτίμηση των συνεπειών. Οι περισσότερες μελέτες βασίζονται στη γεωμετρική μέθοδο των Fujii and Shiobara (1971) και Macduff (1974), σύμφωνα με τους οποίους ο αριθμός των αναμενόμενων συγκρούσεων εντός μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, ισούται με το γινόμενο των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης N_A (ή αλλιώς γεωμετρικής πιθανότητας σύγκρουσης) και του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας P_C (causation factor). Οι Fujii and Tanaka (1971) και Goodwin (1975) εισήγαγαν πρώτοι την έννοια του τομέα ασφαλείας του πλοίου και συγκεκριμένα της κυκλικής και ελλειπτικής περιοχής ως κριτήριο υποψηφιοτήτων σύγκρουσης. Έκτοτε, η έννοια αυτή βρήκε ευρεία εφαρμογή και παραλλαγές. Οι Chen et al. (2017) λόγω χάρη, εξήγαγαν την πιθανότητα σύγκρουσης στον ποταμό Σεντσέν μέσω της χρησιμοποίησης του ασαφούς τομέα του πλοίου FQSD (Fuzzy Quaternion Ship Domain). Οι Wang and Chin (2016), όρισαν μία δυναμικά μεταβαλλόμενη από την ταχύτητα περιοχή ασφαλείας για συναντήσεις πλοίων στον Κόλπο της Σιγκαπούρης. Ο Pedersen (1995) εξ'άλλου, όρισε τη διάμετρο σύγκρουσης ως την κρίσιμη απόσταση σε μια συνάντηση πλοίων, διάμετρος που εξαρτάται από το μήκος και το πλάτος των εμπλεκόμενων σκαφών, ενώ στη μελέτη των Montewka et al. (2010) ο αριθμός των υποψήφιων ζευγαριών σύγκρουσης προέκυψε μέσω της έννοιας του MDTC (Minimum Distance to Collision) στην οποία λαμβάνονται υπ'όψιν και οι ελιγμοί των εκάστοτε πλοίων. Άλλα κριτήρια που συναντώνται στη βιβλιογραφία αποτελούν παράμετροι όπως το CPA (Closest Point of Approach) και το TCPA (Time to the Closest Point of Approach) (Debnath and Chin, 2010). Επιπλέον, οι Chen et al. (2018) εφάρμοσαν το κριτήριο του βασιζόμενου στις ταχύτητες των πλοίων αλγόριθμου NL-VO (Non Linear Velocity Obstacle Algorithm), συγκρίνοντας τα αποτελέσματά της μελέτης τους με τις έως τότε υπάρχουσες προσεγγίσεις. Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις, η γεωμετρική αυτή πιθανότητα προσεγγίστηκε στατιστικά συνυπολογίζοντας παραμέτρους όπως η κυκλοφοριακή ροή, οι διαστάσεις, η χωρική κατανομή των πλοίων κ.α. (Pedersen et al., 2010), είτε αναπτύσσοντας κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα (Lusic and Coric, 2015). Η ευρεία χρήση των δεδομένων του Αυτόματου Συστήματος Ταυτοποίησης (Automatic Identification System/AIS) τα οποία παρέχουν στατικές και δυναμικές πληροφορίες των πλοίων (θέση, ταχύτητα, διαστάσεις κ.α.), προσέφερε νέες ευκαιρίες στον τομέα της ανάλυσης ρίσκου των συγκρούσεων καθώς κατέστησε δυνατή την ακριβέστερη ανάλυση της πραγματικής

συμπεριφοράς του κάθε σκάφους (Silveira et al., 2013). Οι Mou et al. (2010) διεξήγαγαν μία πιλοτική έρευνα εισαγωγής των στοιχείων αυτών κατά την εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης στη θαλάσσια περιοχή πυκνής κυκλοφορίας του Ρότερνταμ. Εκτός από την απευθείας εφαρμογή τους, τα δεδομένα του AIS έχουν αποτελέσει και εισροές σε υπολογιστικές προσομοιώσεις με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη μελέτη των Goerlandt and Kujala (2011) στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος Monte Carlo προκειμένου να μοντελοποιηθεί η κυκλοφορία μέσω μαθηματικών κατανομών στον κόλπο της Φινλανδίας. Οι Przywarty et al. (2015) επίσης απεικόνισαν στοχαστικά την κυκλοφορία στη Βαλτική Θάλασσα, επικεντρωνόμενοι στις συγκρούσεις μεταξύ επιβατηγών και πλοίων μεταφοράς χημικών. Ορισμένοι άλλοι μελετητές υπολόγισαν την πιθανότητα σύγκρουσης όχι μέσω της χρήσης της γεωμετρικής μεθόδου, αλλά εφαρμόζοντας διάφορες στατιστικές μεθόδους όπως για παράδειγμα γραμμική παλινδρόμηση (Yip, 2008).

Ο παράγοντας αιτιώδους συνάφειας (causation factor), περιγράφει την πιθανότητα μια υποψήφια συνάντηση να καταλήξει τελικά σε σύγκρουση ακόμα και αν πραγματοποιηθούν οι κατάλληλοι ελιγμοί (Li et al., 2012). Οι Kujala et al. (2009) προχώρησαν στην εκτίμηση του μέσω της χρήσης ιστορικών στοιχείων ατυχημάτων στον Κόλπο της Φινλανδίας. Η ανάλυση της ανθρώπινης αξιοπιστίας πάντως έχει αποδειχθεί σημαντικό εργαλείο για τον καθορισμό του παράγοντα αυτού, για αυτό το λόγο τεχνικές με τη δυνατότητα ενσωμάτωσής της όπως τα Δένδρα Σφαλμάτων (Fault Trees) και τα Δίκτυα Bayes ή Δίκτυα Πίστης (Bayesian Belief Networks/BBN) έχουνε τύχει αυξημένης εφαρμογής τα τελευταία χρόνια (Groth and Swiler, 2013). Στη μελέτη των Martins and Maturana (2010) αναλύθηκε η συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα στα ατυχήματα σύγκρουσης και καταστρώθηκε ένα Fault Tree για την εκτίμηση της πιθανότητας κάποιο υποψήφιο ζευγάρι να οδηγήσει τελικά σε ατύχημα. Παρόμοια μεθοδολογία ακολούθησαν και οι Uğurlu et al. (2013) που εξήγαγαν την πιθανότητα σύγκρουσης λαμβάνοντας υπ' όψιν ένα πλήθος διαφορετικών παραγόντων οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν σε αυτήν. Από την άλλη, οι Hänninen and Kujala (2012) εγκαθίδρυσαν ένα BBN συμπεραίνοντας πως η αλλαγή πορείας ενός εκ των εμπλεκόμενων πλοίων αποτελεί τον πιο επιδραστικό παράγοντα σε μία επικείμενη σύγκρουση. Οι Sotiralis et al. (2016) δε, προσέγγισαν τον παράγοντα αιτιώδους συνάφειας συναρτήσας της ανθρώπινης απόδοσης μέσω ενός BBN.

Πέραν όλων των άλλων, μια σύγκρουση μπορεί να επιφέρει πολύ σοβαρές συνέπειες σε όρους ανθρώπινων, οικονομικών και περιβαλλοντικών απωλειών, συνεπώς η - παράλληλη με την ανάλυση της πιθανότητας της σύγκρουσης - εκτίμησή τους, μπορεί να διευκολύνει τις αρμόδιες αρχές προκειμένου να αποκτήσουν μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το συνολικό επίπεδο του ρίσκου και την ευκολότερη διαχείρισή του (Helle et al., 2015). Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες λαμβάνει χώρα η σύγκρουση (γωνία συνάντησης, ταχύτητες κ.α.), επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη δριμύτητά τους (Youssef et al., 2014). Οι Goerlandt and Montewka (2014) ανέπτυξαν ένα Δίκτυο Bayes για την εκτίμηση της πιθανότητας διαρροής πετρελαίου

έπειτα από σύγκρουση δεξαμενοπλοίων ενώ έμφαση στους κινδύνους που ελλοχεύουν οι ελιγμοί των υγραεριοφόρων (LPG) πλοίων στο λιμάνι του Στέτσιν στην Πολωνία, αναπτύσσοντας ένα εμπειρικό μοντέλο για την εκτίμηση του μεγέθους της ζημιάς τους μετά από πιθανό ατύχημα και προτείνοντας αλλαγές στους κανονισμούς του λιμανιού, έδωσαν οι Guçma and Bakk (2016). Τα Δένδρα Γεγονότων (Event Trees) αποτελούν πάντως μία από τις πιο συνήθεις μεθοδολογίες για την εκτίμηση των συνεπειών ενός ατυχήματος, ενώ έχουν υιοθετηθεί και από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organisation/IMO) στα πλαίσια της Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (Formal Safety Assessment/FSA). Οι Chai et al. (2017) εφάρμοσαν τη συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον καθορισμό πιθανής απώλειας ζωών ή περιβαλλοντικής μόλυνσης στον Κόλπο της Σιγκαπούρης.

Μοντέλα σύγκρουσης έχουν αναπτυχθεί σε ένα πλήθος διαφορετικών θαλάσσιων περιοχών ανα τον πλανήτη. Ενδεικτικά οι Goerlandt and Kujala (2014) επικεντρώθηκαν στον Κόλπο της Φινλανδίας, ελέγχοντας την εγκυρότητα διάφορων προσεγγίσεων εκτίμησης του αριθμού συγκρούσεων σε αυτόν. Πολλοί άλλοι ερευνητές έχουν καταπιαστεί με την ανάλυση ρίσκου σε λιμάνια, με τους Weng and Xue (2015) να χρησιμοποιούν τον κυκλικό τομέα του πλοίου ως κριτήριο υποψηφιότητας σε αυτό της Σιγκαπούρης. Σε ο,τι έχει να κάνει με νερά ποταμών, οι Rong et al. (2015) εκτίμησαν τον αριθμό των παρ'ολίγων συγκρούσεων (near-miss collision) προσομοιώνοντας την κυκλοφορία στις εκβολές του Τάγου στις Πορτογαλικές ακτές. Τα στενά περάσματα θάλασσας επίσης, αυξάνουν την επικινδυνότητα σύγκρουσης, γι αυτό το λόγο οι Endrina et al. (2018) εκτίμησαν το ρίσκο σύγκρουσης ενός στόλου πλοίων RoPax αλλά και τις πιθανές συνέπειές της, στα πλαίσια της FSA που διεξήγαγαν στον Πορθμό του Γιβραλτάρ. Όσον αφορά το χώρο του Αιγαίου Πελάγους οι Nivolinatou et al. (2016) εφάρμοσαν ένα BBN για τον καθορισμό των περιβαλλοντικών συνεπειών μετά από ατύχημα σύγκρουσης η προσάραξης, ενώ οι Ventikos et al. (2017) ανέλυσαν στατιστικά τα ναυτικά ατυχήματα της περιόδου 1999-2009 σε διάφορες ζώνες του, υπολογίζοντας την πιθανότητα εμπλοκής ενός πλοίου σε αυτά μέσω της κατανομής Poisson.

2. ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΙΣ

2.1 Ναυτικά Ατυχήματα

Η σύγκρουση ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των ναυτικών ατυχημάτων (maritime accidents), δηλαδή των περιστατικών εκείνων κατά τα οποία ένα άτομο, το πλοίο και τα επιμέρους κομμάτια του ή το περιβάλλον τίθονται σε κίνδυνο η πιθανή βλάβη. Σε αυτά δεν περιλαμβάνεται οποιαδήποτε εσκεμμένη πράξη ή παράλειψη που αποσκοπεί στην πρόκληση βλάβης ή ζημιάς στον άνθρωπο, το πλοίο ή το περιβάλλον (IMO MSC-MEPC.3/Circ.3, 2008).

Πιο συγκεκριμένα και σύμφωνα με το ψήφισμα A.849(20) της 27^{ης} Νοεμβρίου 1997 του IMO περί υιοθέτησης του Κώδικα για την Διερεύνηση Ναυτικών Ατυχημάτων και Συμβάντων, ως ναυτικό ατύχημα ορίζεται ένα γεγονός το οποίο είναι δυνατόν να έχει ως αποτέλεσμα:

- Το θάνατο ή το σοβαρό τραυματισμό κάποιου ατόμου, ο οποίος προκλήθηκε από ή έχει σχέση με τις λειτουργίες το πλοίου
- Την απώλεια προσώπου από το πλοίο, η οποία προκλήθηκε από η έχει σχέση με τις λειτουργίες του πλοίου
- Την απώλεια, τεκμαρτή απώλεια ή ολική εγκατάλειψη του πλοίου
- Υλική ζημιά στο πλοίο
- Προσάραξη, ανικανότητα ή εμπλοκή του πλοίου σε σύγκρουση
- Υλική ζημιά, η οποία προκλήθηκε από ή έχει σχέση με τις λειτουργίες το πλοίου
- Ζημιά στο περιβάλλον οφειλόμενη σε βλάβη του πλοίου η οποία προκλήθηκε ή έχει σχέση με τις λειτουργίες του πλοίου

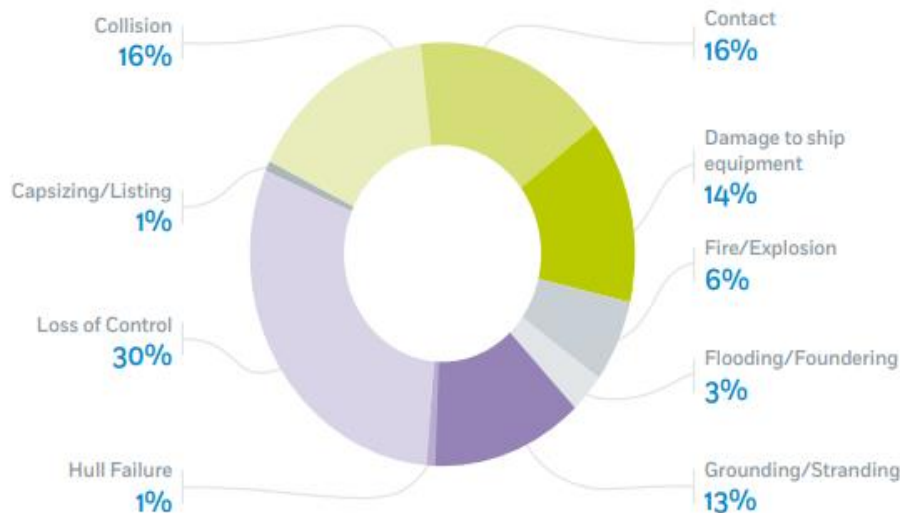
Ανάλογα με τη σοβαρότητά τους, τα ναυτικά ατυχήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- **Πολύ σοβαρά ναυτικά ατυχήματα:** τα ατυχήματα που έχουν ως αποτέλεσμα την ολική απώλεια του πλοίου, την απώλεια ζωής ή τη σοβαρή ρύπανση του περιβάλλοντος.
- **Σοβαρά ναυτικά ατυχήματα:** τα ατυχήματα τα οποία δεν χαρακτηρίζονται ως πολύ σοβαρά και μπορεί να περιλαμβάνουν πυρκαγιά, σύγκρουση, προσάραξη, βαριά ζημιά λόγω καιρού, ρήγματα στη γάστρα κ.α., που καθιστούν πλέον μη αξιόπλοο το πλοίο (π.χ. ανάγκη ρυμουλκήσεως ή βοήθειας από την ξηρά)

- **Λιγότερο σοβαρά ατυχήματα:** Ως λιγότερο σοβαρά ατυχήματα ορίζονται εκείνα τα οποία δεν χαρακτηρίζονται ούτε ως πολύ σοβαρά ούτε ως σοβαρά
- **Ναυτικά συμβάντα**

2.2 Συγκρούσεις

Με τον όρο σύγκρουση (collision) εννοείται η δομική πρόσκρουση μεταξύ δύο πλοίων, ανεξαρτήτως του εάν αυτά βρίσκονται εν πλω ή αγκυροβολημένα (IMO, 2008). Οι συγκρούσεις, ως ένας από τους βασικότερους τύπους ατυχημάτων στη ναυτιλία, αποτελούσαν ανέκαθεν απειλή για την ασφάλεια των θαλάσσιων μεταφορών, την τοπική και παγκόσμια οικονομία αλλά και την κοινωνία, λόγω των δυσβάσταχτων συνεπειών που μπορούν να επιφέρουν (Chen et al., 2019). Σύμφωνα με τα στοιχεία της EMSA (2020) μάλιστα, αποτέλεσαν την αιτία για το 16% των ναυτικών ατυχημάτων που έλαβαν χώρα κατά το 2019, όπως φαίνεται και στην Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Κατανομή ναυτικών ατυχημάτων για το 2019 (EMSA, 2020)

Κατά το παρελθόν, πολλές στατιστικές μελέτες σε διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές ανα τον κόσμο κατέδειξαν τη σημαντική συμβολή των συγκρούσεων στον συνολικό αριθμό των ναυτικών ατυχημάτων. Το 16% του συνόλου των σοβαρών ναυτικών ατυχημάτων την περίοδο 1983-1989 προήλθαν από περιστατικά σύγκρουσης (Kristiansen, 2013). Οι Elioroulou et al. (2016), αναλύοντας δεδομένα της βάσης IHS Sea-web για τη χρονική περίοδο 2000-2012, συμπέραναν ότι η σύγκρουση αποτέλεσε ένα από τα ατυχήματα με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ιδιαίτερα σε πλοία που επιχειρούσαν συχνότερα σε θαλάσσιους χώρους με μεγάλο συνωστισμό, όπως RoRo, Car Carriers και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Containerships), τη στιγμή που τα LNG ήταν εκείνα που ενεπλάκησαν στα λιγότερα περιστατικά.

Όσον αφορά τα ελληνικά χωρικά ύδατα, οι Ventikos et al. (2017) μελέτησαν καταγεγραμμένα στοιχεία ατυχημάτων σε συγκεκριμένες ζώνες του Αιγαίου Πελάγους από το 1999 έως και το 2009, πραγματοποιώντας στατιστική ανάλυση συναρτήσεως παραμέτρων όπως ο τύπος των πλοίων, η σημαία, η ηλικία κ.α., με το 12% αυτών να οφείλεται σε σύγκρουση. Οι Buber et al. (2018), επεξεργάστηκαν ένα ιστορικό 130 ατυχημάτων μεταξύ του 2001 και του 2016 στην περιοχή του νοτιοανατολικού Αιγαίου, βασιζόμενοι σε στοιχεία του Τούρκικου Κέντρου Συντονισμού Έρευνας και Διάσωσης (TMSRCC), με τη σύγκρουση να αποτελεί το 15% του συνολικού αριθμού τους.

Ενδεικτικό στοιχείο αποτελεί επίσης το γεγονός ότι το πιο πολύνεκρο ναυτικό δυστύχημα όλων των εποχών προήλθε από σύγκρουση. Συνέβη στις Φιλιππίνες στις 20 Δεκεμβρίου του 1987, όταν το υπερφορτωμένο από επιβάτες επιβατηγό πλοίο MV Doña Paz που κατευθυνόταν προς τη Μανίλα, συγκρούστηκε στα στενά Tables με το πετρελαιοφόρο MT VECTOR το οποίο μετέφερε πάνω από 8800 βαρέλια βενζίνης. Η φωτιά που ξέσπασε είχε ως απολογισμό 4386 νεκρούς και μόλις 26 επιζώντες (Perez et al., 2011).



Σχήμα 2.2: Σύγκρουση μεταξύ πλοίων κοντά στις ακτές της Σιγκαπούρης το 2003 (Calle and Alves, 2011)

2.3 Αίτια Συγκρούσεων

Η κατανόηση των αιτιών που οδηγούν στην πραγματοποίηση ενός ατυχήματος, είναι πολύ σημαντική προκειμένου να καταστεί δυνατή η λήψη αποτελεσματικών μέτρων πρόληψης (Hollnagel, 2002).

2.3.1 Ανθρώπινοι και Οργανωτικοί Παράγοντες

Μεταξύ των συγγραφέων παρατηρείται μια ομοφωνία σχετικά με τον ανθρώπινο παράγοντα ως κυριότερη αιτία ναυτικών ατυχημάτων (Hetherington et al., 2006; Martins and Maturana, 2010; Chauvin et al., 2013 κ.α.). Η τάση αυτή επικρατεί

και στο πεδίο μελέτης των συγκρούσεων. Το σύστημα θαλάσσιων μεταφορών άλλωστε, είναι ένα πολύπλοκο σύστημα, άμεσα συνυφασμένο με την ανθρώπινη ύπαρξη και αξιοπιστία. Κατά τη διαδικασία λήψης και εκτέλεσης αποφάσεων, τυχόν σφάλματα ανθρώπινης ή οργανωτικής φύσεως, θα μπορούσαν να συμβάλλουν σε πολύ μεγάλο βαθμό σε ένα πιθανό συμβάν σύγκρουσης (Chen et al., 2019).

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει και μοντελοποιήσει την επίδραση των ανθρώπινων και οργανωτικών παραγόντων στην πιθανότητα εμφάνισης ατυχήματος. Στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, επικίνδυνα περιστατικά έλαβαν χώρα λόγω κάποιας από τις παρακάτω αιτίες ή ως αποτέλεσμα συνδυασμού αυτών (Parvez, 2010; Fuazudeen, 2013) :

- Περιορισμένες ικανότητες πληρώματος
- Κόπωση
- Έλλειψη επικοινωνίας
- Ελλιπής συντήρηση
- Ελλιπής εφαρμογή κουλτούρας και πρωτοκόλλων ασφαλείας ή άλλων διαδικασιών
- Ανεπαρκής εκπαίδευση
- Εσφαλμένη αξιολόγηση της κατάστασης
- Άγχος

Σύμφωνα με στατιστικές μελέτες, άνθρωποι και οργανωτικοί παράγοντες ήταν υπεύθυνοι για την συντριπτική πλειοψηφία των ναυτικών ατυχημάτων σε ποσοστό 75%-96% (Ren et al., 2008; Uğurlu et al., 2015) και των συγκρούσεων σε ποσοστό 86%-96% (William, 2003). Συνέβαλλαν επίσης στο 57,1% των περιστατικών στα οποία ενεπλάκησαν πλοία που έφεραν την ελληνική σημαία, το χρονικό διάστημα 1993-2006 (Tzannatos, 2010).

2.3.2 Τεχνικοί Παράγοντες

Περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων βλάβες στο σύστημα πηδαλιουχίας ή την κύρια μηχανή του πλοίου (οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν απώλεια των ελκτικών ικανοτήτων του και να οδηγήσουν αναπόφευκτα σε σύγκρουση), λάθη στο σχεδιασμό και κατασκευαστικές αστοχίες. Επιπροσθέτως, παράγοντες όπως ο ελλιπής εξοπλισμός ή ελαττωματικά υλικά και προμήθειες αυξάνουν τις πιθανότητες εμφάνισης ατυχήματος (Shaluf et al., 2003).

Στον Κόλπο της Φινλανδίας, οι τεχνικές αστοχίες αντιπροσώπευσαν το 4,76% των αιτιών που οδήγησαν σε σύγκρουση, ενώ για το σύνολο των ναυτικών ατυχημάτων το ποσοστό αυτό ανήλθε στο 11,95% (Kujala et al., 2009). Οι Trucco et al. (2008) ανέφεραν πως τεχνικοί παράγοντες συνετέλεσαν στο 16% των ναυτικών ατυχημάτων.

Η αξιοπιστία των πλοίων βελτιώνεται συνεχώς επομένως, σε συνάρτηση και με τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, ο αριθμός των οφειλόμενων σε τεχνικές

αστοχίες ατυχημάτων έχει μειωθεί σημαντικά. Ως φυσικό επακόλουθο, το ποσοστό εκείνων που προκαλούνται λόγω ανθρώπινων παραγόντων αυξάνεται (Fan et al., 2017).

2.3.3 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες

Αναφέρονται στο φυσικό περιβάλλον μέσα στο οποίο πλέει ένα σκάφος. Οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες δυσκολεύουν την πραγματοποίηση ελιγμών, περιορίζουν την ορατότητα κ.α., δημιουργώντας έτσι ευνοϊκές συνθήκες για μία σύγκρουση (Yong, 2019).

2.4 Νομοθετικό Πλαίσιο

2.4.1 Ιστορική Εξέλιξη

Η νομοθεσία των ναυτικών συγκρούσεων έλκει τις ρίζες της από το δίκαιο της Αρχαίας Ρώμης. Βέβαια, κατά τη διάρκεια της περιόδου εκείνης δεν υπήρχαν αναφορές για συγκεκριμένους κανόνες πλοήγησης, εκτός των θαλάσσιων εθίμων και της νομολογίας περί ευθύνης σε περίπτωση απώλειας ή βλάβης. Το 1840 το Trinity House στο Λονδίνο κατήρτισε ένα σύνολο κανονισμών για το σύνολο των ατμόπλοιων του Ηνωμένου Βασιλείου, οι οποίοι απέκτησαν νομική ισχύ από το βρετανικό Κοινοβούλιο το 1846 στα πλαίσια του νόμου περί πλοήγησης των ατμόπλοιων. Δύο χρόνια αργότερα, το 1848, στο νόμο αυτό ενσωματώθηκαν κανονισμοί του ναυαρχείου σχετικά με τα φώτα ναυσιπλοίας. Στις τροποποιήσεις του 1851 και του 1854 συμπεριλήφθηκαν και τα ιστιοφόρα για τα οποία το 1858 καθιερώθηκαν τα χρωματιστά πλευρικά φώτα (πράσινα για τη δεξιά πλευρά – starboard, κόκκινα για την αριστερή – port και λευκά για πάνω στον ιστό – masthead). Ταυτόχρονα, θεσμοθετήθηκαν και τα σήματα ομίχλης (fog signals) από τα σκάφη. Παρόμοια μέτρα ελήφθησαν το ίδιο χρονικό διάστημα και στις Ηνωμένες Πολιτείες οι οποίες από το 1850 είχαν υιοθετήσει το ναυτικό δίκαιο του Ηνωμένου Βασιλείου (Kemp, 2008).

Το 1863 το βρετανικό συμβούλιο εμπορίου σε συνεννόηση με τη γαλλική κυβέρνηση εγκαθίδρυσαν ένα νέο σύνολο κανόνων, οι οποίοι μέχρι το 1864 είχαν γίνει αποδεκτοί από τριάντα και πλέον ναυτικά κράτη συμπεριλαμβανομένης της Γερμανίας και των Ηνωμένων Πολιτειών (μετά από ψήφισμα του Κογκρέσο και υπογραφή του Προέδρου Αβραάμ Λίνκολν στις 29 Απριλίου του 1864). Το 1884 οι κανονισμοί αυτοί τροποποιήθηκαν χωρίς σημαντικές διαφορές, ενώ το 1889 στην Ουάσινγκτον έλαβε χώρα η πρώτη διπλωματική διάσκεψη για κανόνες ναυσιπλοίας η οποία συγκλήθηκε από τον τότε Πρόεδρο των ΗΠΑ Μπέντζαμιν Χάρισον και είχε ως αποτέλεσμα το πρώτο ολοκληρωμένο σύνολο διεθνών κανονισμών που τέθηκε σε ισχύ το 1897 (Healy and Sweeny, 1998).

Θα μπορούσε να υπάρχει η παρανόηση ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία είχε πλέον αποκτήσει ένα ενιαίο σύνολο κανονισμών, ωστόσο κάτι τέτοιο δεν ήταν πραγματικότητα καθώς δεν υπήρχε κάποια πραγματική οδηγία ενοποίησής τους στα

πλαίσια ενός κοινού δικαίου. Κάτι τέτοιο επιχειρήθηκε με τη σύμβαση των Βρυξελλών στις 23 Σεπτεμβρίου του 1910, εντούτοις αυτή υπογράφηκε μόνο από 24 χώρες ενώ άλλες τρεις δεν την επικύρωσαν. Το 1914, αμέσως μετά το ναυάγιο του Τιτανικού, παρουσιάστηκε η πρώτη Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα γνωστή και ως SOLAS (Safety of Life at Sea), η οποία όμως δεν τέθηκε ποτέ σε εφαρμογή λόγω της έναρξης του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου. Η συνδιάσκεψη που διεξήχθη το 1929 στο Λονδίνο, είχε ως σκοπό την υιοθέτηση μιας νέας σύμβασης SOLAS παρόμοιας μορφής με εκείνης του 1914, αλλά με την προσθήκη κάποιων νέων κανονισμών. Σε ένα από τα δύο παραρτήματα της σύμβασης γινόταν αναθεώρηση των έως τότε διεθνών κανονισμών για την αποφυγή συγκρούσεων στη θάλασσα (collision regulations). Παρ'όλα αυτά μόνο 18 κράτη παρευρέθηκαν στη συγκεκριμένη σύσκεψη, γεγονός που, σε συνδυασμό με την πληθώρα των διαφορετικών κανόνων και κανονισμών που ίσχυαν σε άλλες χώρες, δημιουργούσε σύγχυση και αντικρουόμενες πληροφορίες σε όλα τα πλοία.

Τελικά το 1948 στη διεθνή διάσκεψη SOLAS η οποία πραγματοποιήθηκε στη Γενεύη υπο την αιγίδα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών, εγκρίθηκε η σύμβαση περί ιδρύσεως του IMCO (Inter-Governmental Maritime Consultative Organisation) γνωστού ως IMO από το 1982 μέχρι σήμερα. Ο οργανισμός αυτός θα αποτελούσε πλέον την υπεύθυνη για τα ζητήματα ναυτικής ασφάλειας αρχή. Εκτός των άλλων, διατυπώθηκε και ένα σύνολο νέων προτάσεων, συμπεριλαμβανομένης εκείνης για τη χρήση ραντάρ, οι οποίες επικυρώθηκαν το 1952 και τέθηκαν σε ισχύ από το 1954. Στη νέα σύμβαση που υπογράφηκε το 1960 στο Λονδίνο από 55 κράτη μέλη, οι διεθνείς κανονισμοί σύγκρουσης αναδιατυπώθηκαν παράλληλα με την προσάρτηση ορισμένων καινούργιων. Έως το 1965 όμως η ραγδαία τεχνολογική ανάπτυξη άρχισε να καθιστά απαρχαιωμένες τις υπάρχουσες συμβάσεις, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για μία εκτεταμένη αναθεώρηση των κανονισμών η οποία θα λάμβανε υπ'όψιν εξελίξεις στη ναυσιπλοία όπως π.χ. η ευρεία χρήση και αποδοχή των ραντάρ, η αύξηση των διαστάσεων και της ταχύτητας αρκετών πλοίων και η εισαγωγή του διαχωρισμού της κυκλοφορίας (Barnes, 2019).

Έτσι στις 20 Οκτωβρίου του 1972, υιοθετήθηκε από τον IMO η Σύμβαση των Διεθνών Κανονισμών για την Αποφυγή Συγκρούσεων στη Θάλασσα 1972 (International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972) ή αλλιώς COLREGs 1972. Οι κανονισμοί αυτοί αντικατέστησαν το αντίστοιχο κομμάτι της σύμβασης SOLAS του 1960, με την αναγνώριση των Συστημάτων Διαχωρισμού τη Κυκλοφορίας (Traffic Separation Schemes) να αποτελεί μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες τους. Οι COLREGs ξεκίνησαν να εφαρμόζονται από τις 15 Ιουλίου του 1977 και έκτοτε τροποποιήθηκαν αρκετές φορές (1981,1987,1989,1993,2001,2007). Μέχρι σήμερα έχουν γίνει αποδεκτοί σχεδόν από το σύνολο των θαλάσσιων κρατών (Supriah, 2007)

2.4.2 COLREGs 1972

Οι COLREGs, γνωστοί και ως “Κανόνες του Δρόμου” (Rules of the Road), αποτελούνται 41 κανόνες διαιρεμένους σε 6 μέρη ως εξής (IMO, 1972):

ΜΕΡΟΣ Α – Γενικοί Κανόνες (1-3)

Αναλύεται το πεδίο εφαρμογής των κανονισμών. Σύμφωνα με τον Κανόνα 1 εφαρμόζονται σε όλα τα πλοία που πλέουν στην ανοικτή θάλασσα καθώς και στα ύδατα που συνδέονται με αυτή και είναι διαπλεύσιμα από ποντοπόρα σκάφη. Στο πρώτο μέρος υπογραμμίζεται επίσης η ευθύνη την οποία έχουν όλοι οι εμπλεκόμενοι για συμμόρφωση με τους κανονισμούς, ενώ περιέχονται και κάποιες γενικές ορολογίες.

ΜΕΡΟΣ Β – Κανόνες χειρισμού πλεύσης (4-19)

Το δεύτερο μέρος χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα. Το πρώτο τμήμα (Section 1) περιλαμβάνει τους κανόνες 4 έως 10 και σχετίζεται με τη συμπεριφορά των πλοίων σε οποιαδήποτε κατάσταση ορατότητας. Καλύπτονται ζητήματα όπως η πρόεπουσα οπτική και ακουστική επιτήρηση (look-out), ο καθορισμός της ασφαλούς ταχύτητας αλλά και ο κίνδυνος σύγκρουσης. Στον Κανόνα 7 αναφέρεται ότι κάθε σκάφος πρέπει να χρησιμοποιεί όλα τα διαθέσιμα και κατάλληλα για τις εκάστοτε συνθήκες μέσα, προκειμένου να καθοριστεί εάν υφίσταται κίνδυνος σύγκρουσης. Στον Κανόνα 8 αναλύονται οι απαραίτητες για την αποφυγή μίας σύγκρουσης ενέργειες. Ο Κανόνας 9 σχετίζεται με την διέλευση των πλοίων από στενές θαλάσσιες οδούς και κανάλια.

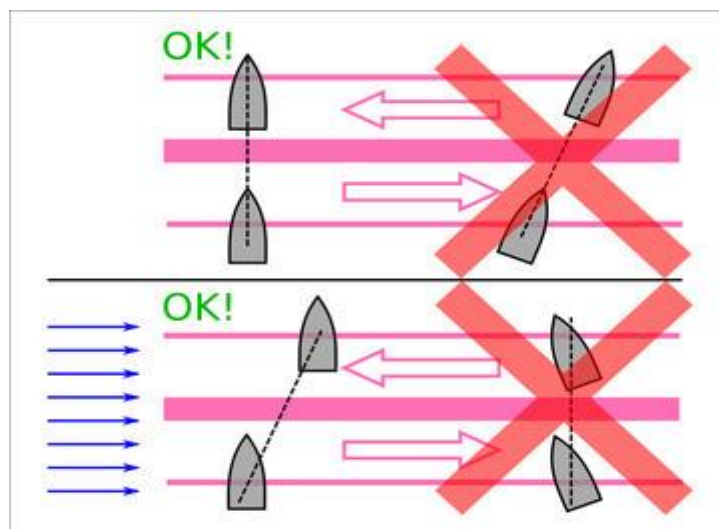
Ένας από τους πιο σημαντικούς και καινοτόμους κανόνες της σύμβασης, ο Κανόνας 10, σχετίζεται με τα Συστήματα Διαχωρισμού Κυκλοφορίας ή χάριν συντόμευσης TSS (Traffic Separation Schemes) και τη συμπεριφορά των πλοίων κοντά σε αυτά. Ο κανονισμός 8 του Κεφαλαίου 5 της SOLAS, αναγνωρίζει τον IMO ως τον μόνο αρμόδιο οργανισμό που ασχολείται με τα διεθνή μέτρα για τη δρομολόγηση των πλοίων. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη κυκλοφοριακών λωρίδων. Τα πλοία εντός αυτών πλέουν σύμφωνα με την γενική κατεύθυνση της κάθε μίας (Wu et al., 2020). Το πρώτο TSS θεσπίστηκε στο στενό του Ντόβερ το 1967. Αρχικά η χρήση τους ήταν προαιρετική μέχρι το 1971 οπότε και στη συνέλευση του IMO εγκρίθηκε ψήφισμα το οποίο καθιστούσε την τήρηση αυτών των συστημάτων υποχρεωτική. Οι COLREGs έκαναν ακόμα πιο ξεκάθαρη αυτή την υποχρέωση. Η αποτελεσματικότητά τους γίνεται εμφανέστερη εάν λάβει κανείς υπ’όψιν τη μελέτη της Διεθνούς Ένωσης Ινστιτούτων Ναυσιπλοίας IAIN (International Association of Institutes of Navigation) το 1981. Σύμφωνα με αυτήν, το χρονικό διάστημα 1956-1960 στο Ντόβερ καταγράφηκαν 60 συγκρούσεις, ενώ είκοσι χρόνια αργότερα, μετά την εισαγωγή των TSS, ο αριθμός αυτός είχε μειωθεί στις 16. Την ίδια στιγμή σε άλλες περιοχές και απουσία TSS, ο αριθμός των συγκρούσεων αυξήθηκε απότομα.

Νέα συστήματα διαχωρισμού κυκλοφορίας εισάγονται πλέον τακτικά, τη στιγμή που τα ήδη υπάρχοντα τροποποιούνται όταν το καθιστούν αναγκαίο οι μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες. Για την ταχύτερη δυνατή υλοποίηση του στόχου αυτού η MSC έχει εξουσιοδοτηθεί από τον IMO να εγκρίνει και να τροποποιεί τα TSS εξ'ονομάτός του.



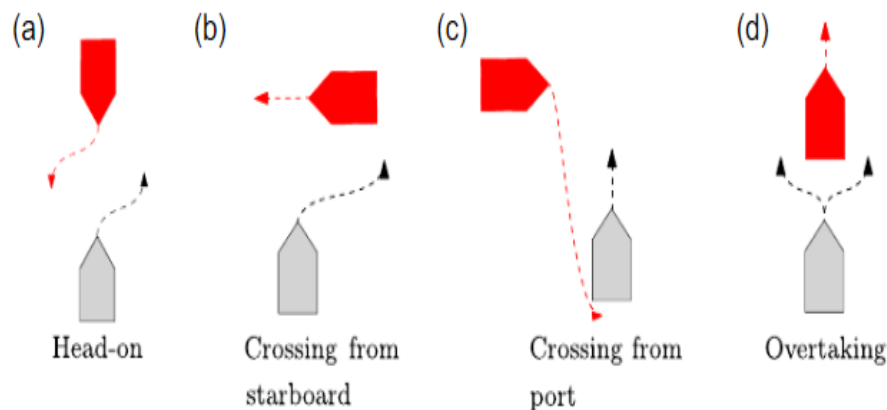
Σχήμα 2.3: Σύστημα Διαχωρισμού της Κυκλοφορίας (Traffic Separation Scheme) στο Στενό της Μεσσήνης στην Ιταλία (Cucinotta et al., 2017)

Ο Κανόνας 10 ορίζει μεταξύ άλλων ότι τα πλοία τα οποία διασχίζουν τις λωρίδες κυκλοφορίας, θα πρέπει να το κάνουν “όσο το δυνατόν περισσότερο υπό ορθή γωνία σε σχέση με τη γενική κατεύθυνση της ροής της κυκλοφορίας” (Σχήμα 2.4). Με αυτόν τον τρόπο οι προθέσεις τους γίνονται πιο ξεκάθαρες, μειώνοντας τη σύγκυση που δημιουργείται στα υπόλοιπα σκάφη και ελαχιστοποιώντας το χρόνο διέλευσής τους από τη λωρίδα.



Σχήμα 2.4: Σωστός και λανθασμένος τρόπος διέλευσης μέσα από μία κυκλοφοριακή λωρίδα σύμφωνα με τους CORLEGS (Serrat, 2012)

Το δεύτερο κομμάτι (Section 2) περιλαμβάνει τους Κανόνες 11 έως 18 και σχετίζεται με τη συμπεριφορά των πλοίων όταν το ένα μπορεί να γίνει οπτικά αντιληπτό από το άλλο, δηλαδή με τις καταστάσεις συναντήσεων (encounter situations). Σε αυτό καθορίζονται οι ελιγμοί που πρέπει να λάβουν χώρα από τα εμπλεκόμενα σκάφη για την αποφυγή της σύγκρουσης σε κάθε ένα από τα τρία είδη συναντήσεως (head-on – μετωπική, crossing – διασταυρούμενη και overtaking – προσπέραση) όπως φαίνεται και στην Σχήμα 2.5. Παραδείγματος χάρη, στον Κανόνα 14 αναφέρεται πως στην περίπτωση επικίνδυνης μετωπικής συνάντησης μηχανοκίνητων σκαφών, κάθε ένα πρέπει να μεταβάλει την πορεία του προς τα δεξιά (starboard) ώστε να περάσει από την αριστερή πλευρά του άλλου (port side). Τέλος το τρίτο κομμάτι (Section 3) το οποίο περιλαμβάνει τον Κανόνα 19 σχετίζεται με τη συμπεριφορά των πλοίων σε συνθήκες περιορισμένης ορατότητας.



Σχήμα 2.5: Απαιτούμενοι ελιγμοί αποφυγής σύγκρουσης σε κάθε περίπτωση συνάντησης κατά CORLEGs (Kufalor et al., 2019)

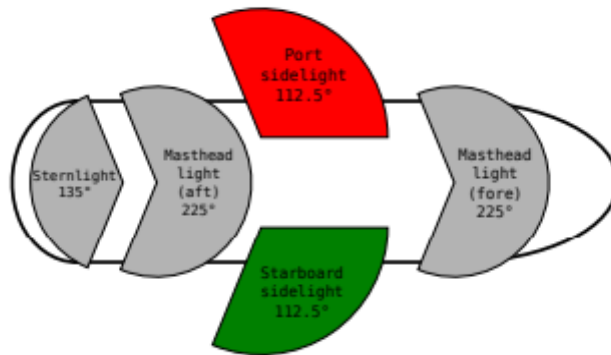
ΜΕΡΟΣ Γ – Φώτα και Σήματα (20-31)

Στον Κανόνα 20 αναφέρεται ότι οι κανονισμοί που αφορούν τα φώτα ναυσιπλοίας ισχύουν από τη δύση μέχρι και την ανατολή του ηλίου. Ο Κανόνας 21 περιέχει ορισμούς ενώ στον 22 περιγράφεται το ελάχιστο επιτρεπόμενο εύρος ορατότητας των φανών ανα τύπο πλοίου. Οι Κανόνες 23-31 περιλαμβάνουν συν τοις άλλοις απαιτήσεις φωτισμού για διάφορους τύπους πλοίων εν πλω όπως λ.χ. αλιευτικά, κωπήλατα και ιστιοπλοϊκά αλλά και για περιπτώσεις ρυμούλκησης ή αγκυροβόλησης. Καλύπτονται επίσης ενδεχόμενα ακυβέρνητων ή περιορισμένης ελικτικότητας σκαφών.

ΜΕΡΟΣ Δ – Ηχητικά και Φωτεινά Σήματα (32-37)

Στους Κανόνες 32 έως 37 αναλύονται τα ηχητικά και φωτεινά σήματα των πλοίων. Αρχικά στον Κανόνα 32 ορίζονται οι έννοιες του σφυρίγματος (whistle), καθώς και του βραχέος και μακρού συριγμού (short and long blast). Ο Κανόνας 33 καθορίζει τον απαραίτητο εξοπλισμό που θα πρέπει να διαθέτει το κάθε σκάφος για την παραγωγή τέτοιου είδους σημάτων, δηλαδή μία σφυρίχτρα (σειρήνα) και μια

καμπάνα - κουδούνι. Τέλος, στους Κανόνες 34-37 σκιαγραφούνται οι διάφορες περιστάσεις στις οποίες κρίνεται αναγκαία η εκπομπή ή/και ανταλλαγή τους (π.χ. επικίνδυνες συναντήσεις). Στον Κανόνα 34 πιο συγκεκριμένα, καταγράφονται τα ηχητικά και φωτεινά σήματα συναρτήσεως του είδους του ελιγμού που αυτά αντιπροσωπεύουν. Στον Κανόνα 34^α για παράδειγμα, αναφέρεται ότι στην περίπτωση κατά την οποία το ένα πλοίο μπορεί να γίνει ορατό από το άλλο, το σκάφος το οποίο υποχρεούται σύμφωνα με το Μέρος Β των κανονισμών να διαφοροποιήσει την πορεία του, θα πρέπει να υποδηλώσει τον ελιγμό που πρόκειται να πραγματοποιήσει μέσω των εξής ηχητικών σημάτων: (α) ένας βραχύς συριγμός για ελιγμό προς τα δεξιά (β) δύο βραχείς συριγμοί για ελιγμό προς τα αριστερά και (γ) τρεις βραχείς συριγμοί για χειρισμό αναποδίσεως (astern propulsion).



Σχήμα 2.6 : Απαιτούμενη διάταξη για τα φώτα ναυσιπλοίας πλοίων μήκους μεγαλύτερου των 50 μέτρων όπως καθορίζεται στο Γ' Μέρος των COLREGs (Zaccone et al., 2019)

ΜΕΡΟΣ Ε – Εξαιρέσεις (38)

Σύμφωνα με τον 38^ο και τελευταίο Κανόνα, τα πλοία που προπήρχαν των COLREGs ή βρισκότουσαν υπο κατασκευή το 1972 (έτος υιοθέτησής των κανονισμών) αλλά παρ'όλα αυτά συμμορφωνόντουσαν με τους κανονισμούς σύγκρουσης της σύμβασης SOLAS το 1960, μπορούν να εξαιρεθούν για συγκεκριμένες περιόδους από ορισμένες απαιτήσεις οι οποίες έχουν να κάνουν με τα ηχητικά και φωτεινά σήματα

ΜΕΡΟΣ ΣΤ – Επαλήθευση της Συμμόρφωσης με τις Διατάξεις της Σύμβασης (39-41)

Το μέρος ΣΤ το οποίο προστέθηκε στη σύμβαση το 2013, εμπεριέχει κανόνες σχετικούς με τις υποχρεώσεις και τη συμμόρφωση του κάθε κράτους – μέλους με τους κανονισμούς αλλά και τους τακτικούς ελέγχους που πραγματοποιούνται από τον IMO.

Πλην των 41 κανόνων, οι COLREGs αποτελούνται επίσης και από 4 παραρτήματα (Annexes) που περιέχουν τεχνικές απαιτήσεις σχετικές με τα φώτα

ναυσιπλοΐας, τα σχήματα και τη θέση τους (Annex I), τα πρόσθετα σήματα μεταξύ αλιευτικών που επιχειρούν σε κοντινή απόσταση (Annex II), τις συσκευές ηχητικής σηματοδότησης (Annex III), καθώς και τα διεθνή σήματα κινδύνου (Annex IV).

Παρότι οι COLREGs υποδεικνύουν στους πλοηγούς τη σωστή στρατηγική για την αποφυγή συγκρούσεων, η υποκειμενικότητα δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί πλήρως καθώς η εφαρμογή τους βασίζεται στην “αξιολόγηση της κατάστασης, την απόφαση εφαρμογής ενός αντίστοιχου κανόνα και τη λήψη δράσης”. Απαιτείται επομένως από τον πλοηγό να έχει άριστη γνώση τους αλλά και να είναι σε θέση να πραγματοποιεί ενέργειες υπό το πρίσμα του αντίστοιχου κανόνα (Demirel and Bayer, 2015). Ακόμα λοιπόν και αν οι κανονισμοί αυτοί είναι πλήρως ορισμένοι, η ανθρώπινη ερμηνεία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο από τη στιγμή που οι ελιγμοί των πλοίων λαμβάνουν χώρα σε πραγματικό χρόνο και κάποιες φορές υπό την παρουσία δυσμενών εξωτερικών παραγόντων (Statheros et al., 2008). Πράγματι το 56% των περιπτώσεων σύγκρουσης περιλαμβάνει παραβίαση των COLREGS (Naeem et al., 2012a; Liu et al., 2016).

3. ΤΟ ΡΙΣΚΟ ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

3.1 Γενικά για το Ρίσκο

Η έννοια του ρίσκου διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο σε κάθε συζήτηση σχετική με την ασφάλεια. Ο όρος ασφάλεια χρησιμοποιείται συνήθως για την περιγραφή του βαθμού ελευθερίας από τον κίνδυνο σχετικά με ένα σύστημα ή μία δραστηριότητα, ενώ αυτός του ρίσκου για την αξιολόγησή της. Δεν περιστρέφεται όμως μόνο γύρω από αυτήν, αλλά μπορεί να προσεγγιστεί διαφορετικά ανάλογα με την περίπτωση. Το ρίσκο ανέκαθεν αποτελούσε και αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας, καθώς εμπεριέχεται σχεδόν σε όλες τις αποφάσεις τις οποίες οι άνθρωποι λαμβάνουν. Ετυμολογικά προέρχεται από την ελληνική λέξη ριζικόν η οποία εμφανίστηκε το 1160 και αναφέρεται στην πλεύση υπο δυσμενείς συνθήκες, όπως π.χ. παλίρροιας ή δυνατούς ανέμους, και γενικότερα στους κινδύνους της ναυσιπλοΐας.

3.2 Διαφορετικοί Ορισμοί του Ρίσκου

Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποιος κοινώς αποδεκτός ορισμός του ρίσκου, αλλά συναντώνται πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις του. Ο Aven (2012) στην ιστορική ανάλυση που διεξήγαγε, επιχείρησε να ταξινομήσει τους υπάρχοντες ορισμούς σε εννιά κατηγορίες ως εξής:

- **1) Ρίσκο = Αναμενόμενη τιμή (απώλεια) (Expected Value) (R = EV):** Ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή της πιθανότητας εμφάνισης ενός γεγονότος και της χρησιμότητας (utility) των συνεπειών
- **2) Ρίσκο = Πιθανότητα ενός (ανεπιθύμητου) γεγονότος (Probability of an undesirable event) (R = P):** Ορίζεται ως η πιθανότητα εμφάνισης ενός ανεπιθύμητου γεγονότος ή ως η πιθανότητα μιας ζημιάς/απώλειας
- **3) Ρίσκο = Αντικειμενική αβεβαιότητα (Objective Uncertainty) (R = OU):** Ορίζεται ως η αντικειμενική αβεβαιότητα, δηλαδή η αβεβαιότητα όταν η κατανομή πιθανότητας ενός συνόλου περιπτώσεων είναι γνωστή εκ των προτέρων (μέσω υπολογισμών ή ανάλυσης στατιστικών στοιχείων)
- **4) Ρίσκο = Αβεβαιότητα (Uncertainty) (R = U):** Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται ορισμοί στους οποίους το ρίσκο ισούται με την αβεβαιότητα, εννοούμενη ως μία στατιστική μεταβολή συγκρινόμενη με μία μέση τιμή
- **5) Ρίσκο = Ενδεχόμενο/πιθανότητα μιας απώλειας (Potential/Possibility of a loss) (R = PO):** Ορίζεται ως η πιθανότητα εμφάνισης αρνητικών ή ανεπιθύμητων συνεπειών
- **6) Ρίσκο = Πιθανότητα και σενάρια / συνέπειες / σοβαρότητα των συνεπειών (Probability & Consequences) (R = P&C):** Ορίζεται ως ο συνδυασμός της πιθανότητας εμφάνισης ενός γεγονότος και των συνεπειών, χωρίς όμως το συνδυασμό τους σε μία μονάδα όπως συμβαίνει στην 1^η κατηγορία.

- **7) Ρίσκο = Συμβάν ή συνέπεια (Event or Consequence) (R=C):** Οι εκπρόσωποι της κατηγορίας αυτοί αντιλαμβάνονται το ρίσκο ως αντικειμενικές καταστάσεις του κόσμου, οι οποίες θεωρούνται ανεξάρτητες από τον αξιολογητή
- **8) Ρίσκο = Συνέπειες/ζημιά/σοβαρότητα αυτών + αβεβαιότητα (Consequences/damage/severity of these & Uncertainty) (R = C&U):** Ορίζεται ως ο συνδυασμός γεγονότων/συνεπειών και των αβεβαιοτήτων που τις συνοδεύουν, με την αβεβαιότητα να γίνεται αντιληπτή ως η αβεβαιότητα ενός αξιολογητή σχετικά με την εμφάνιση των γεγονότων/συνεπειών
- **9) Ρίσκο = Επίδραση της αβεβαιότητας στους στόχους (R = ISO):** Ορίζεται ως η επίδραση της αβεβαιότητας σε κάποιους δεδομένους στόχους

Ο συγγραφέας υπογραμμίζει ότι αυτή η πληθώρα ορισμών δημιουργεί μία χαοτική κατάσταση η οποία δε διευκολύνει την κατανόηση του ρίσκου, εμποδίζοντας παράλληλα τη σωστή διαχείρισή του. Κάποιοι από αυτούς βασίζονται σε πιθανότητες, άλλοι σε αναμενόμενες τιμές και άλλοι στην αβεβαιότητα. Ορισμένοι μελετητές θεωρούν το ρίσκο υποκειμενικό και εξαρτώμενο από το γνωστικό υπόβαθρο, ενώ άλλοι το αντιλαμβάνονται ως κάτι αντικειμενικό και ανεξάρτητο από τον εκάστοτε αναλυτή. Τέλος, επισημαίνει ότι πολλές προσεγγίσεις του ρίσκου χαρακτηρίζονται από ελλιπή επιστημονική βάση.

Σύμφωνα με τον κλασσικό ορισμό του ρίσκου που έχει επικρατήσει στο χώρο της ναυτιλίας και μεταξύ των μηχανικών, ενώ παράλληλα αναγράφεται στις οδηγίες της Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (Formal Safety Assessment) (MSC Circ. 1023) του IMO, ως ρίσκο ορίζεται “ο συνδυασμός της πιθανότητας (P) εμφάνισης ενός ανεπιθύμητου γεγονότος (π.χ. σύγκρουσης) και της σοβαρότητας των συνεπειών (C) που μπορεί αυτό να επιφέρει”.

$$R = P \times C$$

3.3 Formal Safety Assessment

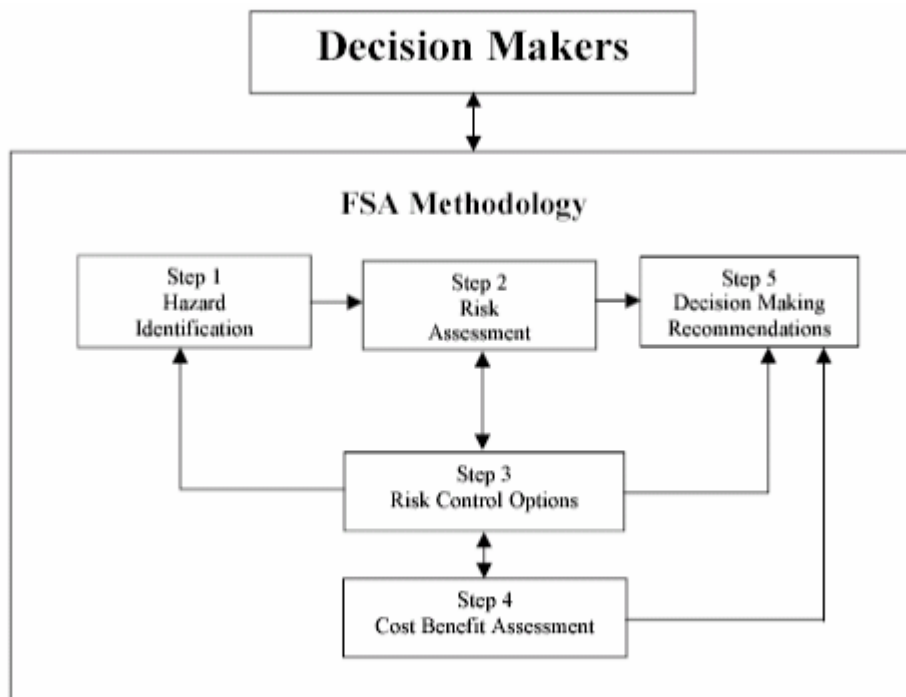
3.3.1 Ιστορική Αναδρομή

Στις 6 Ιουλίου του 1988, 167 άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους μετά από έκρηξη που προκλήθηκε στην πλατφόρμα πετρελαίου και φυσικού αερίου Piper Alpha, βορειοανατολικά του Αμπερντίν στη Βόρεια Θάλασσα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με άλλα ατυχήματα που συνέβησαν την ίδια χρονική περίοδο (π.χ. Exxon Valdez 1989) αποτέλεσε την αφορμή για επαναξιολόγηση της έως τότε προσέγγισης των ναυτικών ατυχημάτων. Το υπάρχον καθεστώς ασφαλείας θεωρήθηκε δυσμενές σε σύγκριση με άλλους επιστημονικούς κλάδους στους οποίους υιοθετούνταν περισσότερο επιστημονικές μέθοδοι όπως αναλύσεις κινδύνου και κόστους – ωφέλειας. Ειδικότερα στο Ηνωμένο Βασίλειο, έλαβε χώρα ένα πλήθος διεργασιών που αποσκοπούσαν στην καθιέρωση μιας πιο ορθολογικής προσέγγισης όσον αφορά την ανάπτυξη των κανονισμών. Το 1993 ο βρετανικός Οργανισμός Ναυτικής Ασφάλειας (Marine Safety Agency) πρότεινε στον IMO μία διαδικασία πέντε

βημάτων για την αξιολόγηση της ασφάλειας, με την ονομασία Τυπική Αποτίμηση Ασφαλείας (Formal Safety Assessment/FSA). Ο κύριος στόχος της συγκεκριμένης μεθοδολογίας ήταν η παροχή μίας πιο συστηματικής και προληπτικής βάσης κατά τη δημιουργία νέων κανονισμών. Ο IMO στην 68^η συνεδρίασή του το 1997, ενέκρινε “μεταβατικές οδηγίες για την εφαρμογή της FSA στη θέσπιση νέων κανόνων”. Στις 5 Απριλίου του 2002 εγκρίθηκε τελικά ο επίσημος προς χρήση οδηγός FSA συμπεριλαμβανομένων των παραρτημάτων ο οποίος πλέον απολαμβάνει της ευρείας αποδοχής μεταξύ των κρατών μελών (IMO, 2002). Από τότε μέχρι και σήμερα, οι οδηγίες αυτές έχουν τροποποιηθεί αρκετές φορές.

3.3.2 Η Προσέγγιση της FSA

Ο IMO (2018) χαρακτηρίζει την FSA ως μία δομημένη και συστηματική μεθοδολογία που σκοπό έχει την ενίσχυση της ναυτικής ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένης της προστασίας της ανθρώπινης ζωής, της υγείας, του θαλάσσιου περιβάλλοντος και της περιουσίας, μέσω της χρήσης αναλύσεων ρίσκου και κόστους – ωφέλειας. Μπορεί επιπροσθέτως να αποδειχθεί χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση νέων κανονισμών ή για τη σύγκριση των υπαρχόντων με πιθανές βελτιωμένες εκδόσεις τους, αποσκοπώντας στην επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των διάφορων τεχνικών και επιχειρησιακών θεμάτων μέσω της συμπερίληψης του ανθρώπινου στοιχείου. Οι Psaraftis (2012) χρησιμοποίησε την FSA για την πρόταση νέων κανόνων, ενώ στη μελέτη των Guida et al. (2016) χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) του βέλτιστου επίπεδου ασφαλείας της γάστρας ενός δεξαμενόπλοιου Suezmax.

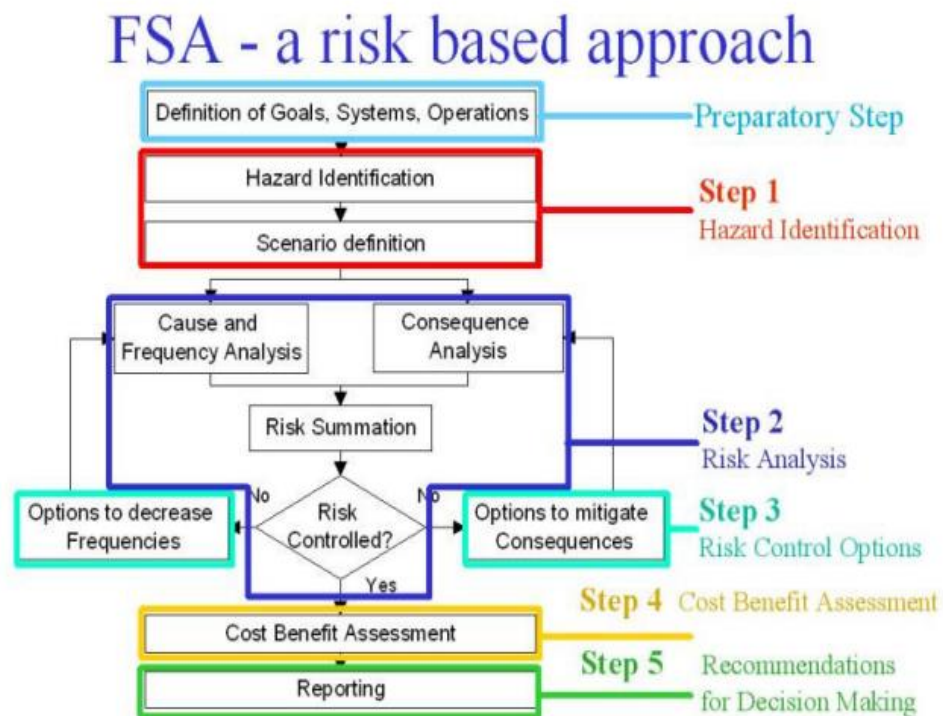


Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (FSA) (IMO, 2013)

Μία Τυπική Αποτίμηση Ασφαλείας περιλαμβάνει τα εξής πέντε βήματα (βλ. Σχήμα 3.1.):

- 1) Αναγνώριση των κινδύνων (Hazard Identification/HAZID)
- 2) Ανάλυση ρίσκου (Risk Assessment)
- 3) Επιλογές ελέγχου ρίσκου (Risk Control Options)
- 4) Ανάλυση κόστους – ωφέλειας (Cost Benefit Assessment)
- 5) Προτάσεις για τη λήψη αποφάσεων (Decision Making Recommendations)

Η FSA είναι μία αρκετά σύνθετη μεθοδολογία καθώς εμπεριέχει τη χρήση μίας μεγάλης γκάμας τεχνικών, συνεπώς υφίσταται πάντα ο κίνδυνος εσφαλμένης εφαρμογής της και παραγωγής αποτελεσμάτων τα οποία δε θα αντικατοπτρίζουν τα χαρακτηριστικά του αναλυόμενου συστήματος. Προσφέρει όμως διέξοδο από τα διλήματα του παρελθόντος κατά το οποίο πολύ συχνά αναβάλλονταν ενέργειες έως ότου συμβεί κάτι κακό, με αποτέλεσμα να λαμβάνεται δράση κυρίως λόγω της κοινής γνώμης ή πολιτικών σκοπιμοτήτων (Montewka et al., 2014).



Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (FSA) (IACS – MSC 75, 2002)

3.3.2.1 Αναγνώριση Κινδύνων (Βήμα 1^ο)

Στόχος του πρώτου βήματος της FSA είναι ο εντοπισμός και η ιεράρχηση, ανάλογα με το επίπεδο του ρίσκου που εμπεριέχουν, των κινδύνων και των σχετικών σεναρίων ατυχημάτων ως προς ένα εξεταζόμενο σύστημα. Εφαρμόζονται τόσο ποιοτικές όσο και αναλυτικές τεχνικές. Οι ποιοτικές τεχνικές διασφαλίζουν τον

προληπτικό χαρακτήρα της διαδικασίας και βασίζονται στις γνώσεις ειδικών και εμπειρογνομών, ενώ οι αναλυτικές λαμβάνουν υπ'όψιν την εμπειρία του παρελθόντος και χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων η παρ'ολίγον ατυχημάτων.

Η αναγνώριση όλων των κινδύνων αποτελεί ζήτημα ζωτικής σημασίας, καθώς η παράλειψη έστω και ενός εξ αυτών μπορεί να θέσει σε κίνδυνο ολόκληρη τη διαδικασία αλλά και την αποτελεσματικότητα των μέτρων περιορισμού του ρίσκου που πρόκειται να ληφθούν. Ορισμένες από τις βασικότερες τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο 1^ο αυτό βήμα, αποτελούν οι εξής:

- Hazard Review
- Hazard Checklists
- Hazard Operability (HAZOP)
- Failure modes, effects and criticality analysis (FMECA)
- Structured what-if checklist (SWIFT)

Τελικά, από τη διαδικασία της αναγνώρισης κινδύνων προκύπτουν ως εισροές για το 2^ο βήμα:

- 1) Μία λίστα των κινδύνων και των σχετικών με αυτούς σεναρίων
- 2) Μία αξιολόγηση των σεναρίων ατυχήματος (ιεραρχημένων με βάση το επίπεδο κινδύνου τους)

3.3.3.2 Ανάλυση Ρίσκου (Βήμα 2^ο)

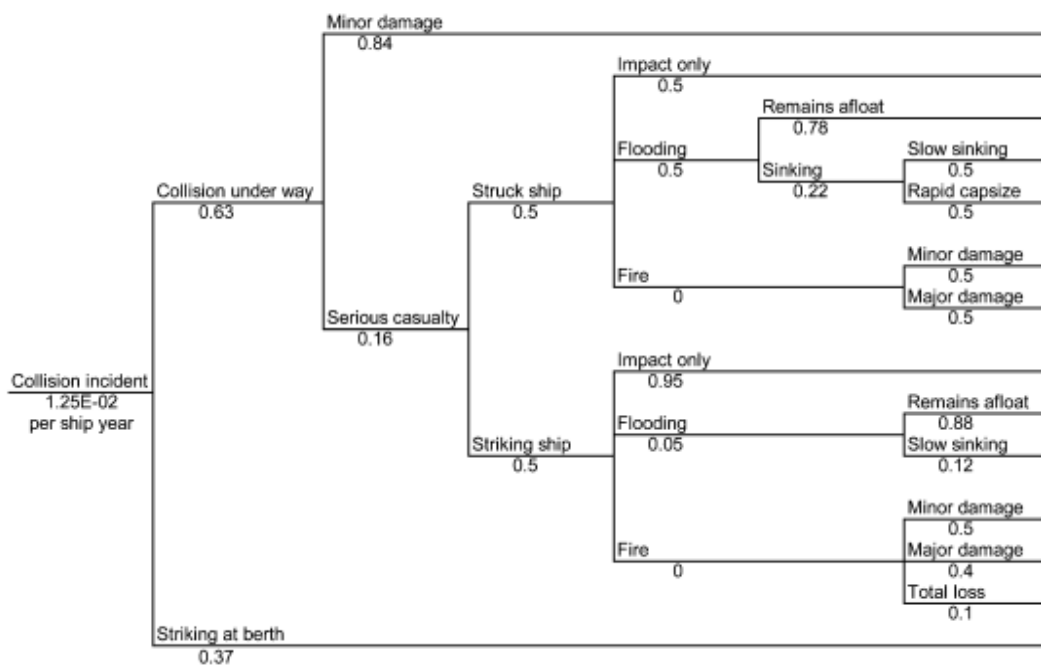
Το δεύτερο βήμα, αυτό της ανάλυσης ρίσκου, αποσκοπεί στη λεπτομερή διερεύνηση των αιτιών, των αρχικών γεγονότων και των συνεπειών των πιο σημαντικών σεναρίων, όπως αυτά προέκυψαν από το στάδιο της αναγνώρισης κινδύνων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής κατάλληλων τεχνικών μοντελοποίησης ρίσκου. Έτσι, καθίσταται δυνατή η εστίαση της προσοχής στις περιοχές υψηλού κινδύνου, αλλά και ο εντοπισμός καθώς η αξιολόγηση των κυριότερων παραγόντων που επηρεάζουν το ρίσκο. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά κάποιες από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται και αναγράφονται στις επίσημες οδηγίες του IMO:

Ανάλυση ιστορικών δεδομένων: Αποτελεί μία απλή και κατανοητή μέθοδο για την αντιστοίχιση συχνότητας σε κάποιο γεγονός κατά την οποία συλλέγονται στοιχεία ατυχημάτων από κατάλληλες βάσεις δεδομένων οι οποίες σχετίζονται με το εξεταζόμενο γεγονός. Παρ'όλα αυτά κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση της καταλληλότητας των δεδομένων αυτών (ακρίβεια καταγραφής, μέγεθος δείγματος, περιοχή που μελετάται κ.α.). Βασικό πλεονέκτημά της αποτελεί το γεγονός ότι μειώνει την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης κρίσης αντλώντας πληροφορίες από πραγματικά γεγονότα. Από την άλλη πλευρά αξιοποιεί μόνο την εμπειρία του παρελθόντος “αγνοώντας” τυχόν τεχνολογικές εξελίξεις και καινοτομίες, τη στιγμή

που στα μοντέλα ρίσκου επιδιώκεται η υιοθέτηση ενός περισσότερο προληπτικού χαρακτήρα.

Δένδρα Σφαλμάτων (Fault Trees): Τα Δέντρα Σφαλμάτων αποτελούν μία από τις πιο συνήθεις εφαρμοζόμενες τεχνικές κατά την ανάλυση ρίσκου. Πρόκειται για λογικά διαγράμματα τα οποία καταδεικνύουν τις αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ συμβάντων που μπορούν μόνο τους ή σε συνδυασμό να οδηγήσουν στην πραγματοποίηση του γεγονότος στο υψηλότερο επίπεδο του Δένδρου. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι κάποιο ατύχημα ή ένα ανεπιθύμητο επικίνδυνο αποτέλεσμα του οποίου και η πιθανότητα υπολογίζεται. Στα Δένδρα Σφαλμάτων λαμβάνονται υπ’όψιν συνήθεις αιτίες αστοχιών ενός συστήματος καθώς και αιτίες οφειλόμενες στον ανθρώπινο παράγοντα. Αξιοποιούνται τόσο ιστορικά στοιχεία όσο και η ανθρώπινη κρίση και εμπειρία με σκοπό την πλήρη κατανόηση του πιθανού ατυχήματος.

Δένδρα Γεγονότων (Event Trees): Τα Δένδρα Γεγονότων είναι λογικά διαγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των επιπτώσεων ενός ατυχήματος, μιας αστοχίας ή γενικότερα ενός ανεπιθύμητου γεγονότος. Αναπαριστούν την αλληλουχία των συμβάντων που σχετίζονται με την επιτυχή ή ανεπιτυχή λειτουργία των μέτρων και των συστημάτων ασφαλείας, έπειτα από την εμφάνιση του ανεπιθύμητου γεγονότος. Το αρχικό γεγονός βρίσκεται στο αριστερό μέρος της δενδροειδούς αυτής δομής, ενώ κάθε ενδιάμεσο συμβάν λειτουργεί με δυαδικό τρόπο (επιτυχία/αποτυχία) και δημιουργεί μία ξεχωριστή διαδρομή η οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικές συνέπειες κάθε φορά. Ένα τυπικό Event Tree παρουσιάζεται στην Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Τυπικό Event Tree συνεπειών σύγκρουσης (Konovessis and Vassalos, 2008)

Ανάλυση Αξιοπιστίας Ανθρώπινου Παράγοντα (Human Reliability Analysis/HRA): Αποτελεί μία μέθοδο μοντελοποίησης της επιρροής του ανθρώπινου παράγοντα στα ατυχήματα που αποσκοπεί στη δημιουργία και παροχή εισροών σε κάποιο Fault ή Event Tree.

Ανάλυση Αστοχιών Κοινού Αιτίου (Common Cause Failure Analysis/CCFA): Συστηματική προσέγγιση που εξετάζει ακολουθίες γεγονότων οι οποίες προκύπτουν λόγω πολλαπλών αστοχιών, οφείλονται όμως σε ένα κοινό αίτιο. Απαιτεί επι τόπου επιθεώρηση από κάποιον ειδικό βασιζόμενη στην ικανότητά του να εντοπίσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των αστοχιών. Συνεπώς η ποιότητα της συγκεκριμένης διαδικασίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του εκάστοτε αναλυτή. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά ως συμπληρωματική μέθοδος, συνήθως σε συνδυασμό με κάποιο Fault Tree ή Event Tree.

Δίκτυα Bayes (Bayesian Belief Networks/BBN): Τα δίκτυα Bayes ή αλλιώς Δίκτυα Πίστης είναι πιθανολογικά προσανατολισμένα άκυκλα γραφήματα (ένα είδος στατιστικών μοντέλων), τα οποία αναπαριστούν τις σχέσεις αιτιώδους συνάφειας μεταξύ ενός συνόλου τυχαίων μεταβλητών καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν κόμβο του γραφήματος. Χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της πιθανότητας μίας άγνωστης μεταβλητής ενώ είναι δυνατή η συνεχής επικαιροποίηση των πιθανοτήτων των γνωστών μεταβλητών. Η μέθοδος αυτή είναι άμεσα συνυφασμένη με τον τύπο του Bayes και την έννοια της δεσμευμένης πιθανότητας.

Η τελική εκτίμηση και αξιολόγηση του ρίσκου πραγματοποιείται συχνά μέσω της χρήσης μητρών αξιολόγησης κινδύνου (risk matrixes), οι οποίες μπορεί να είναι είτε ποσοτικές είτε ποιοτικές. Οι μήτρες αυτές, στις οποίες έχουν οριστεί με ξεκάθαρο τρόπο οι κατηγορίες συχνότητας και συνεπειών, ποικίλουν σε μορφή και διαστάσεις. Ο δείκτης ρίσκου προκύπτει συνδυάζοντας τους δείκτες συχνότητας και συνεπειών (Hermanski and Daley, 2005). Το επίπεδο του ρίσκου είναι υψηλότερο στην πάνω δεξιά κόκκινη περιοχή και χαμηλότερο στην κάτω αριστερά πράσινη περιοχή (βλ. Σχήμα 3.6). Πιο συγκεκριμένα:

- Το πράσινο χρώμα αναφέρεται σε μία περιοχή στην οποία το ρίσκο μπορεί να χαρακτηριστεί ως αποδεκτό και είναι “χαμηλό”. Όλα τα επιπλέον μέτρα που χρειάζεται να ληφθούν, αποσκοπούν στο να διατηρήσουν το ρίσκο σε αυτό το επίπεδο
- Το κίτρινο χρώμα αναπαριστά μία περιοχή αποδεκτού ρίσκου μέτριου επιπέδου. Χρειάζεται να παρθούν μέτρα προκειμένου να αποφευχθούν καταστάσεις υψηλού ρίσκου
- Το κόκκινο χρώμα χαρακτηρίζει μία περιοχή μη αποδεκτού ρίσκου, όπου καθίσταται υποχρεωτική η λήψη μέτρων για τον περιορισμό του σε αποδεκτά επίπεδα.

Severity index				
SI	SEVERITY	EFFECTS ON HUMAN SAFETY	EFFECTS ON SHIP	S (Equivalent fatalities)
1	Minor	Single or minor injuries	Local equipment damage	0.01
2	Significant	Multiple or severe injuries	Non-severe ship damage	0.1
3	Severe	Single fatality or multiple severe injuries	Severe damage	1
4	Catastrophic	Multiple fatalities	Total loss	10

Σχήμα 3.4: Δείκτες ποσοτικών συνεπειών (IMO,2018)

Frequency index			
FI	FREQUENCY	DEFINITION	F (per ship year)
7	Frequent	Likely to occur once per month on one ship	10
5	Reasonably probable	Likely to occur once per year in a fleet of 10 ships, i.e. likely to occur a few times during the ship's life	0.1
3	Remote	Likely to occur once per year in a fleet of 1,000 ships, i.e. likely to occur in the total life of several similar ships	10 ⁻³
1	Extremely remote	Likely to occur once in the lifetime (20 years) of a world fleet of 5,000 ships	10 ⁻⁵

Σχήμα 3.5: Δείκτες ποσοτικών συχνοτήτων (IMO, 2018)

Frequency	Severity			
	Minor	Significant	Severe	Catastrophic
Frequent	8	9	10	11
	7	8	9	10
Reasonably probable	6	7	8	9
	5	6	7	8
Remote	4	5	6	7
	3	4	5	6
Extremely remote	2	3	4	5

Σχήμα 3.6: Ενδεικτική μήτρα αξιολόγησης κινδύνων και δείκτες ρίσκου (IMO, 2018)

3.3.3.3 Επιλογές Ελέγχου του Ρίσκου (Βήμα 3^ο)

Στο τρίτο βήμα, και σύμφωνα με τις οδηγίες της Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας του IMO, προσδιορίζονται αρχικά τα Μέτρα Ελέγχου Ρίσκου (Risk Control Measures/RCMs) και έπειτα ομαδοποιούνται/συνδυάζονται σε έναν περιορισμένο αριθμό Επιλογών Ελέγχου Ρίσκου (Risk Control Options/ROCs), μέσω της εφαρμογής των παρακάτω βημάτων:

- 1 Εστίαση στις περιοχές ρίσκου στις οποίες απαιτείται έλεγχος
- 2)Αναγνώριση πιθανών Μέτρων Ελέγχου Ρίσκου (RCMs)
- 3)Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των RCMs στη μείωση του ρίσκου επανεξετάζοντας το στάδιο της ανάλυσης ρίσκου (2^ο βήμα της FSA)

- 4)Ομαδοποίηση των Μέτρων Ελέγχου Ρίσκου σε πρακτικές επιλογές κανονισμών

Για τον καθορισμό και το σχηματισμό μίας καλύτερης οπτικής όσον αφορά τις διαθέσιμες επιλογές, χρήσιμο εργαλείο αποτελεί η τεχνική της αιτιακής αλυσίδας μέσω της οποίας ένας κίνδυνος διασπάται σε επιμέρους βήματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε κάποιο ατύχημα. Κύρια φιλοσοφία της διαδικασίας αποτελεί η εφαρμογή μέτρων μέσω των οποίων καθίσταται δυνατό το σπάσιμο αυτής της αλυσίδας και η αποτροπή της ολοκλήρωσής της. Μια τέτοια αλυσίδα απεικονίζεται και στην Σχήμα 3.7 όπως παρουσιάζεται από τον IMO.

causal factors → failure → circumstance → accident → consequences

Σχήμα 3.7: Αιτιακή αλυσίδα (IMO, 2018)

Τα RCMs θα πρέπει να αποσκοπούν σε ένα από τα παρακάτω (IMO,2018):

- 1)Μείωση της συχνότητας των αστοχιών μέσω καλύτερου σχεδιασμού, διαδικασιών, οργανωτικών πολιτικών, εκπαίδευσης κ.α.
- 2)Μετριασμό των επιπτώσεων των αστοχιών προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά ατυχήματα
- 3)Άμβλυνση των συνθηκών κάτω από τις οποίες είναι πιθανό να προκύψει μια αστοχία και
- 4)Μετριασμό των συνεπειών ενός ατυχήματος

Τα RCMs συνδυάζονται, βάσει κρίσεων εμπειρογνομόνων, σε πιθανές Επιλογές Ελέγχου Ρίσκου (ROCs). Η ομαδοποίησή τους πραγματοποιείται συνήθως με δύο τρόπους, προσανατολισμένη στον έλεγχο της πιθανότητας εκκίνησης των ατυχημάτων ή/και στον έλεγχο της κλιμάκωσής τους (Kontovas and Psaraftis, 2009).

3.3.3.4 Ανάλυση Κόστους – Οφέλους (βήμα 4^ο)

Στο τέταρτο βήμα της Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας προσδιορίζονται και συγκρίνονται τα κόστη και το οφέλη κάθε Επιλογής Ελέγχου Ρίσκου (RCO), όπως αυτές ορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Η έννοια του κόστους μπορεί να μεταφραστεί σε αρχικό κόστος, λειτουργικό κόστος, κόστος εκπαίδευσης, επιθεώρησης, πιστοποίησης κ.α. Στον αντίποδα, αυτή του οφέλους αναφέρεται στην αποτροπή απώλειας ανθρώπινων ζωών, τραυματισμών, περιβαλλοντικής μόλυνσης και δομικών ζημιών. Ο IMO έχει προτείνει δύο δείκτες για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του κόστους σε σχέση με την ασφάλεια της ζωής, το Ακαθόριστο Κόστος Αποτροπής μιας Απώλειας (Gross Cost of Averting a Fatality/GCAF) και το Καθαρό Κόστος Αποτροπής μιας Απώλειας (Net Cost of Averting a Fatality/NCAF) τα οποία ορίζονται ως εξής:

$$\text{GCAF} = \frac{\Delta C}{\Delta R}$$

$$\blacksquare \text{ NCAF} = \frac{\Delta C - \Delta B}{\Delta R}$$

όπου:

- ΔC : το κόστος του εξεταζόμενου RCO ανα πλοίο
- ΔB : το οικονομικό όφελος που προκύπτει από την εφαρμογή του RCO (το οποίο μπορεί επίσης να περιλαμβάνει την αποτροπή της ρύπανσης που απετράπη)
- ΔR : η μείωση του ρίσκου ανα πλοίο σε όρους ανθρώπινων απωλειών που αποφεύχθηκαν

Ο δείκτης GCAF χρησιμοποιείται συνήθως επειδή δε λαμβάνει υπ' όψιν τα πιθανά οικονομικά οφέλη από την εφαρμογή ενός RCO. Η χρησιμοποίηση του NCAF από την άλλη εμπεριέχει τον κίνδυνο υπερεκτίμησης ενός RCO λόγω διευρυσμένων οικονομικών ωφελειών. Σε κάθε περίπτωση πάντως, βασική φιλοσοφία αυτού του βήματος αποτελεί όπως, αναφέρθηκε και παραπάνω, η βέλτιστη συσχέτιση μεταξύ δαπανών και οφελών.

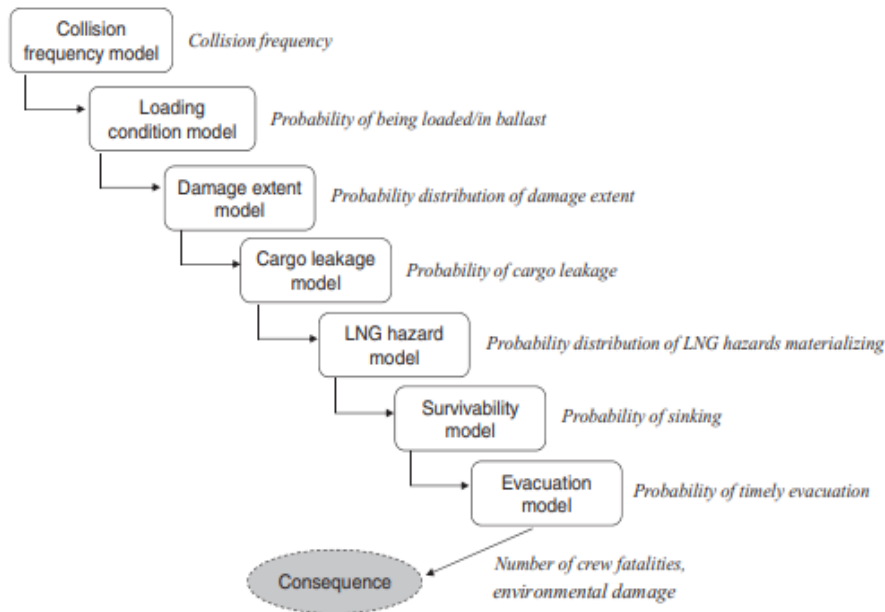
3.3.3.5 Προτάσεις για τη Λήψη Αποφάσεων (βήμα 5^ο)

Στο πέμπτο και τελευταίο βήμα καθορίζονται οι συστάσεις/προτάσεις που υποβάλλονται στους αρμόδιους φορείς λήψης των αποφάσεων για τη βελτίωση του επιπέδου ασφαλείας. Αυτές θα πρέπει να βασίζονται στη σύγκριση και ιεράρχηση όλων των κινδύνων καθώς και των αιτιών τους, στη σύγκριση και κατάταξη των RCO συναρτήσει του σχετικού κόστους και οφέλους, αλλά και την ταυτοποίηση εκείνων των RCO οι οποίοι διατηρούν το επίπεδο του ρίσκου εντός της περιοχής ALARP (As Low As Reasonably Practicable).

Συν τοις άλλοις θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι οι συγκεκριμένες προτάσεις θα είναι δίκαιες όσον αφορά όλους τους ενδιαφερόμενους που εμπλέκονται στη διαχείριση ασφαλείας του εκάστοτε συστήματος (π.χ. πλοίου). Αναγκαία κρίνεται επιπροσθέτως η συμπερίληψη πιθανών βελτιώσεων της μεθοδολογίας της FSA αλλά και συμβουλών για περαιτέρω εργασίες πάνω στο εξεταζόμενο ζήτημα.

3.4 Μοντέλα Σύγκρουσης

Η ανάλυση ρίσκου των ναυτικών συγκρούσεων επικεντρώνεται σε τρεις άξονες : (1) τον καθορισμό της πιθανότητας ατυχήματος, (2) την εκτίμηση των πιθανών συνεπειών και (3) την ανάλυση των ανθρώπινων και οργανωτικών παραγόντων. Μεταξύ αυτών η πιθανότητα αποτελεί τον πιο συνήθη δείκτη για τον αντικατοπτρισμό του κινδύνου σύγκρουσης. Στη βιβλιογραφία συναντάται ένα μεγάλο πλήθος προσεγγίσεων οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, τα μοντέλα προσέγγισης της σύγκρουσης κατά σύνθεση (γεωμετρικά μοντέλα) και τα στατιστικά μοντέλα (Chen et al, 2019). Φυσικά η διάκριση αυτή δεν είναι απόλυτη αλλά έγκειται στη διακριτική ευχέρεια κάθε συγγραφέα.



Σχήμα 3.8: Μοντέλο ρίσκου για σενάριο σύγκρουσης LNG (Li et al., 2012)

3.4.1 Γεωμετρικά Μοντέλα

Ως γεωμετρικά μοντέλα χαρακτηρίζονται εκείνα τα οποία λαμβάνουν υπ' όψιν τους τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλοίων και βασίζονται στις δημοφιλείς ανάμεσα στους ερευνητές μελέτες των Fujii and Shiobara (1971) και Macduff (1974), σύμφωνα με τους οποίους το αναμενόμενο πλήθος συγκρούσεων κατά την εκάστοτε μελετώμενη χρονική περίοδο, προκύπτει ως εξής:

$$N_{COLL} = N_A \times P_C$$

όπου:

- Ως N_A ορίζεται ο αριθμός των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης ή αλλιώς γεωμετρική πιθανότητα σύγκρουσης, μέγεθος που περιγράφει τον αριθμό των συγκρούσεων που θα συνέβαιναν εάν δε λάμβανε χώρα κανένας ελιγμός αποφυγής.
- Το P_C συμβολίζει τον παράγοντα αιτιώδους συνάφειας (causation factor), δηλαδή την πιθανότητα ένα υποψήφιο ζευγάρι να καταλήξει τελικά σε σύγκρουση, ακόμα και εάν διενεργηθούν οι απαραίτητοι ελιγμοί, λόγω ανθρώπινων και οργανωτικών παραγόντων, μηχανικών βλαβών κ.α.

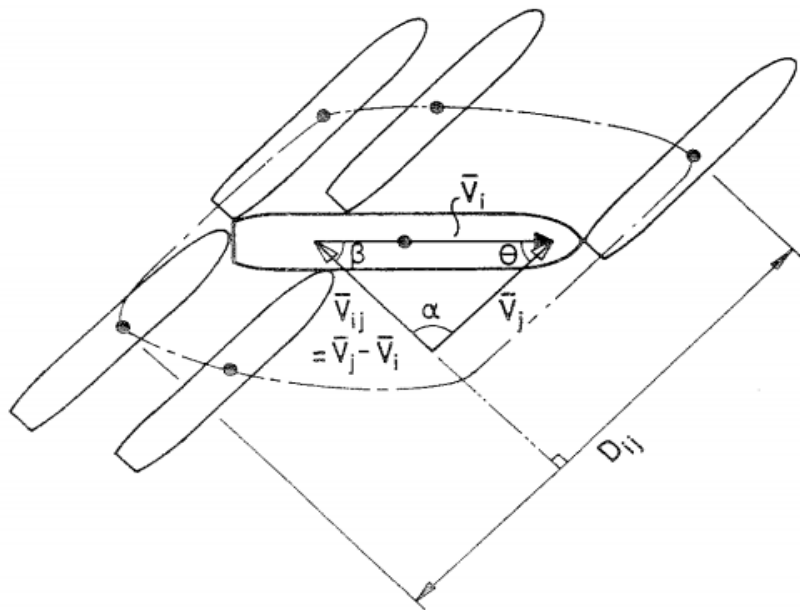
Μέσω του παραπάνω τύπου λαμβάνονται υπ' όψιν δεδομένα της θαλάσσιας κυκλοφορίας (όπως οι θέσεις των πλοίων), ενώ συνυπολογίζονται και οι πιθανές αιτίες σύγκρουσης, σε συνδυασμό με ιστορικά στοιχεία και εκθέσεις διερεύνησης ατυχημάτων (Chen et al., 2017).

κινηματική κατάσταση των σκαφών (ταχύτητα, πορεία κλπ) παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια μίας συνάντησης, κάτι που δεν αποτελεί ρεαλιστική προσέγγιση και είναι πιθανό να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις.

2) Κριτήρια ορίων ασφαλείας

Αποτελούν κριτήρια στα οποία εισάγονται όρια ασφαλείας τα οποία αντανακλούν τις χωρικές σχέσεις μεταξύ των πλοίων. Χαρακτηριστικότερες περιπτώσεις αποτελούν ο τομέας η περιοχή του πλοίου (ship domain) και η διάμετρος σύγκρουσης (collision diameter).

Οι Fujii and Shiobara (1971) ήταν οι πρώτοι που εισήγαγαν την έννοια της διαμέτρου σύγκρουσης D_{ij} ως ένα σύνορο ασφαλείας για την ανάλυση του αριθμού των υποψηφιοτήτων (βλ. Σχήμα 3.10). Εάν η απόσταση μεταξύ δύο πλοίων είναι μικρότερη αυτή της διαμέτρου, τότε είναι πολύ πιθανόν να συμβεί σύγκρουση. Ουσιαστικά η διάμετρος σύγκρουσης ισούται με την μέγιστη προβολή των διαστάσεων των εμπλεκόμενων πλοίων σε ένα επίπεδο κάθετο ως προς το διάνυσμα της σχετικής τους ταχύτητας.



Σχήμα 3.10: Διάμετρος σύγκρουσης D_{ij} (Pedersen, 1995)

Οι συγγραφείς υπογράμμισαν ότι η τιμή της διαμέτρου είναι ανάλογη του μήκους των πλοίων. Ωστόσο, ο Pedersen (1995) ήταν αυτός που διατύπωσε τον ακριβή μαθηματικό τύπο για τον υπολογισμό της συγκεκριμένης παραμέτρου:

$$D_{ij} = \frac{(L_i V_j)}{v_{ij}} \sin\theta + B_j \left[1 - \left(\sin\theta \frac{v_i}{v_{ij}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + B_i \left[1 - \left(\sin\theta \frac{v_j}{v_{ij}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

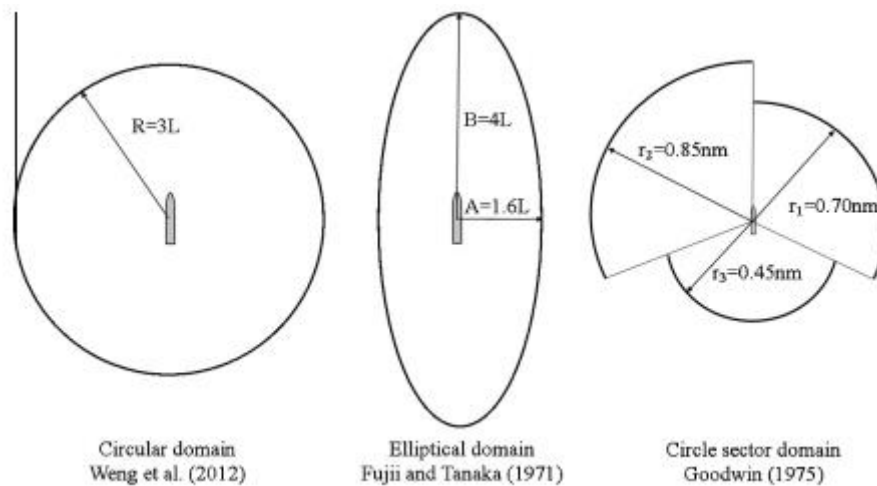
όπου:

- L_i, L_j τα μήκη κάθε ζεύγους πλοίων i και j

- B_i, B_j τα πλάτη κάθε ζεύγους πλοίων i και j
- V_i, V_j οι ταχύτητες κάθε ζεύγους πλοίων i και j
- V_{ij} η σχετική ταχύτητά τους και
- θ η γωνία συνάντησής τους

Οι Montewka et al. (2010) κατέληξαν στο ότι η εφαρμογή του κριτηρίου της διαμέτρου σύγκρουσης, το οποίο υποδηλώνει σχεδόν φυσική επαφή μεταξύ των πλοίων, είναι πιθανό να οδηγήσει υπό ορισμένες συνθήκες σε υποτίμηση των αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι αν δύο πλοία βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη της D_{ij} τότε η σύγκρουση είναι βέβαιο πως θα αποφευχθεί, κάτι που στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν ισχύει. Για αυτό και εισήγαγαν τη συναφή με τη διάμετρο σύγκρουσης έννοια του MDTC δηλαδή της Ελάχιστης Απόστασης για Σύγκρουση (Minimum Distance to Collision). Το μέγεθος αυτό υποδηλώνει την ελάχιστη απόσταση προσέγγισης μεταξύ δύο σκαφών για την οποία είναι δυνατή η αποφυγή της σύγκρουσης εάν διενεργηθούν οι κατάλληλοι ελιγμοί. Η τιμή του εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων όπως είναι η γωνία συνάντησης και οι ελκτικές ικανότητες του κάθε πλοίου.

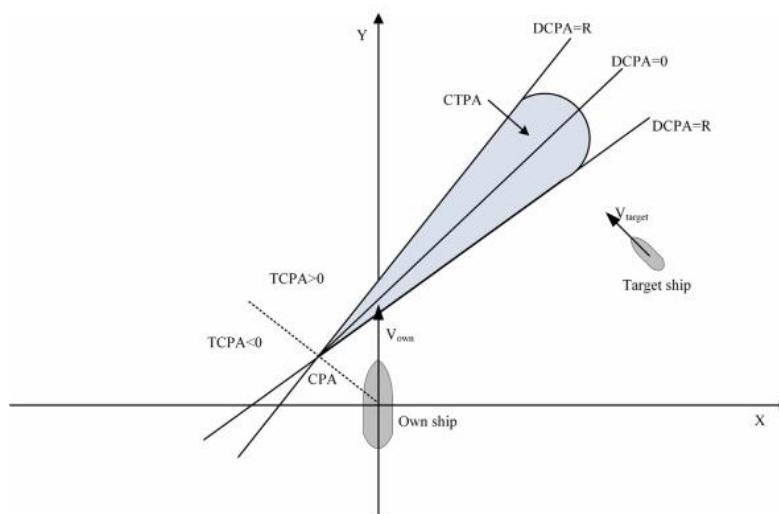
Η έννοια του τομέα ή περιοχής του πλοίου εισήχθηκε από τους Fujii and Shiobara (1971) και Godwin (1975) και ορίζεται ως “ο χώρος τον οποίο ο αξιωματικός υπηρεσίας θέλει να διατηρήσει καθαρό από άλλα αντικείμενα” (Szlapczynski and Szlapczynska, 2015). Κατά καιρούς έχουν προταθεί τομείς ποικίλων γεωμετρικών ορίων (κυκλικοί, ελλειπτικοί, πολυγωνικοί, ασαφούς γεωμετρίας κ.α.), εξαρτώμενοι από ένα πλήθος παραγόντων (βλ. Σχήμα 3.11). Αν ο τομέας ενός πλοίου παραβιαστεί ή υπάρξει επικάλυψη με τον τομέα κάποιου άλλου πλοίου, τότε είναι πιθανό να συμβεί ατύχημα.



Σχήμα 3.11: Ενδεικτικά γεωμετρικά όρια που έχουν προταθεί για τον καθορισμό του τομέα του πλοίου (ship domain) από διάφορους συγγραφείς (Goerlandt and Kujala, 2014)

3) Κριτήρια βασισμένα στην ταχύτητα

Η ιδέα αξιοποίησης της ταχύτητας για την εκτίμηση της επικινδυνότητας μίας συνάντησης εισήχθηκε αρχικά από τους Degré and Lefèvre (1981), ενώ ο Lenart (1983) διατύπωσε την έννοια της περιοχής CTPA (Collision Threat Parameter Area). Σε συνθήκες συνάντησης, εάν το διάνυσμα της ταχύτητας του ενός πλοίου καταλήγει εντός της περιοχής CTPA του άλλου, τότε υφίσταται ο κίνδυνος σύγκρουσης (βλ. Σχήμα 3.12). Παρεμφερές με την ιδέα της περιοχής CTPA είναι και το κριτήριο VO (Velocity Obstacle) το οποίο έχει προταθεί από διάφορους συγγραφείς τα τελευταία χρόνια (π.χ. Chen et al. 2018) και περιγράφει μέσω της δημιουργίας της αντίστοιχης περιοχής το εύρος των ταχυτήτων που μπορεί να οδηγήσει σε σύγκρουση τα δύο εκάστοτε σκάφη.



Σχήμα 3.12: Σχηματική απεικόνιση της περιοχής CTPA (Chen et al., 2019)

3.4.1.2 Υπολογισμός Παράγοντα Αιτιώδους Συνάφειας (Causation Factor)

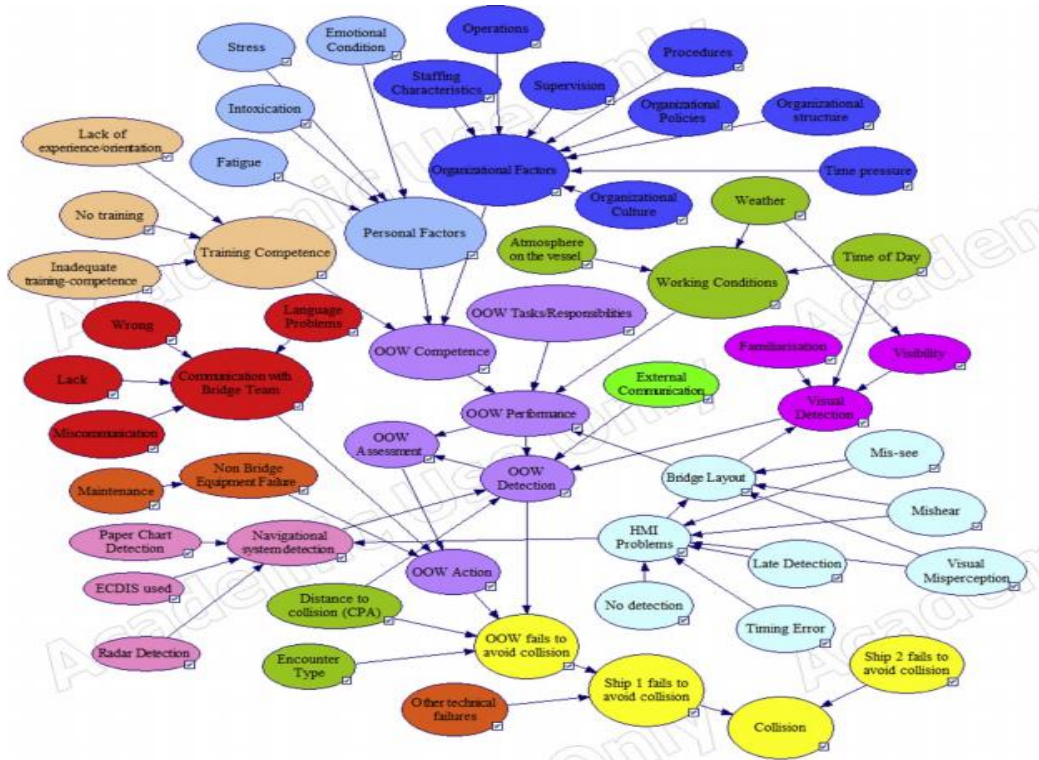
Ο παράγοντας ή πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας P_C αναπαριστά την πιθανότητα ένα υποψήφιο ζευγάρι να καταλήξει τελικά σε σύγκρουση, ακόμα και αν διενεργηθούν ελιγμοί αποφυγής, λόγω ανθρώπινων και οργανωτικών παραγόντων, τεχνικών αστοχιών κ.α. Ο υπολογισμός του αποτελεί συνεπώς απαραίτητο και αναπόσπαστο κομμάτι κατά την ανάλυση ρίσκου των συγκρούσεων.

Ο απλούστερος και παραδοσιακότερος τρόπος για τον καθορισμό του είναι η χρησιμοποίηση στατιστικών στοιχείων ατυχημάτων τα οποία αντλούνται από πηγές όπως εκθέσεις διερεύνησης, βάσεις δεδομένων κ.α. Για το σκοπό αυτόν εισάγονται μέθοδοι όπως η παλινδρόμηση (regression), η ανάλυση συχνότητας κ.α. Σύμφωνα με τον Pedersen (1995) η πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας μπορεί να εκτιμηθεί από δεδομένα ατυχημάτων τα οποία συλλέχτηκαν σε διάφορες τοποθεσίες και στη συνέχεια να μετασχηματιστούν καταλλήλως για την υπό ανάλυση περιοχή. Ωστόσο, υφίσταται πάντα ο κίνδυνος μη επάρκειας καταγεγραμμένων ατυχημάτων και άρα έλλειψης ικανοποιητικών δεδομένων στην περιοχή που εξετάζεται. Επιπλέον όπως

έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 3.3.3.2 η μέθοδος αυτή επικεντρώνεται στο παρελθόν, ενώ παράλληλα δε συμβάλλει στην κατανόηση των αιτιών αυτών που οδηγούν στην αποτυχία αποφυγής της σύγκρουσης σε μία κατάσταση επικίνδυνης κατάστασης (Hanninen and Kujala, 2009). Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια έχουν επιστρατευθεί μέθοδοι οι οποίες ενσωματώνουν επιπρόσθετες πληροφορίες όπως π.χ. οι γνώσεις ειδικών και εμπειρογνομόνων. Τέτοιες μεθόδους αποτελούν τα Δένδρα Σφαλμάτων (Fault Trees) και τα Δίκτυα Bayes (Bayesian Networks).

Τα Fault Trees, τα οποία έχουν υιοθετηθεί και από τον IMO στα πλαίσια της Τυπικής Αποτίμησης Ασφαλείας (FSA), έχουν εφαρμοστεί από αρκετούς μελετητές καθώς μπορούν να μοντελοποιήσουν τις αιτιώδεις σχέσεις μεταξύ των παραγόντων που οδηγούν στην εμφάνιση σύγκρουσης, ενώ χαρακτηρίζονται από συνοπτική δομή και ευκολία στην εφαρμογή. Η δυαδική φύση των μεταβλητών τους όμως, καθιστά δύσκολο τον προσδιορισμό κάποιων παραγόντων που μπορεί να περιλαμβάνουν πολλαπλές πιθανές καταστάσεις (Martins and Maturana, 2010).

Τα Bayesian Networks τέλος, έχουν βρει αυξημένες εφαρμογές την τελευταία δεκαετία λόγω της ευκολίας την οποία παρουσιάζουν στην ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών πληροφοριών όπως κρίσεις ειδικών, αποτελέσματα στοχαστικών προσομοιώσεων κ.α. , αλλά και της δυνατότητας συνεχούς επικαιροποίησης στις τιμές των μεταβλητών τους. Μπορούν επίσης να αναπαραστήσουν τις πολύπλοκες αιτιώδεις σχέσεις αλλά και τις αμοιβαίες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διάφορων παραγόντων (Zhan and Thai, 2016).



Σχήμα 3.13: Bayesian Network για τον υπολογισμό του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας P_C (Sotiralis et al., 2016)

3.4.1.3 Στατιστικά Μοντέλα

Στα στατιστικά μοντέλα ιστορικά στοιχεία ατυχημάτων και δεδομένα κυκλοφορίας ταυτόχρονα με την εφαρμογή τεχνικών όπως η θεωρία ουρών, η παλινδρόμηση (regression), η τεχνητή νοημοσύνη κ.α. για την εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης.

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

4.1 Γενικό Περίγραμμα

Η γενική ιδέα του μοντέλου βασίζεται στη διπλωματική εργασία του Δημήτρη Ράκα το 2015 με τίτλο “Ανάπτυξη Στοχαστικού Μοντέλου για την Εκτίμηση της Πιθανότητας Σύγκρουσης στο Αιγαίο Πέλαγος”. Εμπεριέχει ωστόσο ένα σαφές σύνολο βελτιώσεων, προσανατολισμένων στην καλύτερη απεικόνιση του τοπικού στόλου και των χαρακτηριστικών της υπο μελέτης περιοχής και κατά συνέπεια στη ρεαλιστικότερη εκτίμηση του αναμενόμενου αριθμού συγκρούσεων σε αυτή. Επιγραμματικά, οι βασικότερες αλλαγές της εξελιγμένης αυτής έκδοσης – οι οποίες πρόκειται να περιγραφούν αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους - συνίστανται στα εξής:

- 1) Στατιστική επεξεργασία δεδομένων των πλοίων που κινούνται συγκεκριμένα εντός της ζώνης ενδιαφέροντος και όχι του παγκοσμίου στόλου συνολικά
- 2) Συμπερίληψη των βασικών διαστάσεων τους (μήκος και πλάτος)
- 3) Ακριβέστερη μέτρηση και μοντελοποίηση του ρυθμού αφίξεων στις δύο εισόδους της διαδρομής
- 4) Καταγραφή του τρόπου παράκαμψης του νησιού της Κέας (από δυτικά ή από ανατολικά) με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών διαδρομών που ακολουθούνται
- 5) Εφαρμογή καταλληλότερου – σε συνάρτηση με τις βιβλιογραφικές τάσεις και το χαρακτήρα του μοντέλου- κριτηρίου σύγκρουσης

Η κυκλοφορία προσομοιώνεται στοχαστικά για χρονικό διάστημα ενός μήνα, μέσω της εκτέλεσης κώδικα γραμμένου σε Matlab. Δε λαμβάνονται υπ’ όψιν οι μετεωρολογικές συνθήκες, η κατάσταση της θάλασσας, καθώς και οι ελκτικές ικανότητες των πλοίων, στα πλαίσια της έννοιας της “τυφλής πλοήγησης” (blind navigation). Στα μεγέθη που χρησιμοποιούνται ως εισροές σε αυτόν (τύπος πλοίου, μήκος, πλάτος, ταχύτητα, αφίξεις) προσαρμόζονται κατάλληλες- όπως προκύπτει μετά από ελέγχους Kolmogorov-Smirnov – κατανομές. Η λογική του αλγορίθμου βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo, δηλαδή στην τεχνική επίλυσης πολύπλοκων μαθηματικών προβλημάτων μέσω της επαναλαμβανόμενης τυχαίας δειγματοληψίας. Οι θέσεις των πλοίων που βρίσκονται εντός της διαδρομής κάθε χρονική στιγμή ελέγχονται ανα ζεύγος, ώστε να προκύψει ο αριθμός των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης και κατ’ επέκταση του προσδοκώμενου αριθμού ατυχημάτων κατά το μελετώμενο χρονικό διάστημα. Ο αλγόριθμος τέλος, επαναλαμβάνεται για έναν επαρκή αριθμό φορών προκειμένου να διασφαλιστεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων σε μία μέση τιμή σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Central Limit Theorem) το οποίο θα επεξηγηθεί στη συνέχεια της εργασίας.

4.2 Συλλογή Δεδομένων

Για το χρονικό διάστημα 1 έως 31 Ιουλίου 2019, αντλήθηκαν κυκλοφοριακές πληροφορίες των πλοίων που πραγματοποίησαν το δρομολόγιο Ελαφώνησος – Δαρδανέλια και αντίστροφα, από την ιστοσελίδα Marine Traffic. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ένα από αυτά -1019 στο σύνολο - καταγράφηκαν ο τύπος του, η υποκατηγορία, οι βασικές του διαστάσεις, η μέση και η μέγιστη ταχύτητα πλεύσης, η ακριβής ώρα εισόδου του στη διαδρομή και ο τρόπος διέλευσης από την Κέα. Μέσω των παρατηρήσεων αυτών προέκυψαν και οι αντίστοιχες κατανομές. Τονίζεται ότι στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, δε χρησιμοποιήθηκαν καθόλου στοιχεία του AIS ενώ δεν ελήφθησαν υπ' όψιν οι αλληλεπιδράσεις με άλλες διαδρομές (λ.χ. πλοία που εισέρχονται από την Ελαφώνησο αλλά δε διασχίζουν ολόκληρη τη διαδρομή έως το στενό των Δαρδανελίων, αλλά κατευθύνονται προς τον Πειραιά ή άλλους προορισμούς).

4.3 Χάραξη Διαδρομής

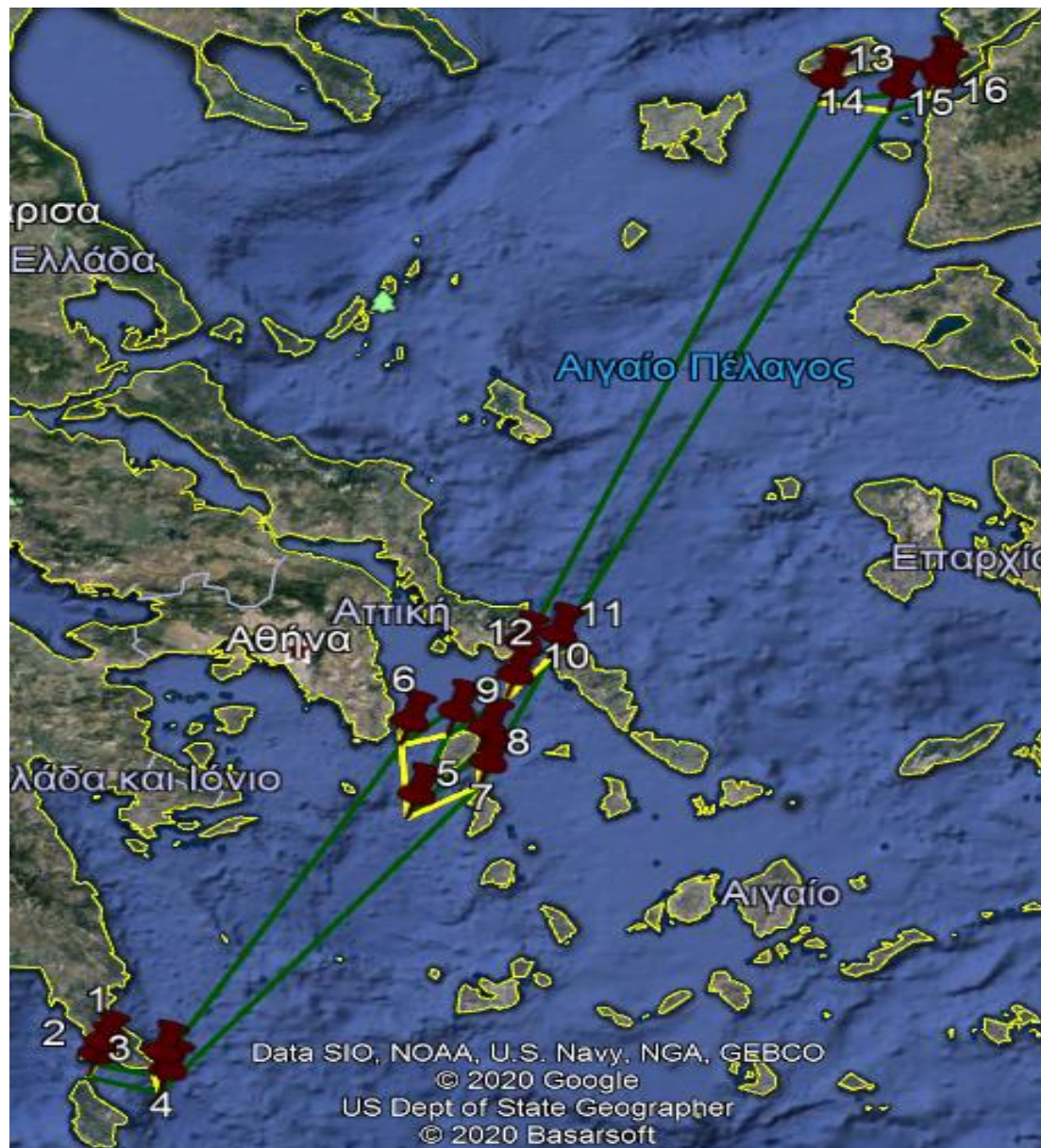
Η θαλάσσια διαδρομή που μελετάται συνδέει το Στενό της Ελαφονήσου με αυτό των Δαρδανελίων, ενώ η ναυτική ασφάλειά της έχει αναλυθεί στο παρελθόν από ένα πλήθος ερευνητών (Andritsopoulos, 2011; Ventikos et al., 2017). Ο ακριβής καθορισμός της βασίστηκε στους χάρτες πυκνότητας θαλάσσιας κυκλοφορίας της Marine Traffic. Συνολικά ορίστηκαν 16 σημεία (βλ. Σχήμα 4.1) οι συντεταγμένες των οποίων μετασηματίστηκαν από το παγκόσμιο (WGS84/ World Geodetic System 1984) στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς (GGRS87/ Hellenic Geodetic Reference System 1987 - Greek Geodetic Reference System 1987 – GGRS87) γνωστό και ως ΕΓΣΑ87. Το ΕΓΣΑ87 είναι ένα μη γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς, συνδεδεμένο με τις γεωγραφικές συντεταγμένες του γεωδαιτικού σταθμού του Διονύσου βορειοδυτικά των Αθηνών (Dionysos Satellite Observatory ή DSO, 38.078400°N 23.932939°E). Καλύπτει 6 μοίρες γεωγραφικού μήκους εκατέρωθεν του 24^{ου} μεσημβρινού (18°E-30°E) προβάλλοντας έτσι ολόκληρη την ελληνική επικράτεια (η οποία εκτείνεται περίπου σε 9° γεωγραφικού μήκους) σε μία ζώνη. Στην κατεύθυνση Υ (S-N) το 0 αντιστοιχεί στον ισημερινό. Στην κατεύθυνση Χ (W-E) η τιμή 500000 m αποδίδεται στον κεντρικό μεσημβρινό (24°), ώστε να αποφεύγονται αρνητικές τιμές. Η προβολή των συντεταγμένων από το WGS84 στο ΕΓΣΑ87 ισοδυναμεί με τη μετατροπή συντεταγμένων από πολικές σε καρτεσιανές (Pieri et al., 2016).

4.4 Πορεία των Πλοίων εντός της Διαδρομής

Η διαδρομή που σχηματίστηκε αποτελείται από τις πύλες εισόδου 1-2 και 15-16 και τους ενδιάμεσους κόμβους 3-4, 5-6, 6-9, 10-12, 5-7, 7-8, 11-12 και 13-14 (βλ. Εικόνες 4.2 έως 4.4).

Κάθε πλοίο εισέρχεται και εξέρχεται από αυτή μέσω των πυλών 1-2 ή 15-16, επιλέγοντας μέσω ομοιόμορφης κατανομής ένα οποιοδήποτε σημείο περάσματος πάνω στα ευθύγραμμα τμήματα που τις ορίζουν. Η ομοιόμορφη ή ορθογώνια

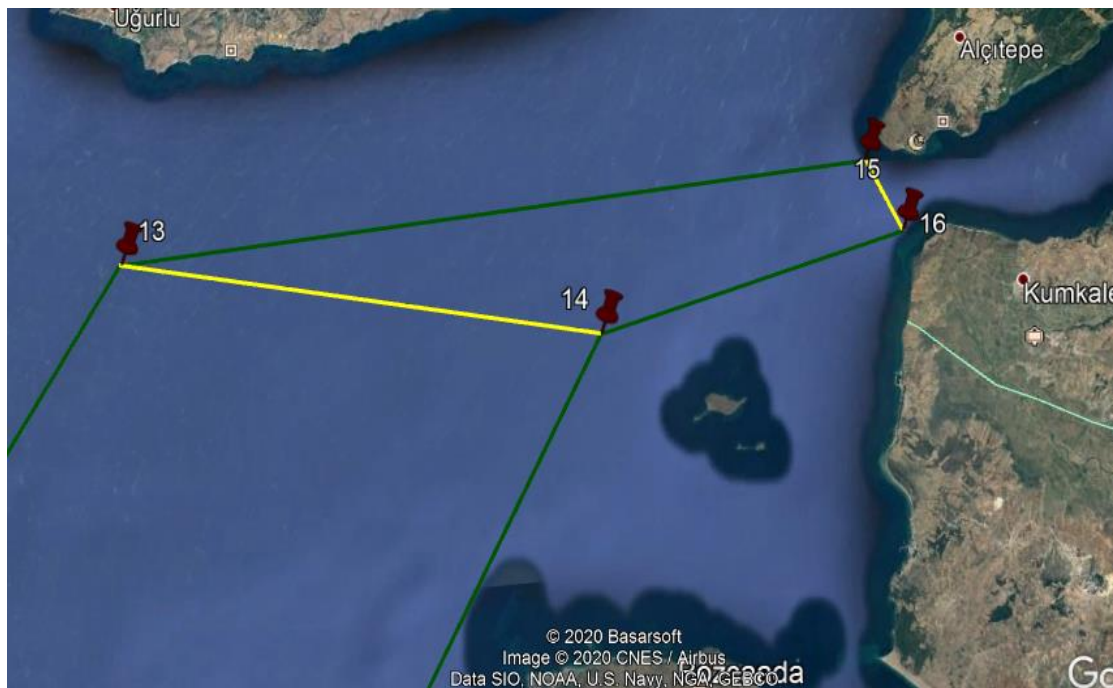
κατανομή είναι μία συμμετρική κατανομή στην οποία όλα τα διαστήματα ίσου μήκους (άρα και όλα τα σημεία πάνω στον κάθε κόμβο) έχουν την ίδια πιθανότητα εμφάνισης. Αυτόματα ο αλγόριθμος αποδίδει σε αυτό μια τυχαία τιμή για τον ακριβή του τύπο, το μήκος, το πλάτος και την ταχύτητά του σύμφωνα με τις προκύπτουσες κατανομές. Επιπλέον επιλέγονται τα σημεία διέλευσης από όλους τους υπόλοιπους κόμβους και πάλι μέσω ομοιόμορφων κατανομών. Τα πλοία κινούνται ευθύγραμμα από τον προηγούμενο στον επόμενο κόμβο, κατά μήκος του νοητού ευθύγραμμου τμήματος η αρχή και το τέλος του οποίου ορίζονται από τα σημεία διέλευσης που έχουν τυχαία επιλεγεί στους εκάστοτε εκατέρωθεν κόμβους. Η ακριβής τους τροχιά προκύπτει τελικά από τη σύζευξη όλων αυτών των νοητών ευθυγράμμων τμημάτων μεταξύ τους. Η διαδρομή είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να καθίσταται δυνατή η ευθεία μετάβαση από κόμβο σε κόμβο, ενώ η ταχύτητα πλεύσης του κάθε σκάφους διατηρείται σταθερή καθ'ολη τη διάρκεια του ταξιδιού.



Σχήμα 4.1: Προσέγγιση της διαδρομής μέσω συντεταγμένων



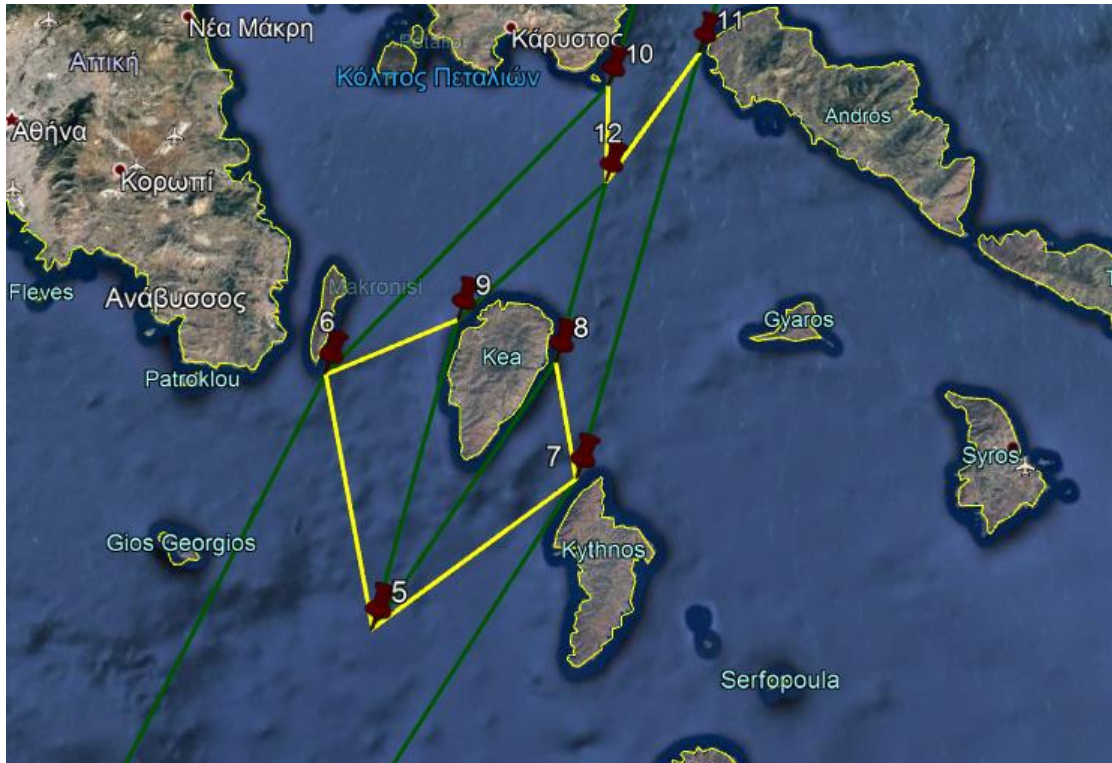
Σχήμα 4.2: Πύλη εισόδου/εξόδου 1-2 και κόμβος διέλευσης 3-4



Σχήμα 4.3: Πύλη εισόδου/εξόδου 15-16 και κόμβος διέλευσης 13-14

Η παράκαμψη της Κέας μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, περνώντας είτε από τους κόμβους 5-6, 6-9 και 10-12, είτε από τους 5-7, 7-8 και 11-12. Κάθε πλοίο “επιλέγει” μέσω της κατανομής Βερνουίλι προς ποια από τις δύο κατευθύνσεις θα κινηθεί. Η κατανομή Βερνουίλι είναι μια διακριτή συνάρτηση κατανομής τυχαίας μεταβλητής. Περιγράφει ένα τυχαίο πείραμα με δύο πιθανά

αποτελέσματα (επιτυχία - αποτυχία) και πιθανότητα επιτυχίας p . Πρόκειται ουσιαστικά για μία ειδική περίπτωση της διωνυμικής κατανομής στην οποία ο αριθμός των εκτελέσεων του πειράματος ισούται με 1 ($n=1$). Στην περίπτωση που μελετάται, τα δύο πιθανά αποτελέσματα αφορούν την τριάδα κόμβων που θα ακολουθηθεί από το κάθε σκάφος. Η αντίστοιχη πιθανότητά τους εξάγεται αναλογικά, μετά από επεξεργασία των καταγεγραμμένων παρατηρήσεων και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.



Σχήμα 4.4: Κόμβοι διέλευσης 5-6, 6-9, 10-12, 5-7, 7-8 και 11-12

Πίνακας 4.1: Καταγεγραμμένες παρατηρήσεις και πιθανότητες κατανομής Bernoulli περάσματος της Κέας

Κατεύθυνση Πλοίων	Τρόπος Παράκαμψης	Αριθμός Πλοίων	Πιθανότητα p
Βορειοανατολική (Ελαφόνησος προς Δαρδανέλια)	Ανατολικά (5-7,7-8,11-12)	243	0.507
	Δυτικά (5-6,6-9,10-12)	236	0.493
	Σύνολο	479	1
Νοτιοδυτική (Δαρδανέλια προς Ελαφόνησο)	Ανατολικά (5-7,7-8,11-12)	199	0.369
	Δυτικά (5-6,6-9,10-12)	341	0.631
	Σύνολο	540	1

Συνεπώς, ένα πλοίο που εισέρχεται στη διαδρομή από την πύλη 1-2 και κινείται βορειοανατολικά, θα διέλθει ανατολικά από την Κέα (μέσω των κόμβων 5-7, 7-8 και 11-12) με πιθανότητα 0.507307 και δυτικά (μέσω των κόμβων 5-6, 6-9 και 10-12) με πιθανότητα 0.492693. Αντίστοιχα αν εισέλθει από την πύλη 15-16 κινούμενο νοτιοδυτικά, πρόκειται να επιλέξει τους κόμβους 5-7, 7-8 και 11-12 με πιθανότητα 0.368519 και τους 5-6, 6-9 και 10-12 με πιθανότητα 0.631481.

4.5 Εκτίμηση Αφίξεων

Πρώτο βήμα για τη δημιουργία του κυκλοφοριακού συμβάντος, αποτελεί η εκτίμηση του πλήθους των πλοίων που εμφανίζονται στις δύο πύλες της διαδρομής κατά το διάστημα προσομοίωσης, καθώς και η αποθήκευση της ακριβούς χρονικής στιγμής κάθε άφιξης. Οι αφίξεις προσεγγίζονται από την κατανομή Poisson, δηλαδή μία διακριτή συνάρτηση κατανομής τυχαίας μεταβλητής που περιγράφει τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταξύ τους - εμφανίσεων ενός γεγονότος εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Μία ομογενής διαδικασία Poisson μετράει αφίξεις που εμφανίζονται με σταθερό ρυθμό, έχει χαρακτηριστική παράμετρο του ρυθμού λ έτσι ώστε το πλήθος των αφίξεων στο χρονικό διάστημα $(t, t+\tau]$ ακολουθεί μια κατανομή Poisson με σχετική παράμετρο $\lambda\tau$ και περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P [N (t+\tau) - N (t) = k] = \frac{e^{-\lambda\tau} (\lambda\tau)^k}{k!}, k=0, 1, 2, \dots$$

όπου k το πλήθος των αφίξεων το χρονικό διάστημα $(t, t+\tau)$ και λ ο μέσος αριθμός αφίξεων ανα μονάδα χρόνου. Τα ακριβή μεσοδιαστήματα μεταξύ των αφίξεων ακολουθούν την εκθετική κατανομή.

Η εμφάνιση ενός πλοίου σε μία συγκεκριμένη θαλάσσια περιοχή, έχει θεωρηθεί από αρκετούς μελετητές ότι μπορεί να εκφραστεί μέσω της ομογενούς διαδικασίας Poisson (Pedersen, 1995; Przywarty, 2008; Montewka et al., 2010). Ωστόσο οι Goerlandt and Kujala (2011) συμπέραναν ότι μία τέτοια προσέγγιση εγείρει αρκετά ερωτηματικά, καθώς σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας ή μήνες του έτους παρατηρείται μεγαλύτερος αριθμός αναχωρήσεων από τα λιμάνια, υπογραμμίζοντας ταυτόχρονα ότι η μη ομογενής διαδικασία Poisson αντικατοπτρίζει ρεαλιστικότερα τον πραγματικό ρυθμό αφίξεων.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, σε κάθε μία από τις δύο εισόδους της διαδρομής εφαρμόστηκε μία μη ομογενής διαδικασία Poisson με δύο διαφορετικά λ εντός του 24ώρου, ένα κατά τη διάρκεια της μέρας και ένα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι συνολικά τέσσερις ζητούμενες τιμές της παραμέτρου (δύο για κάθε πύλη) εξήχθησαν ύστερα από την ανάλυση των ιστορικών δεδομένων ενός μήνα που συλλέχθηκαν από την Marine Traffic (βλ. παράγραφος 4.2). Πιο συγκεκριμένα, καταμετρήθηκε ξεχωριστά ο αριθμός των πλοίων που εισήλθαν στη θαλάσσια

περιοχή μελέτης από τις πύλες 1-2 και 15-16 , πριν και μετά την ανατολή του ηλίου αυτές τις 31 μέρες.

Πίνακας 4.2: Καταγεγραμμένες αφίξεις πλοίων στις δύο πύλες εισόδου και εξαγωγή αντίστοιχων λ

Πύλη Εισόδου	Σύνολο Πλοίων	Πλοία - Διάρκεια Μέρας	Πλοία- Διάρκεια Νύχτας	λ μέρας (πλοία/λεπτό)	λ νύχτας (πλοία/λεπτό)
Ελαφονήσου (1-2)	479	321	158	0.0115	0.0094
Δαρδανελίων (15-16)	540	329	211	0.0118	0.0126

Στην πύλη 1-2 ο ρυθμός άφιξης των πλοίων παρατηρήθηκε εντονότερος κατά τη διάρκεια της μέρας, ενώ αντίθετα στην πύλη 15-16 κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η διαπίστωση αυτή φαντάζει λογική, καθώς τα πλοία που εισέρχονται στο Αιγαίο Πέλαγος από τα Δαρδανέλια έχουνε μόλις αναχωρήσει από κάποιο κοντινό λιμάνι – λαμβανομένου υπ’όψιν ότι προέρχονται από την Τουρκία στη μεγάλη πλειοψηφία τους – επομένως είναι πιο πιθανό να διέλθουν από την πύλη αυτή κάποια βραδινή ώρα. Από την άλλη, η πύλη της Ελαφονήσου δε βρίσκεται κοντά σε κάποιο σημείο αναχώρησης, επομένως οι ώρες κατά τις οποίες τα πλοία διέρχονται από αυτή και εισέρχονται στη διαδρομή δεν βρίσκονται σε άμεση σύνδεση με τις ώρες έναρξης του ταξιδιού τους, ως εκ τούτου μπορεί να ποικίλουν. Λόγου χάρη ένα σκάφος που θα αναχωρήσει από κάποιο λιμάνι της Ιταλίας βράδυ, θα περάσει κατά πάσα πιθανότητα από την πύλη 1-2 το πρωί.

Κατά τη διάρκεια του ενός μήνα προσομοίωσης λοιπόν και ανάλογα με την ώρα της ημέρας στην οποία αυτή βρίσκεται, ο αλγόριθμος παράγει μέσω της εκθετικής κατανομής και του αντίστοιχου λ της μη ομογενούς Poisson τα μεσοδιαστήματα μεταξύ των αφίξεων και κατά συνέπεια τις ακριβείς χρονικές στιγμές κατά τις οποίες εμφανίζεται το κάθε πλοίο στις δύο πύλες της διαδρομής.

4.6 Κατανομή Τύπων Πλοίων

Ο τύπος κάθε πλοίου που εισέρχεται στη διαδρομή προκύπτει μέσω κατανομής Bernoulli (βλ. παράγραφος 4.4) λόγω των δύο πιθανών αποτελεσμάτων (cargo και tanker). Στην περίπτωση που του αποδίδεται από τον αλγόριθμο η τιμή “cargo”, τότε η ακριβής υποκατηγορία (Bulk Carrier, Containership, General Cargo ή RoRo) δίνεται από την πολυωνυμική κατανομή (multinomial distribution). Πρόκειται για μία διακριτή κατανομή η οποία εξετάζει τη συνδυαστική πιθανότητα να συμβεί ταυτόχρονα μια σειρά από k ενδεχόμενα E_1, E_2, \dots, E_k , σε n επαναλήψεις μιας τυχαίας διαδικασίας, το καθένα εκ των οποίων έχει τη δική του πιθανότητα p_1, p_2, \dots, p_k να πραγματοποιηθεί σε μία εκτέλεσή της. Αν λοιπόν με x_1, x_2, \dots, x_k , συμβολιστεί ο ακριβής αριθμός των φορών που επιζητείται να

εμφανισθεί το κάθε ενδεχόμενο, τότε η πιθανότητα να προκύψει το κάθε ένα από αυτά όσες φορές ορίστηκε προκύπτει ως εξής:

$$P = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!} (p_1^{x_1} p_2^{x_2} \dots p_k^{x_k})$$

Από την άλλη, εάν σε ένα πλοίο αποδοθεί η τιμή “tanker”, εφαρμόζεται και πάλι η κατανομή Bernoulli για τον καθορισμό της υποκατηγορίας του (Oil Tanker ή Gas Carrier). Η πιθανότητες όλων των ενδεχομένων (υποκατηγοριών) όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία του τοπικού στόλου απεικονίζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Κατανομή τύπων πλοίων

Τύπος	Παρατηρήσεις	Πιθανότητα <i>p</i>	Υποκατηγορία	Παρατηρήσεις	Πιθανότητα <i>p</i>
Cargo	778	0.764	Bulk Carrier	269	0.346
			Containership	79	0.102
			General Cargo	282	0.362
			RoRo	148	0.190
Tanker	241	0.236	Oil Tanker	227	0.942
			Gas Carrier	14	0.058
Σύνολο	1019	1	Σύνολο	1019	

Η απουσία επιβατηγών (passenger ships) από τις μετρήσεις θεωρείται αναμενόμενη, καθώς δεν υπάρχουν πλοία του συγκεκριμένου τύπου που να εκτελούν τόσο μεγάλα δρομολόγια στο Αιγαίο Πέλαγος ώστε να διασχίζουν τη διαδρομή μελέτης καθ'όλο το μήκος της, είτε προς τη μία είτε προς την άλλη κατεύθυνση. Σημειώνεται επίσης ότι εξαιρέθηκαν αγκυροβολημένα σκάφη μηδενικής ή πολύ μικρής ταχύτητας που παρατηρήθηκαν εντός της περιοχής μελέτης.

4.7 Κατανομή Διαστάσεων

Στα δεδομένα που συλλέχθηκαν για το μήκος και το πλάτος κάθε τύπου και υποκατηγορίας ξεχωριστά, αντιστοιχίστηκαν μέσω εργαλείων του Matlab στατιστικές κατανομές σε συνδυασμό με τη διενέργεια ελέγχων Kolmogorov – Smirnov ενός δείγματος για τον καθορισμό της καταλληλότητάς τους. Οι τυχαίες τιμές που παράγει ο αλγόριθμος για τις διαστάσεις των πλοίων σε κάθε επανάληψη, ακολουθούν τις κατανομές αυτές.

4.7.1 Έλεγχοι Υποθέσεων

Οι Έλεγχοι Υποθέσεων (Hypothesis Testing) είναι συμπερασματικές μεθοδολογίες οι οποίες επιτρέπουν τη διερεύνηση της ισχύος (αληθείας) μιας στατιστικής υπόθεσης, δηλαδή μιας πρότασης που αφορά κάποια παράμετρο ενός ή και περισσοτέρων πληθυσμών. Η διαδικασία του στατιστικού ελέγχου υποθέσεων

στηρίζεται στην αντιπαράθεση δύο αντιφατικών προτάσεων, της μηδενικής υπόθεσης H_0 (null hypothesis) και της εναλλακτικής υπόθεσης H_1 (alternative hypothesis). Η H_0 – η οποία θεωρείται αρχικά αληθής - γίνεται αποδεκτή ή απορρίπτεται βάσει του τι παρατηρείται σε ένα τυχαίο δείγμα το οποίο λαμβάνεται από τον πληθυσμό ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, εάν αυτό που παρατηρείται στο δείγμα είναι ακραίο, δηλαδή αν έχει πολύ μικρή πιθανότητα να συμβεί (δεδομένης της ισχύος της H_0), τότε η H_0 απορρίπτεται. Σε αντίθετη περίπτωση, αν αυτό που παρατηρείται στο δείγμα δεν είναι ακραίο-σπάνιο (όταν είναι αληθής η H_0) τότε δεν προκύπτουν επαρκείς ενδείξεις ώστε η H_0 να απορριφθεί. Κατά τη διαδικασία ελέγχου υποθέσεων είναι πιθανό να ανακύψουν τα εξής σφάλματα:

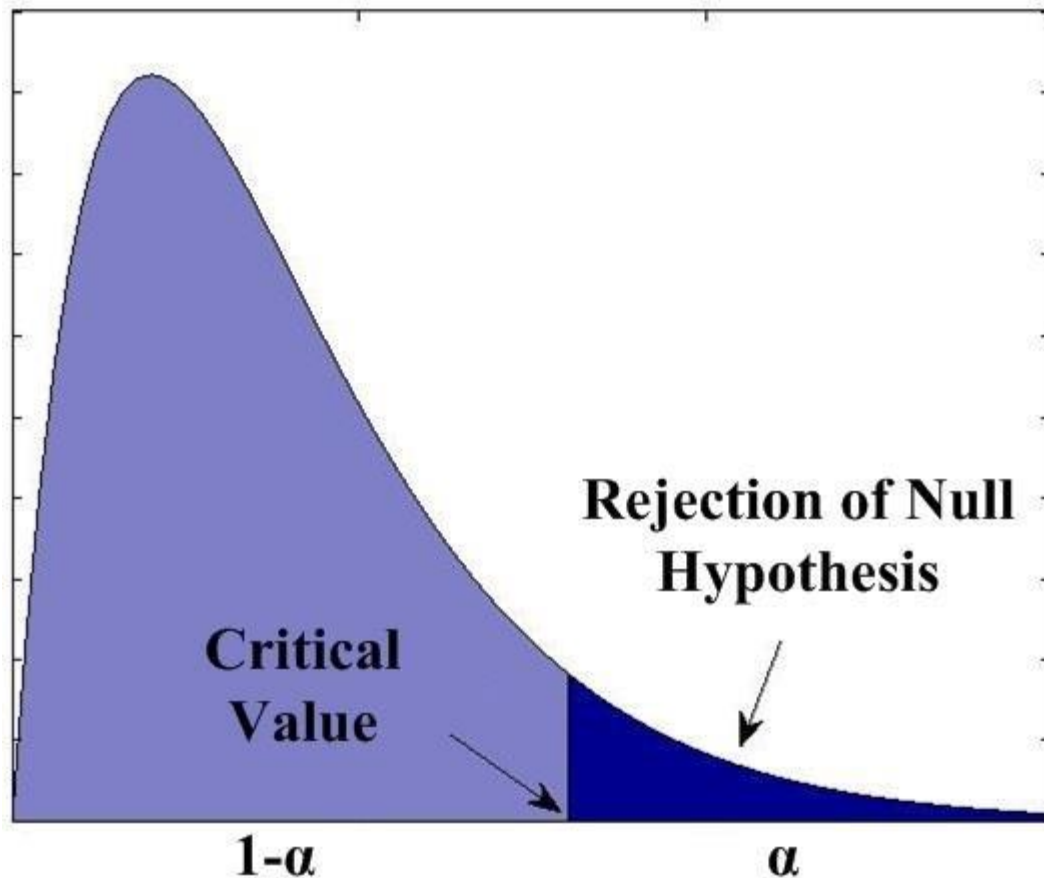
- 1) Απόρριψη της H_0 ενώ αυτή είναι αληθής ή αλλιώς **Σφάλμα Τύπου I**
- 2) Αποδοχή της H_0 (αδυναμία απόρριψής της) ενώ αυτή είναι ψευδής ή αλλιώς **Σφάλμα Τύπου II**

Ως επίπεδο σημαντικότητας α του ελέγχου ορίζεται η πιθανότητα διάπραξης σφάλματος τύπου I, δηλαδή η μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα εσφαλμένης απόρριψης της H_0 . Η επιλογή του βασίζεται στη διακριτική ευχέρεια του ερευνητή. Μία συνήθης τιμή που λαμβάνεται σε πολλές εφαρμογές πάντως είναι η $\alpha = 0.05 = 5\%$. Συναρτήσει του α κατασκευάζεται και ένα αντίστοιχο $100 \times (1-\alpha) \%$ διάστημα εμπιστοσύνης. Γενικά τα βήματα που ακολουθούνται σε έναν τυπικό στατιστικό έλεγχο υποθέσεων είναι:

- **Βήμα 1^ο:** Ορισμός μηδενικής υπόθεσης H_0 και εναλλακτικής υπόθεσης H_1 , καθώς και επίπεδου σημαντικότητας α
- **Βήμα 2^ο:** Καθορισμός της κατάλληλης στατιστικής συνάρτησης ελέγχου (σ.σ.ε) και της κρίσιμης τιμής (p value) (μέσω στατιστικών πινάκων)
- **Βήμα 3^ο:** Υπολογισμός της παρατηρούμενης τιμής της σ.σ.ε μέσω των δεδομένων του δείγματος
- **Βήμα 4^ο:** Απόφαση αποδοχής ή απόρριψης της H_0 . Εάν η παρατηρούμενη τιμή της σ.σ.ε ξεπερνάει την κρίσιμη τιμή, τότε παρατηρείται στατιστικώς σημαντική διαφορά της (σε επίπεδο σημαντικότητας α) από την αναμενόμενη τιμή της συνεπώς η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται (βλ. Σχήμα 4.5). Σε αντίθετη περίπτωση δε μπορεί να απορριφθεί και γίνεται αποδεκτή.
- **Βήμα 5^ο:** Ερμηνεία του αποτελέσματος και απάντηση στο σχετικό ερώτημα

Ένας έλεγχος μπορεί να είναι είτε μονόπλευρός (αριστερόπλευρος ή δεξιόπλευρος) είτε αμφίπλευρος. Η φιλοσοφία της διαδικασίας του στατιστικού ελέγχου υποθέσεων χρησιμοποιείται και σε πολλές πτυχές της καθημερινής ζωής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι δικαστικές αίθουσες στις οποίες η μηδενική υπόθεση ότι ο κατηγορούμενος είναι αθώος (υπόθεση H_0) καταρρίπτεται

μόνο εάν υπάρχουν επαρκή και ουσιώδη στοιχεία που να δικαιολογούν ενοχή (εναλλακτική υπόθεση H_1). Σε αντίθετη περίπτωση η H_0 δε μπορεί να απορριφθεί, όχι επειδή υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα περί αθωότητας αλλά λόγω απουσίας καταδικαστικών στοιχείων και επιχειρημάτων (η λεγόμενη αθώωση λόγω αμφιβολιών).

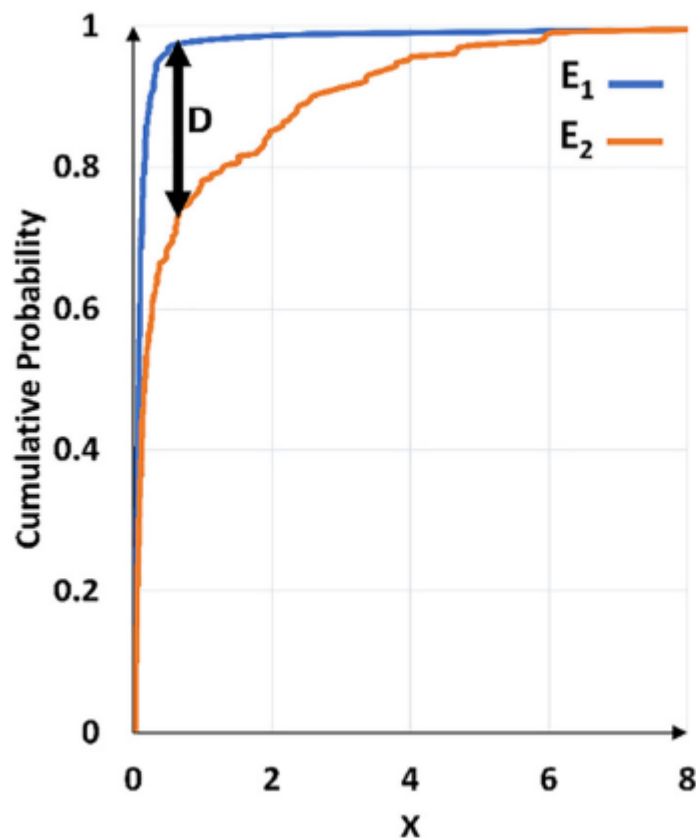


Σχήμα 4.5: Γραφική απεικόνιση της κρίσιμης τιμής και των περιοχών αποδοχής και απόρριψης της H_0 συναρτήσει του επίπεδου εμπιστοσύνης α (Abdelkhalik and Darani, 2016)

4.7.1.1 Έλεγχοι Καλής Προσαρμογής: Το Κριτήριο Kolmogorov - Smirnov (K-S Test)

Ένα σύννηθες πρόβλημα που συναντάται στην στατιστική είναι η εξεύρεση πληροφορίας σχετικά με την μορφή της κατανομής από την οποία προέρχεται ένα τυχαίο δείγμα. Πολλοί έλεγχοι υποθέσεων για παράδειγμα, προϋποθέτουν ότι το δείγμα προέρχεται από την κανονική κατανομή. Εάν κάποιο τυχαίο δείγμα δεν προέρχεται από την κατανομή κάτω από την οποία έχει κατασκευασθεί κάποιος έλεγχος, τότε δεν υπάρχει αρκετά μεγάλη ακρίβεια κατά τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Οι έλεγχοι που διερευνούν το κατά πόσο ένα δείγμα προέρχεται από μία συγκεκριμένη κατανομή, ονομάζονται έλεγχοι καλής προσαρμογής.

Ο έλεγχος κανονικότητας Kolmogorov – Smirnov (one sample Kolmogorov Smirnov test) αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους ελέγχους αυτού του είδους. Αρχικά υποτίθεται ότι το δείγμα αυτό προέρχεται από την εξεταζόμενη κατανομή (αρχική υπόθεση H_0). Έπειτα, υπολογίζεται η μέγιστη απόσταση D μεταξύ της εμπειρικής αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας (που προέρχεται δηλαδή από το δείγμα) και της αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας της θεωρητικής κατανομής (βλ. Σχήμα 4.6). Η απόσταση αυτή συγκρίνεται με μία κρίσιμη τιμή (critical value) η οποία λαμβάνεται από σχετικούς πίνακες και προκύπτει συναρτήσει του μεγέθους n του δείγματος αλλά και του διαστήματος εμπιστοσύνης που επιλέγεται. Εάν το D είναι μεγαλύτερο από την κρίσιμη τιμή, τότε η αρχική υπόθεση απορρίπτεται ενώ στην περίπτωση που είναι μικρότερο ή ίσο από αυτήν, τότε η H_0 γίνεται αποδεκτή συνεπώς το δείγμα μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από τη συγκεκριμένη κατανομή για το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης.

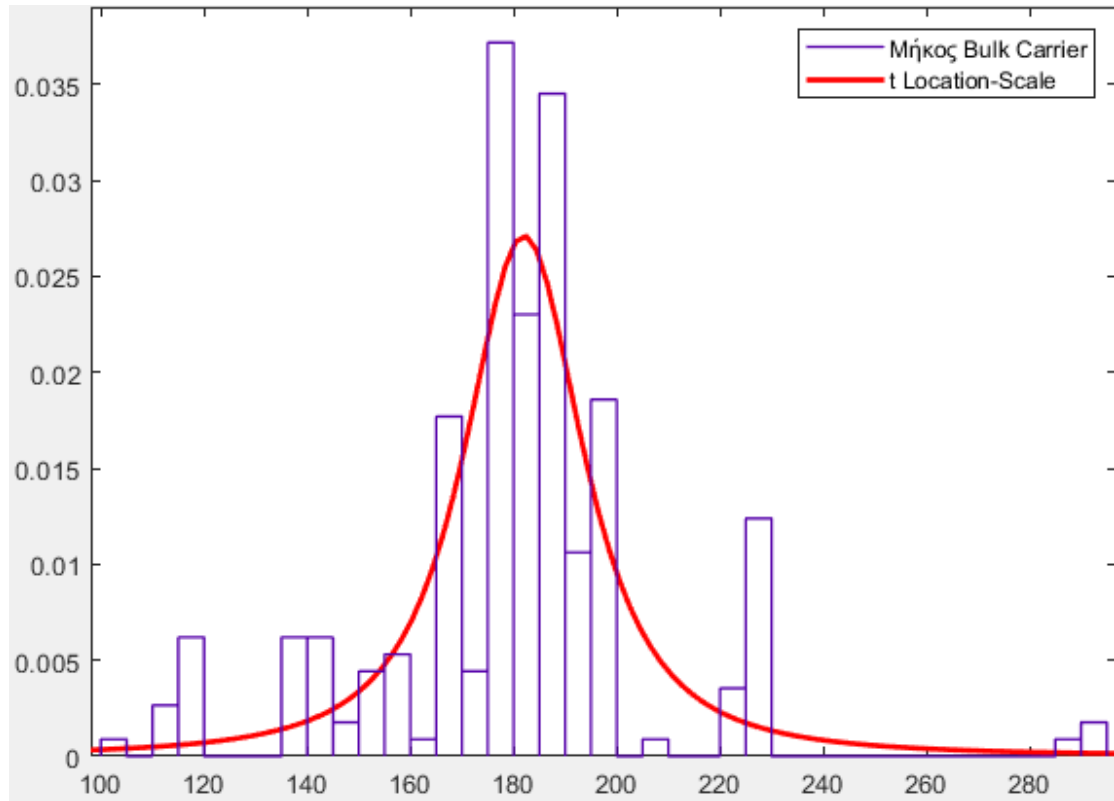


Σχήμα 4.6: Γραφική απεικόνιση του ελέγχου Kolmogorov – Smirnov και της μέγιστης απόστασης D μεταξύ των αθροιστικών συναρτήσεων πιθανότητας (Sanaei et al., 2019)

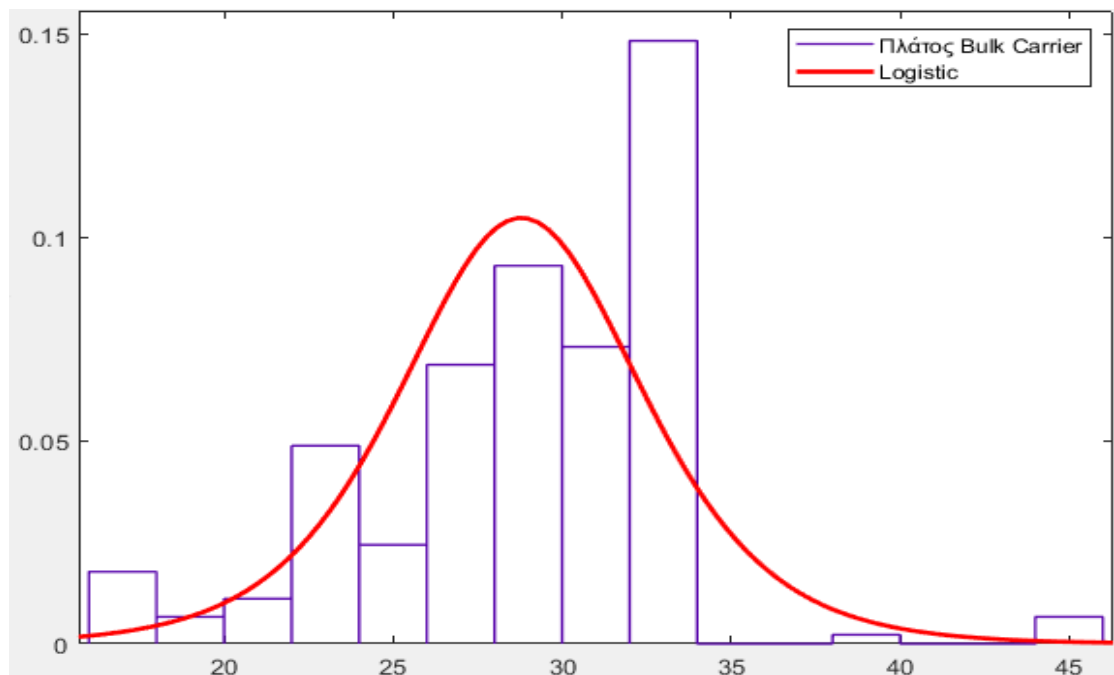
4.7.2 Επιλεγμένες Κατανομές

Στα Σχήματα 4.7 έως 4.16 απεικονίζονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των κατανομών μέσω των οποίων προσεγγίστηκαν τα μήκη και πλάτη κάθε είδους πλοίου. Στον Πίνακα 4.4 συνοψίζονται οι κατανομές και οι βασικές τους παράμετροι. Σημειώνεται ότι λόγω του μη επαρκούς αριθμού καταγεγραμμένων

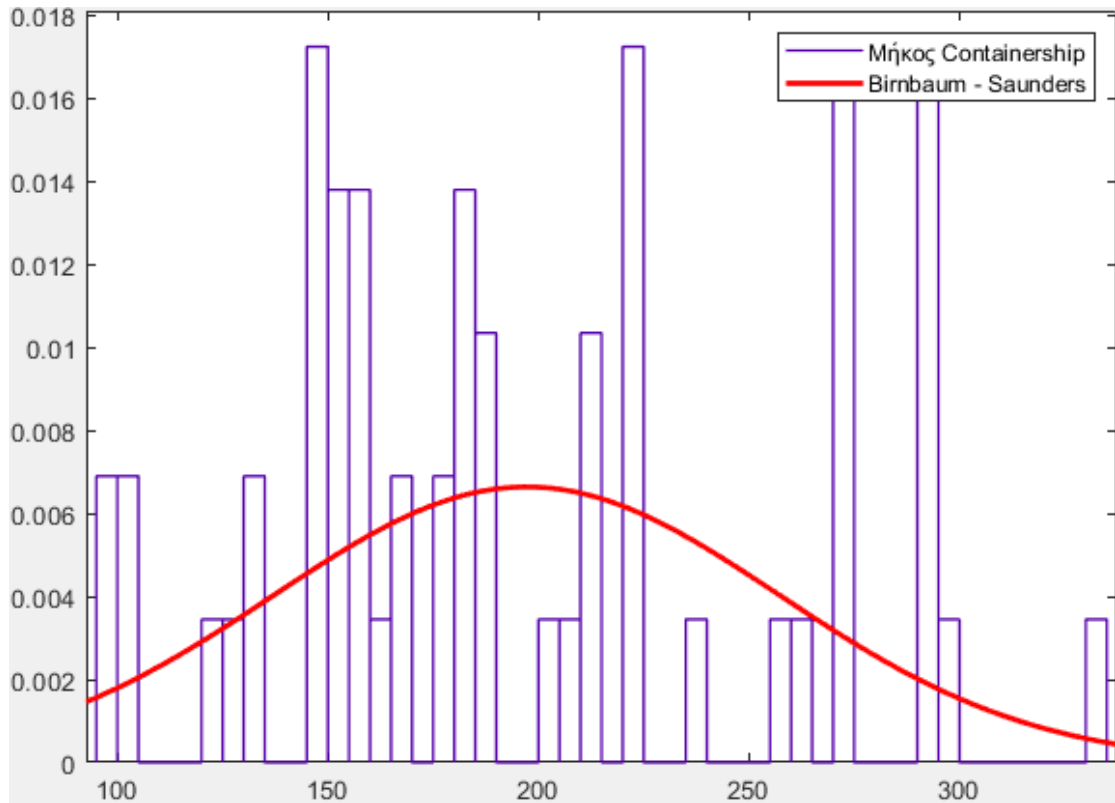
δεδομένων (14 στον αριθμό) σχετικών με πλοία υποκατηγορίας Gas Carrier (LNG/LPG Carriers), οι διαστάσεις όλων των πλοίων τύπου Tanker (Oil Tankers και Gas Carriers) εκφράστηκαν μέσω των ίδιων κατανομών.



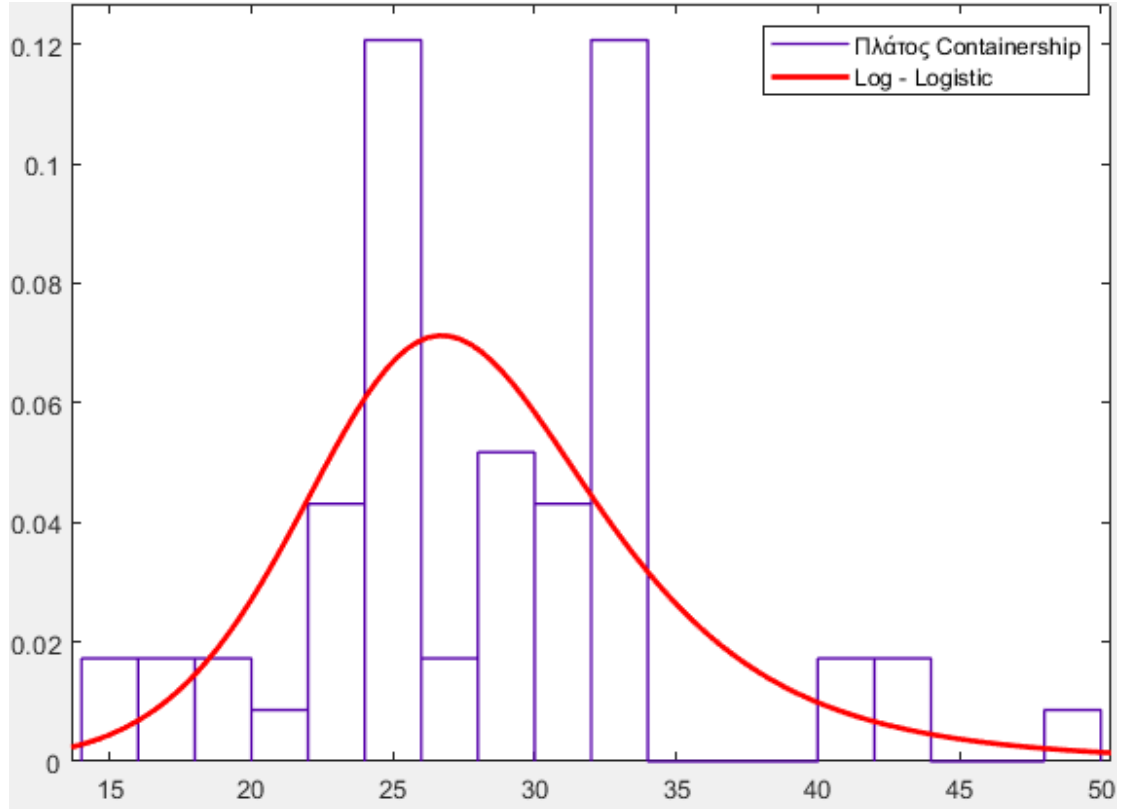
Σχήμα 4.7: Κατανομή t Location - Scale της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου Bulk Carrier



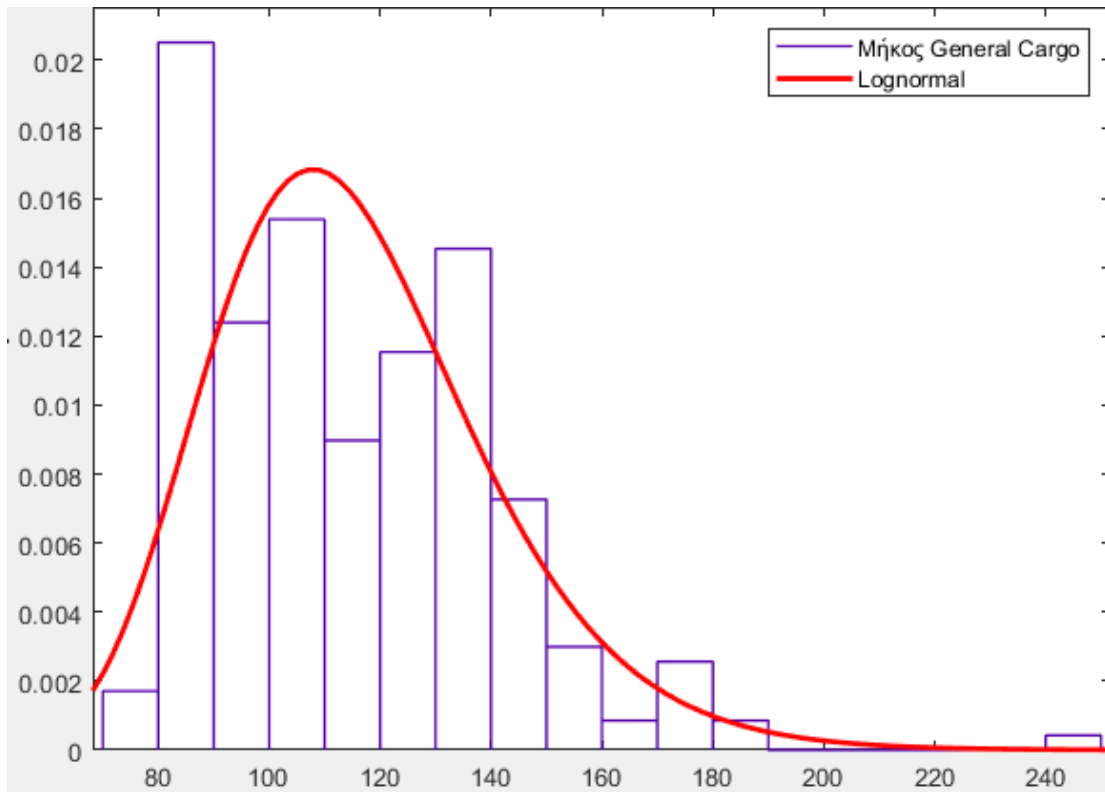
Σχήμα 4.8: Κατανομή Logistic της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου Bulk Carrier



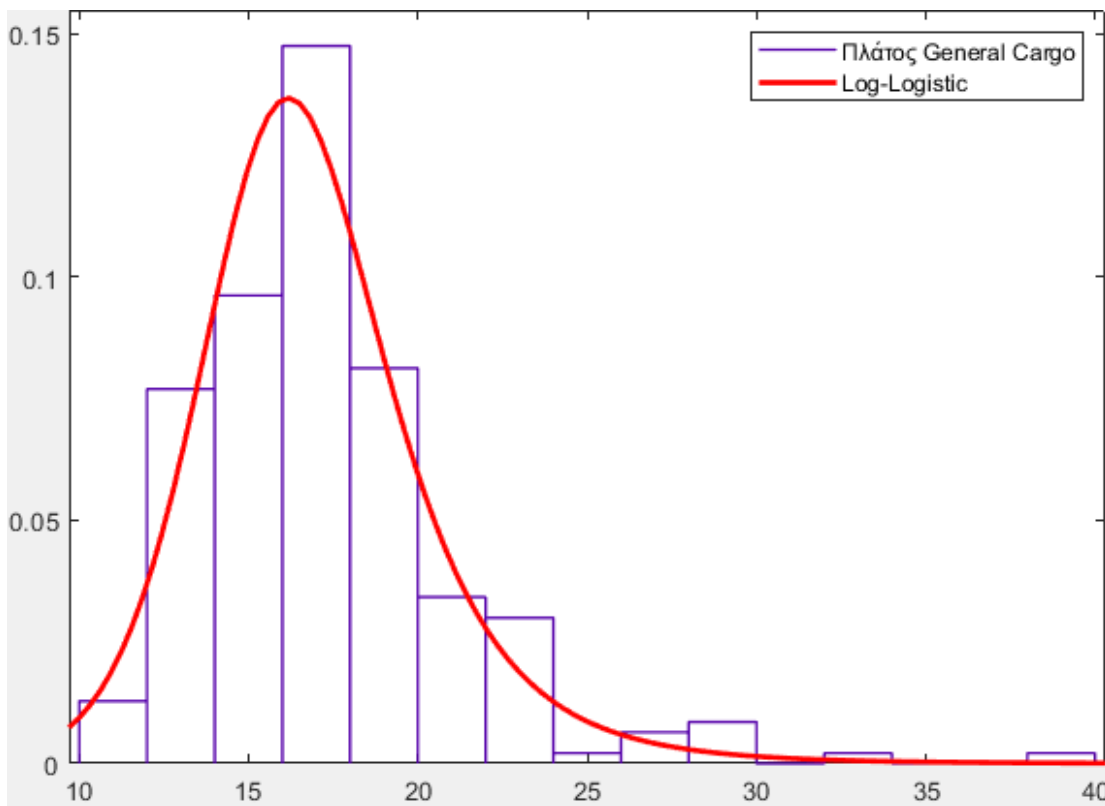
Σχήμα 4.9: Κατανομή Birnbaum - Saunders της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου Containership



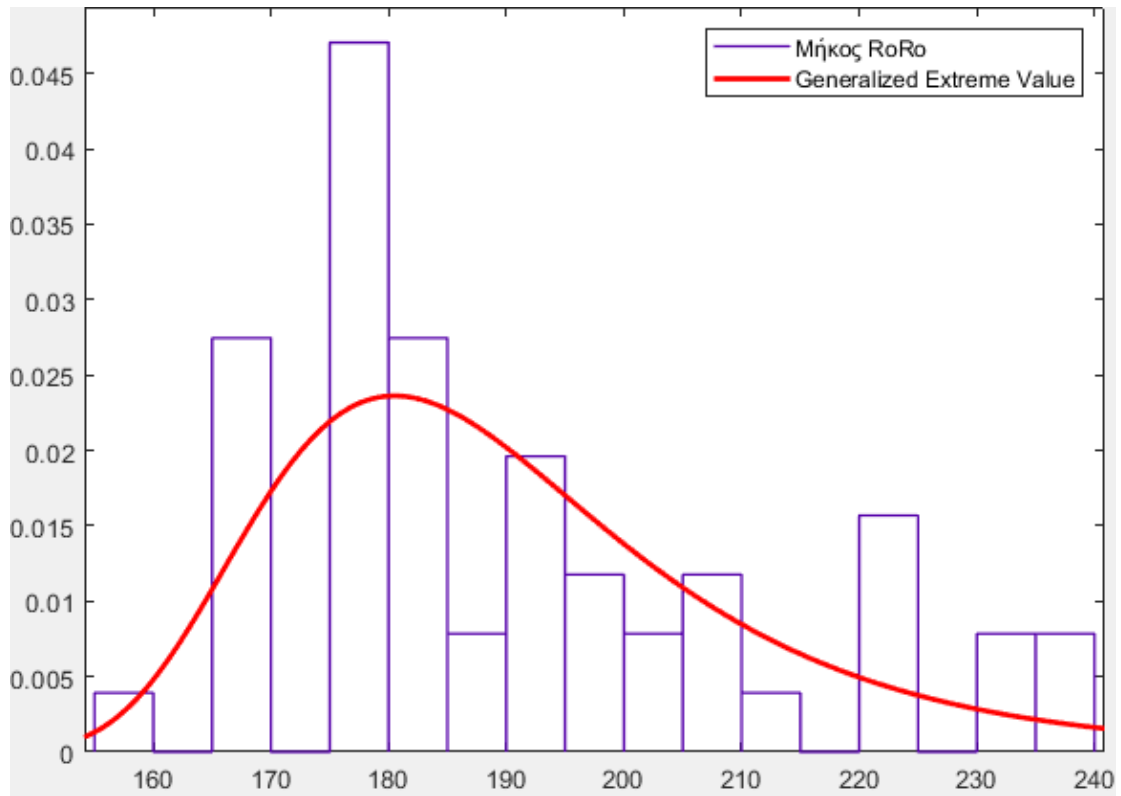
Σχήμα 4.10 Κατανομή Log - Logistic της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου Containership



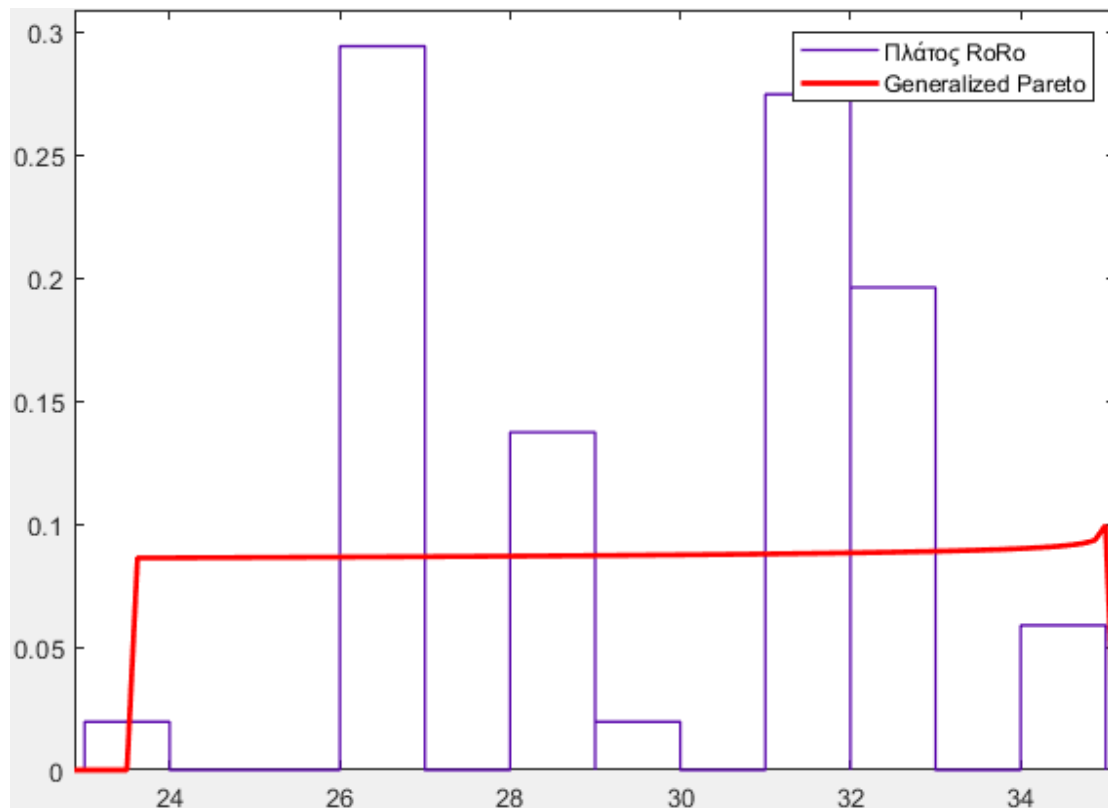
Σχήμα 4.11 Κατανομή Lognormal της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου General Cargo



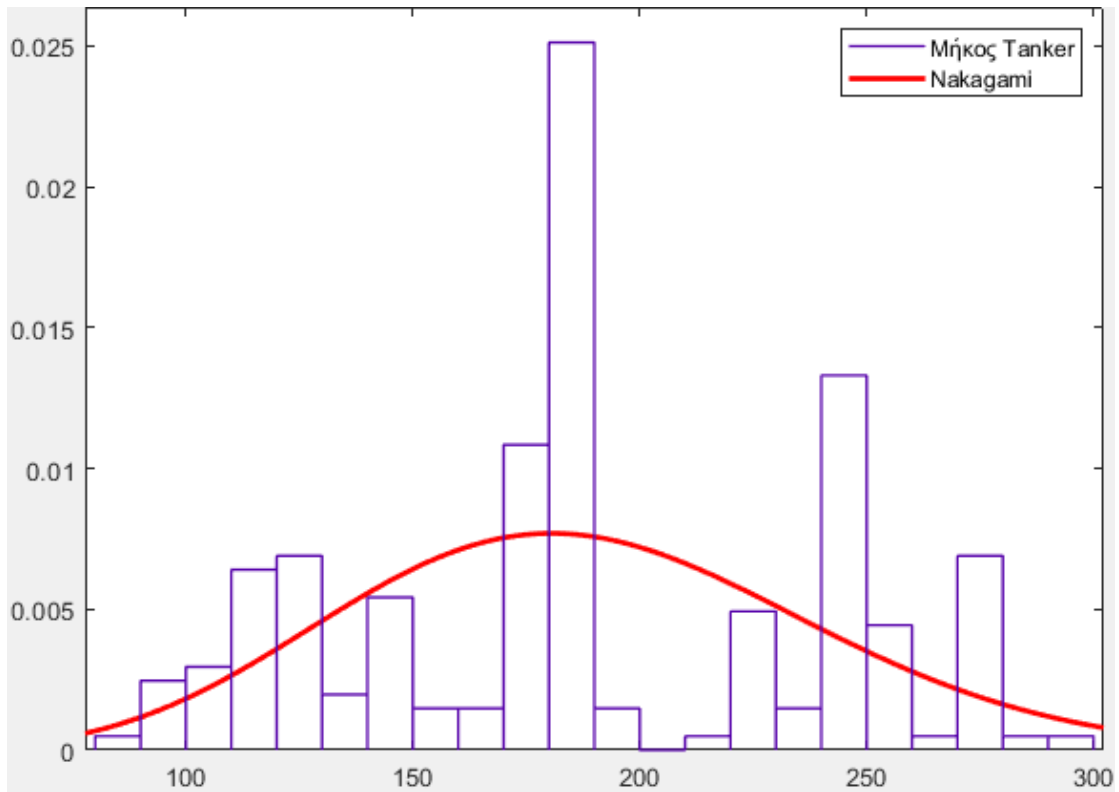
Σχήμα 4.12 Κατανομή Log - Logistic της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου General Cargo



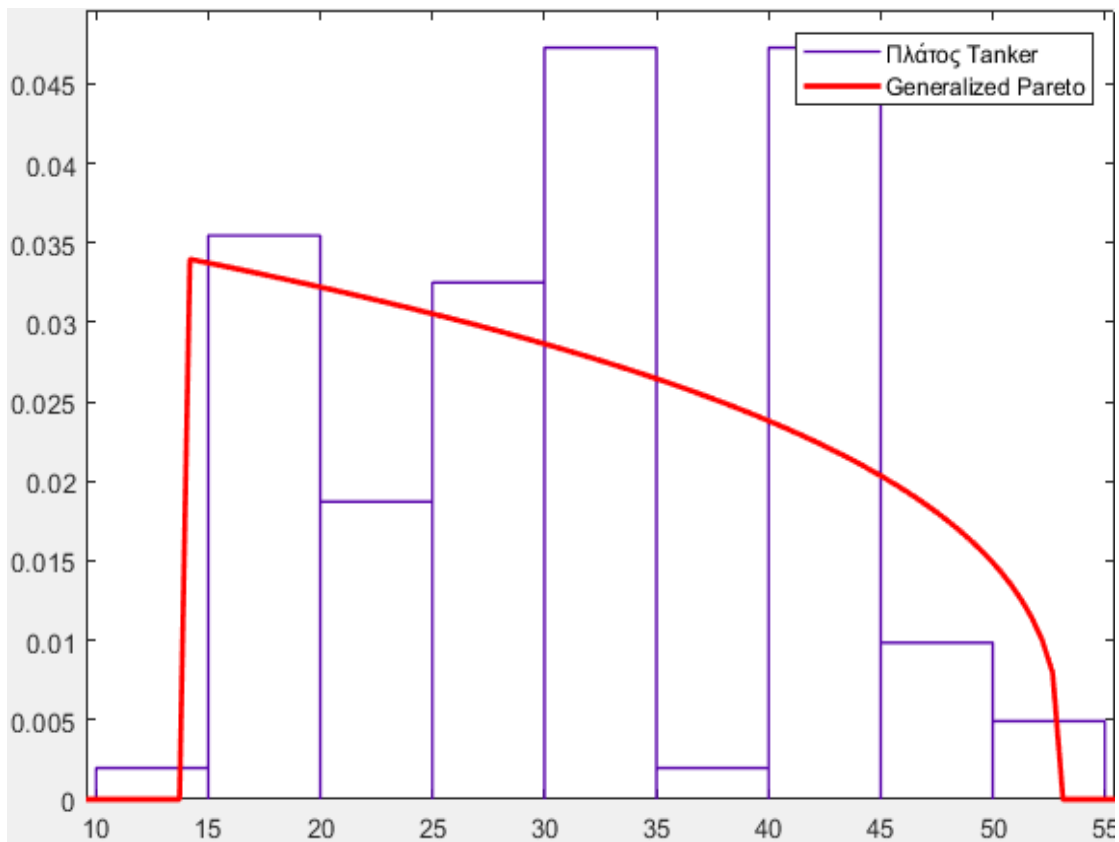
Σχήμα 4.13 Κατανομή Generalized Extreme Value της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου RoRo



Σχήμα 4.14 Κατανομή Generalized Pareto της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου RoRo



Σχήμα 4.15 Κατανομή Nakagami της βασικής διάστασης L (μήκος) πλοίων τύπου Tanker



Σχήμα 4.16: Κατανομή Generalized Pareto της βασικής διάστασης B (πλάτος) πλοίων τύπου Tanker

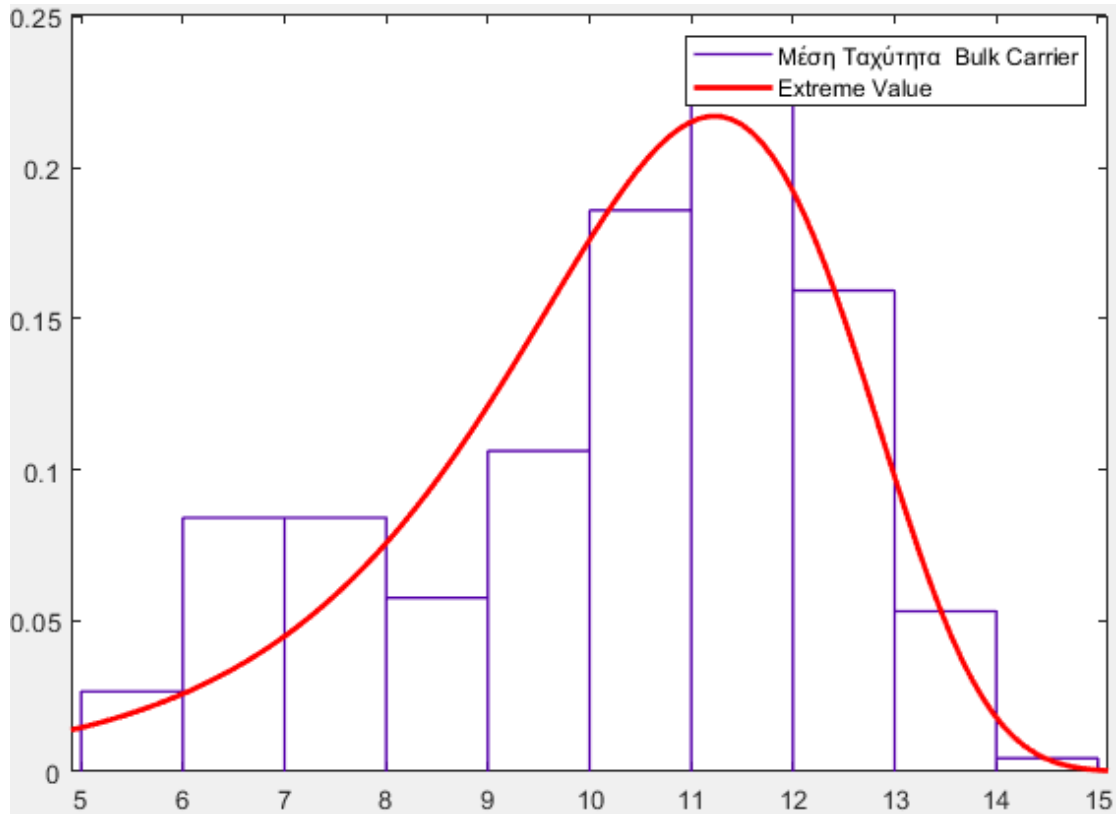
Πίνακας 4.4: Κατανομές διαστάσεων και παράμετροί τους

Τύπος/Υποκατηγορία	Διάσταση	Κατανομή	Παράμετροι	
Cargo/Bulk Carrier	Μήκος (L)	t Location - Scale	location	181.994
			scale	12.778
			degrees of freedom	1.701
Cargo/Bulk Carrier	Πλάτος (B)	Logistic	location	28.793
			scale	2.387
Cargo/Containership	Μήκος (L)	Birnbaum - Saunders	scale	188.12
			shape	0.311
Cargo/Containership	Πλάτος (B)	Log - Logistic	log location	3.319
			log scale	0.129
Cargo/General Cargo	Μήκος (L)	Lognormal	log location	4.727
			log scale	0.215
Cargo/General Cargo	Πλάτος (B)	Log - Logistic	log location	2.809
			log scale	0.112
Cargo/RoRo	Μήκος (L)	Generalized Extreme Value	shape	0.044
			scale	15.588
			location	181.171
Cargo/RoRo	Πλάτος (B)	Generalized Pareto	shape	-1.018
			scale	11.607
			threshold	23.6
Tanker	Μήκος (L)	Nakagami	shape	3.447
			scale	38131.9
Tanker	Πλάτος (B)	Generalized Pareto	shape	-0.754
			scale	29.410
			threshold	14.1

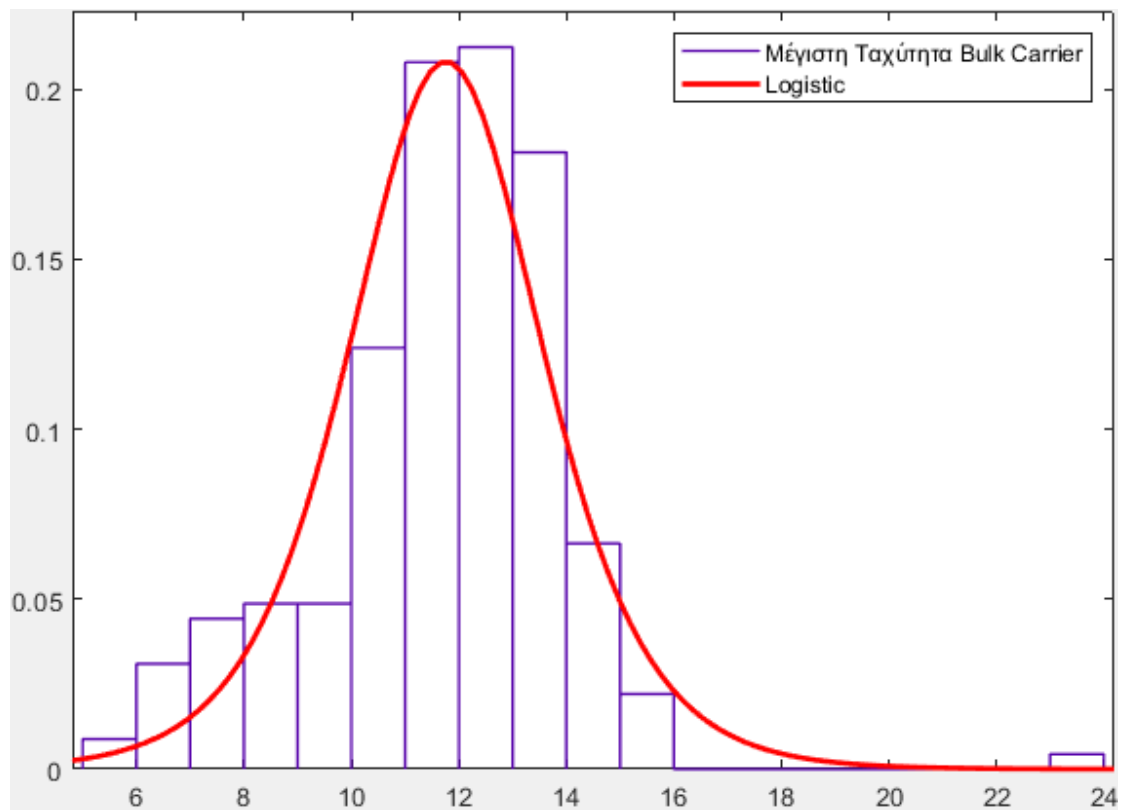
Προς αποφυγή παραγωγής μη ρεαλιστικών τιμών (υπερβολικά μικρών ή υπερβολικά μεγάλων), για κάθε μία υποκατηγορία τέθηκε ένα κατώτατο και ένα ανώτατο όριο βάσει των μέγιστων και των ελάχιστων διαστάσεων που προέκυψαν από τις πραγματικές παρατηρήσεις. Εάν μία παραγόμενη τιμή της εκάστοτε κατανομής δε βρίσκεται ενός του συγκεκριμένου διαστήματος, τότε ο αλγόριθμος την απορρίπτει και “γεννάει” μία καινούργια έως ότου ικανοποιηθεί ο περιορισμός. Ενδεικτικά, για τα πλοία bulk carrier το διάστημα περιορισμού του μήκους είναι το [100, 291.97] και το αντίστοιχο του πλάτους το [16.3, 46].

4.8 Κατανομή Μέσων και Μέγιστων Ταχυτήτων

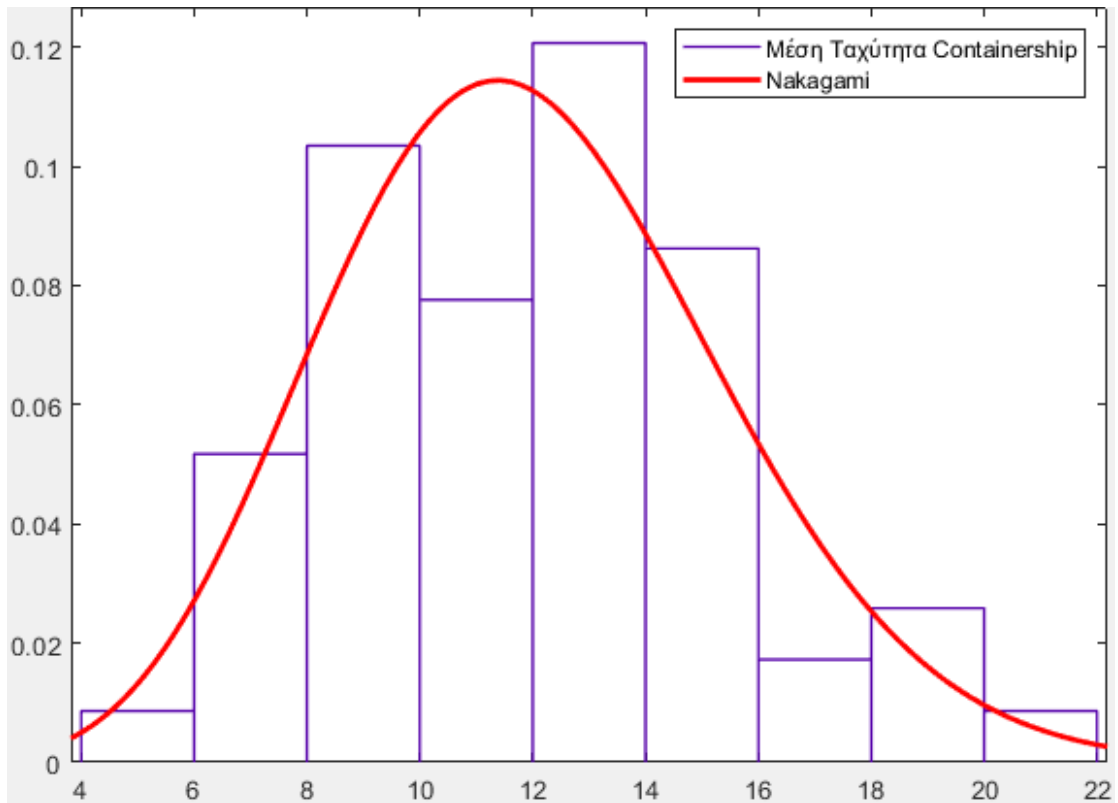
Στα Σχήματα 4.17 έως 4.26 απεικονίζονται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των κατανομών μέσω των οποίων προσεγγίστηκαν οι μέσες και μέγιστες ταχύτητες κάθε είδους πλοίου και προέκυψαν όπως ακριβώς και στην περίπτωση των διαστάσεων. Στον Πίνακα 4.5 συνοψίζονται οι κατανομές και οι βασικές τους παράμετροι. Ο κώδικας εκτελέστηκε μία φορά για τις μέσες και μία για τις μέγιστες ταχύτητες.



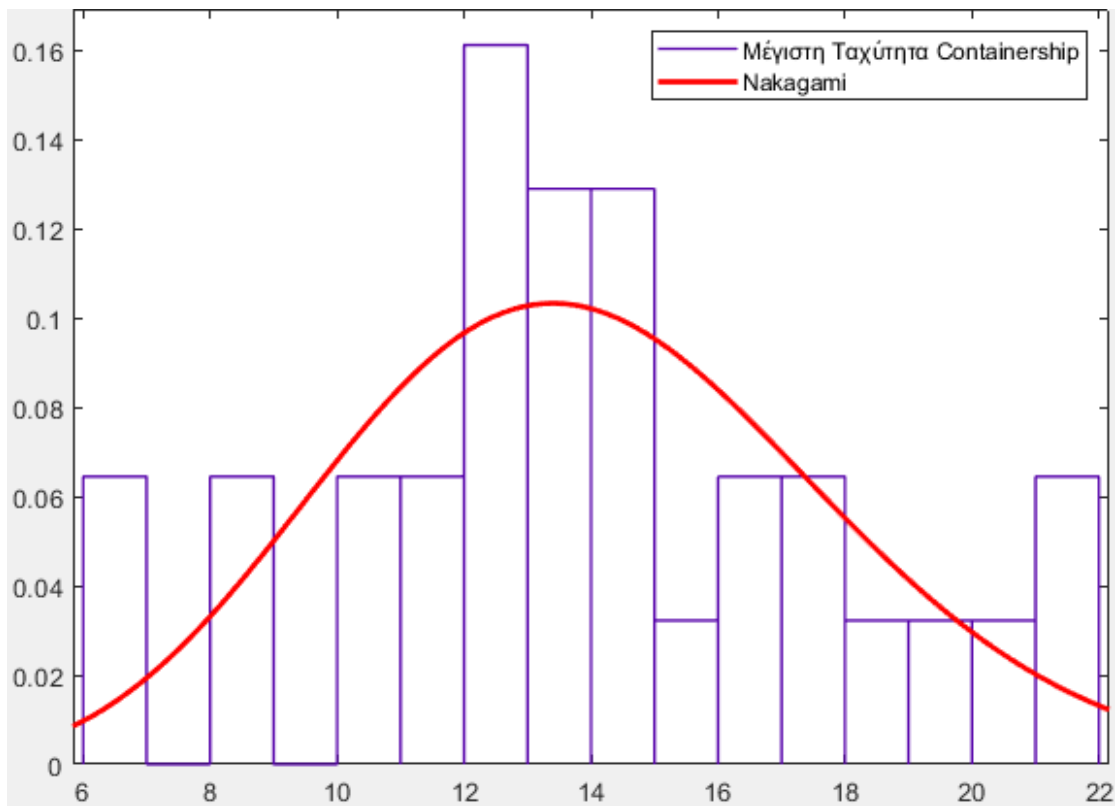
Σχήμα 4.17: Κατανομή Extreme Value της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου Bulk Carrier



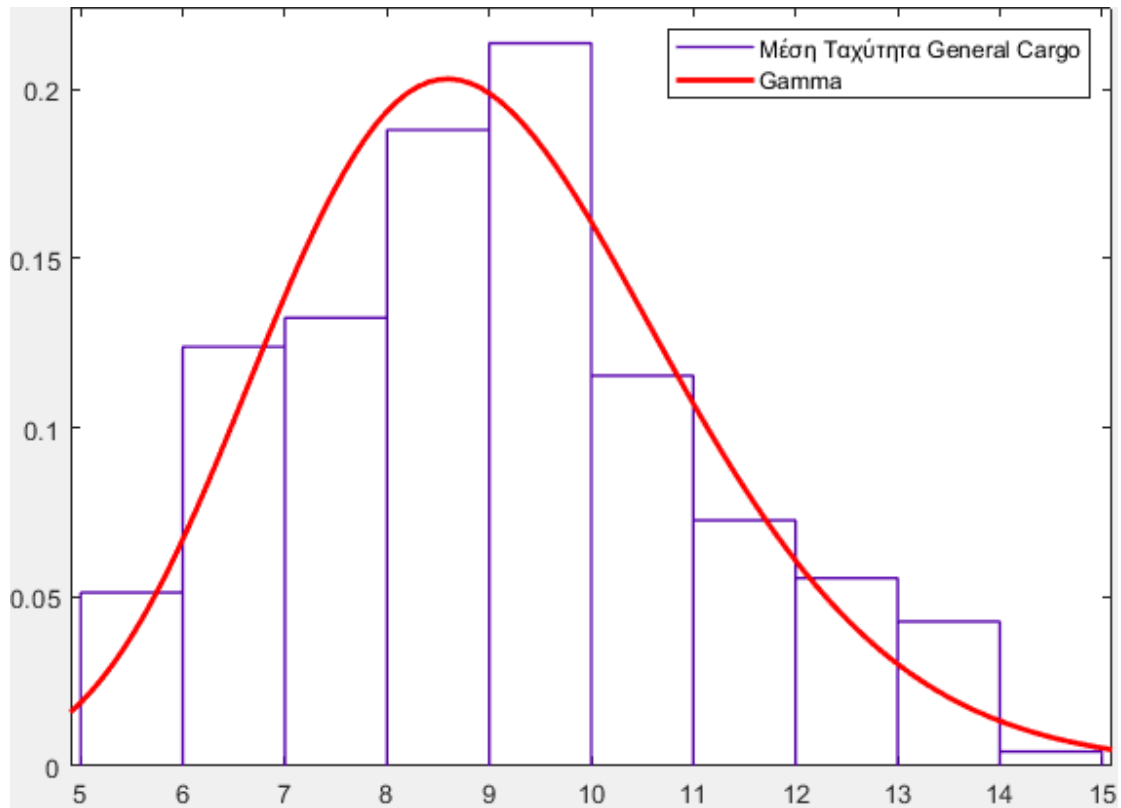
Σχήμα 4.18: Κατανομή Logistic της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου Bulk Carrier



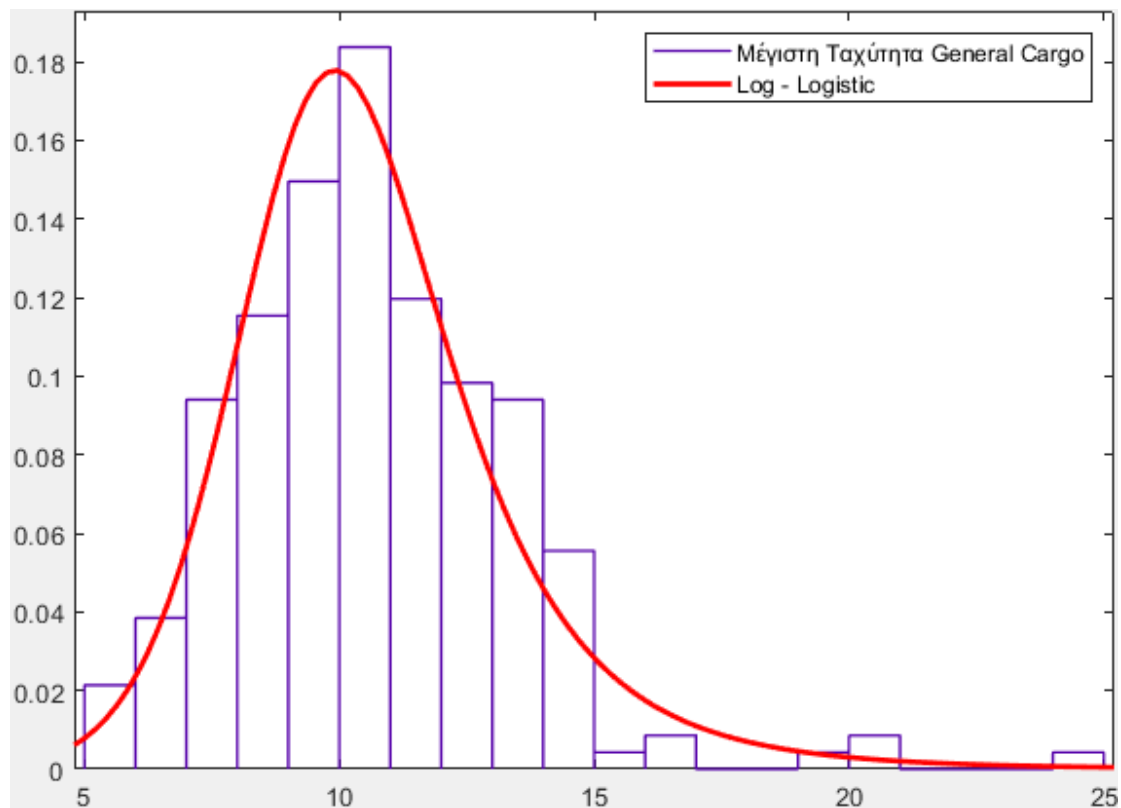
Σχήμα 4.19: Κατανομή Nakagami της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου Containership



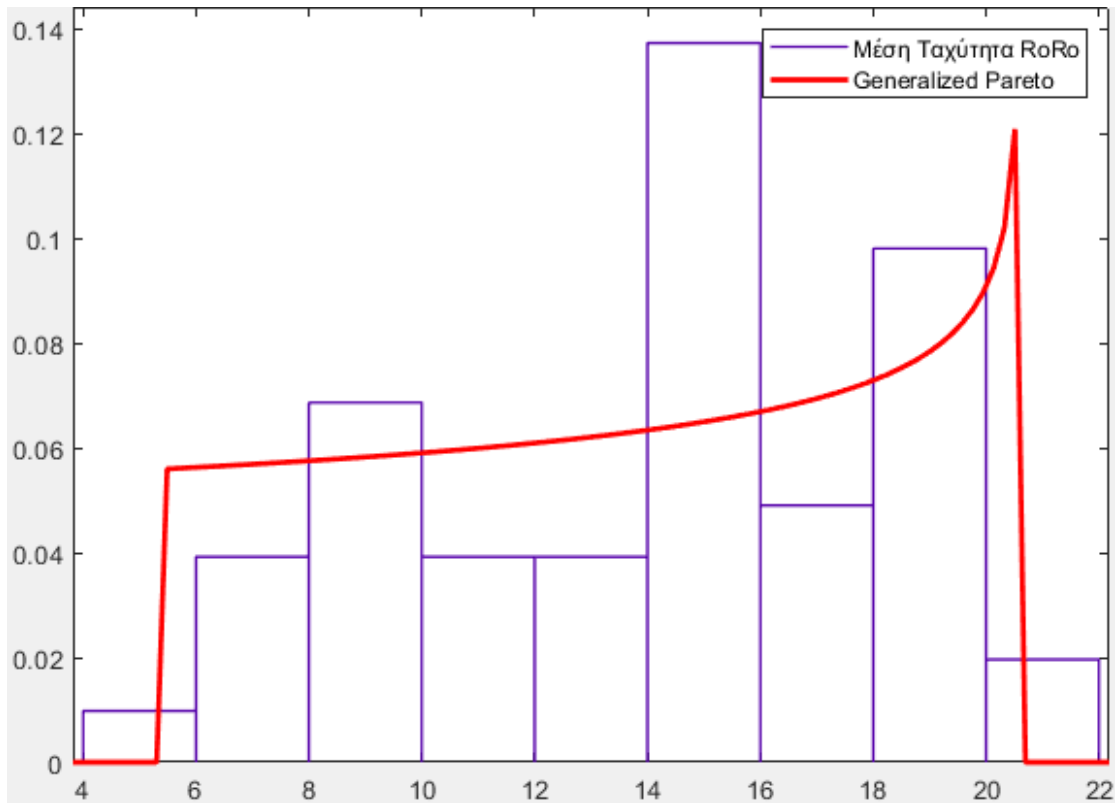
Σχήμα 4.20: Κατανομή Nakagami της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου Containership



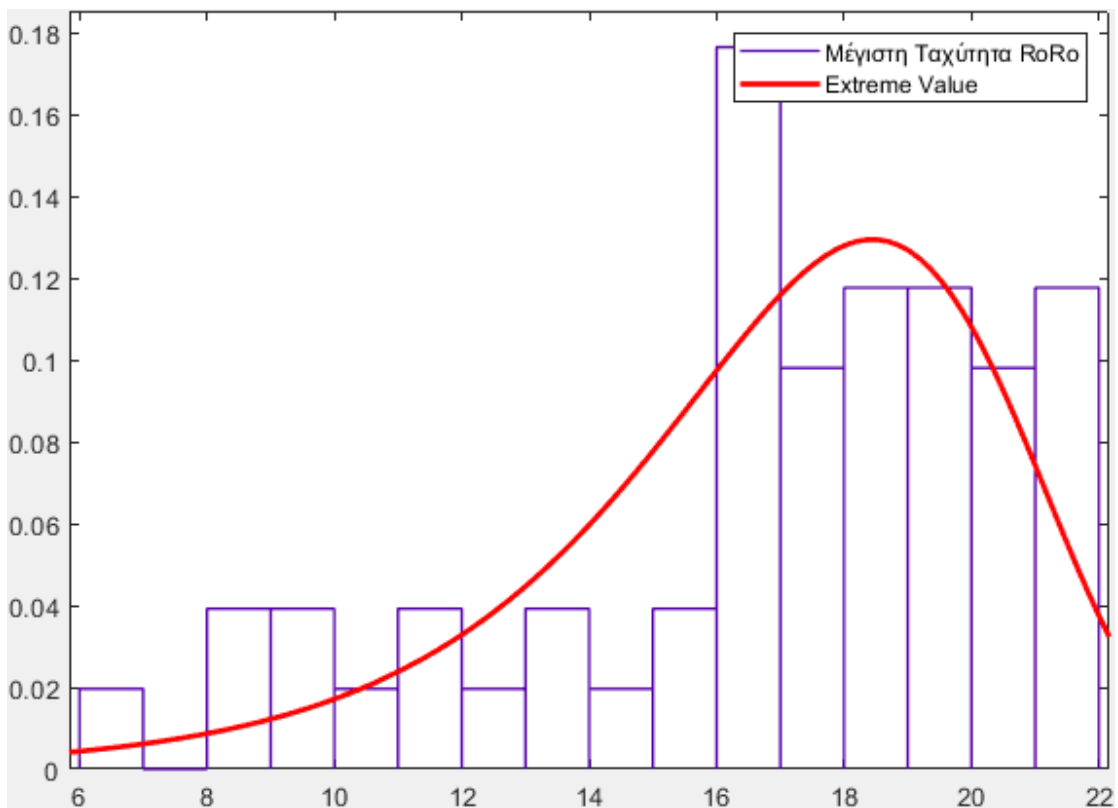
Σχήμα 4.21: Κατανομή Gamma της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου General Cargo



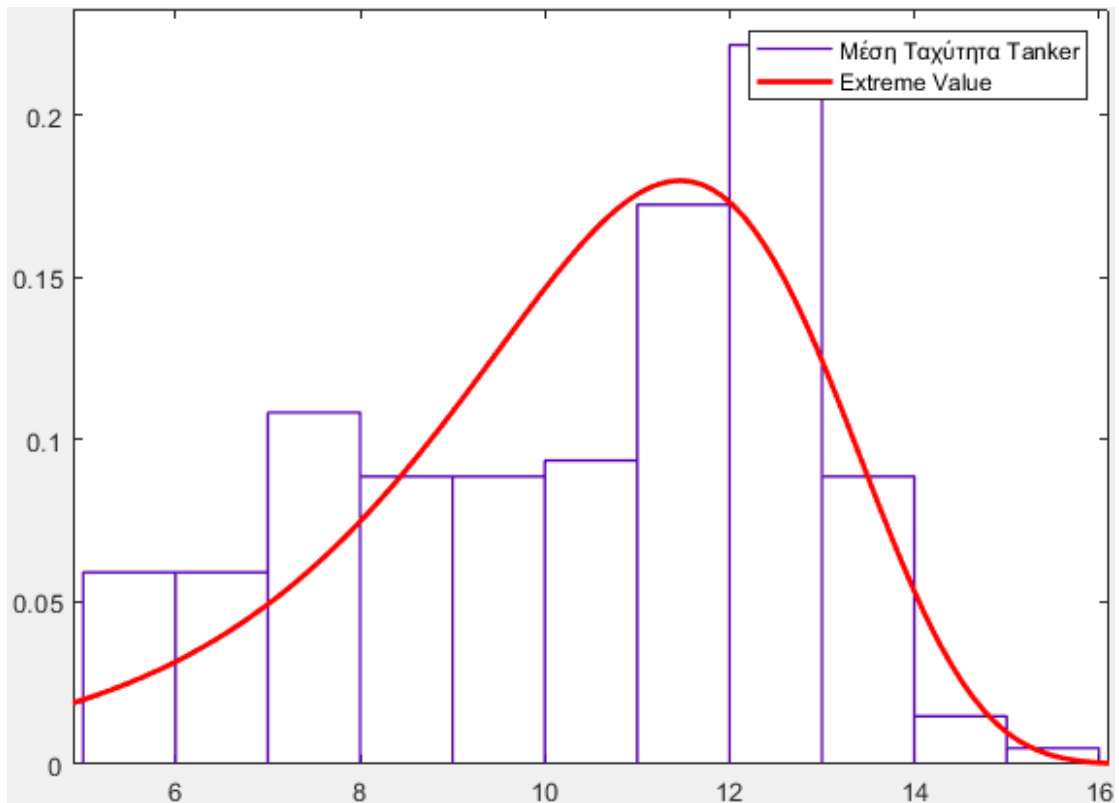
Σχήμα 4.22: Κατανομή Log - Logistic της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου General Cargo



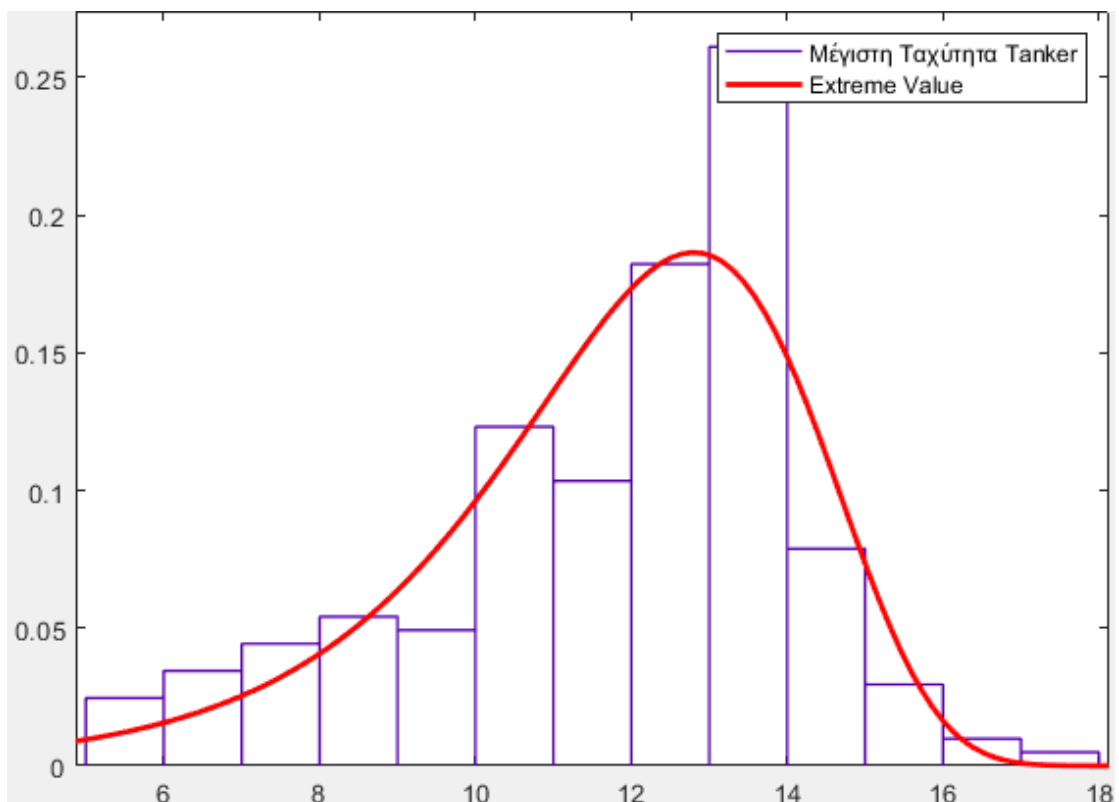
Σχήμα 4.23: Κατανομή Generalized Pareto της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου RoRo



Σχήμα 4.24: Κατανομή Extreme Value της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου RoRo



Σχήμα 4.25: Κατανομή Extreme Value της μέσης ταχύτητας $V_{average}$ πλοίων τύπου Tanker



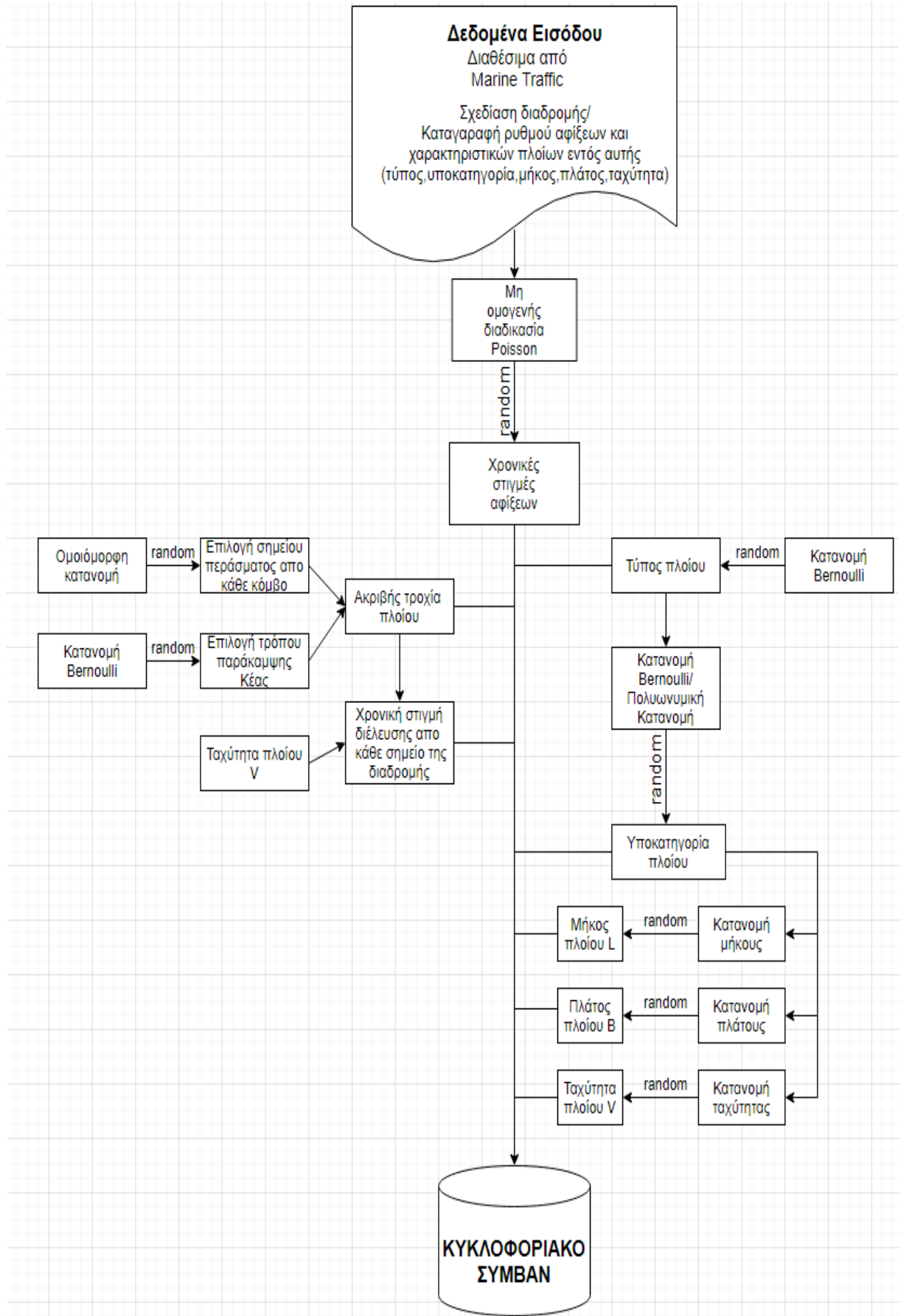
Σχήμα 4.26: Κατανομή Extreme Value της μέγιστης ταχύτητας V_{max} πλοίων τύπου Tanker

Πίνακας 4.5: Κατανομές ταχυτήτων και παράμετροί τους

Τύπος/Υποκατηγορία	Μέγεθος	Κατανομή	Παράμετροι	
Cargo/Bulk Carrier	Μέση Ταχύτητα ($V_{average}$)	Extreme Value	location	11.229
			scale	1.695
Cargo/Bulk Carrier	Μέγιστη Ταχύτητα (V_{max})	Logistic	location	11.76
			scale	1.201
Cargo/Containership	Μέση Ταχύτητα ($V_{average}$)	Nakagami	shape	3.080
			scale	154.638
Cargo/Containership	Μέγιστη Ταχύτητα (V_{max})	Nakagami	shape	3.431
			scale	210.237
Cargo/General Cargo	Μέση Ταχύτητα ($V_{average}$)	Gamma	shape	20.306
			scale	0.445
Cargo/General Cargo	Μέγιστη Ταχύτητα (V_{max})	Log - Logistic	log location	2.333
			log scale	0.139
Cargo/RoRo	Μέση Ταχύτητα ($V_{average}$)	Generalized Pareto	shape	-1.176
			scale	17.880
			threshold	5.5
Cargo/RoRo	Μέγιστη Ταχύτητα (V_{max})	Extreme Value	location	18.448
			scale	2.842
Tanker	Μέση Ταχύτητα ($V_{average}$)	Extreme Value	location	11.463
			scale	2.045
Tanker	Μέγιστη Ταχύτητα (V_{max})	Extreme Value	location	12.802
			scale	1.973

4.9 Δημιουργία Κυκλοφοριακού Συμβάντος

Το ολοκληρωμένο κυκλοφοριακό συμβάν, προκύπτει τελικά μέσω του συνδυασμού όλων των παραπάνω κατανομών, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.27. Για την τυχαία δειγματοληψία σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου στη βάση της μεθόδου Monte Carlo, αξιοποιείται η γεννήτρια τυχαίων αριθμών του Matlab.



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης της κυκλοφορίας

4.10 Επιλογή Κριτηρίου και Ανίχνευση Υποψηφιοτήτων Σύγκρουσης

Το κριτήριο υποψηφιότητας που επιλέγεται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αυτό της διαμέτρου σύγκρουσης (collision diameter) D_{ij} το οποίο επεξηγήθηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.4.1.1. Η προτίμηση σε αυτό ακολουθεί τις βιβλιογραφικές τάσεις, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί σε παρόμοιες δημοφιλείς προσεγγίσεις τύπου “τυφλής πλοήγησης” (Goerlandt and Kujala 2011). Δεδομένου του ότι στα πλαίσια του παρόντος μοντέλου τα πλοία δεν πραγματοποιούν καμία ενέργεια αποφυγής της σύγκρουσης, ένα κριτήριο φυσικής επαφής μεταξύ τους - όπως είναι η διάμετρος σύγκρουσης - φαντάζει καταλληλότερο καθώς αντικατοπτρίζει ακριβώς τον ορισμό της γεωμετρικής πιθανότητας N_A , δηλαδή του αριθμού του συγκρούσεων που θα συνέβαιναν εάν δε λάμβανε χώρα κανένας ελιγμός αποφυγής. Ταυτόχρονα συνυπολογίζονται και οι διαστάσεις του κάθε σκάφους γεγονός που προσδίδει στο μοντέλο έναν ρεαλιστικότερο χαρακτήρα. Αντίθετα το κριτήριο του μισού ναυτικού μιλίου (0.5 Nm.) των Fowler and Sorgrad (2000) το οποίο είχε εφαρμοστεί στη διπλωματική εργασία του Ράκα, οδηγεί σε υπερεκτίμηση του αριθμού των υποψήφιων ζευγαριών. Λιγότερο “αυστηρά” κριτήρια στα οποία καθορίζεται μία απόσταση (όπως αυτή των 0.5 Nm.) ή ένα σύνορο ασφαλείας όπως λόγω χάρη ο τομέας του πλοίου, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε μελέτες στις οποίες τα δεδομένα κυκλοφορίας του AIS λαμβάνονται αυτούσια και κατά συνέπεια συμπεριλαμβάνουν τους ελιγμούς αποφυγής που πραγματοποιούνται από τα πλοία, κάτι που δε συμβαίνει στη περίπτωση που μελετάται.

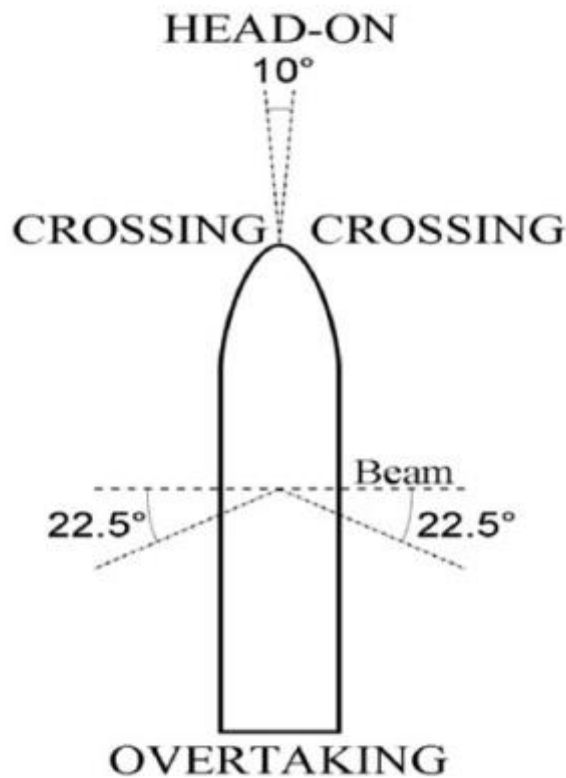
Η διαδικασία ανίχνευσης των υποψήφιων ζευγαριών, βασίζεται στην εύρεση της θέσης των πλοίων που βρίσκονται εντός της διαδρομής κάθε χρονική στιγμή, στον υπολογισμό της μεταξύ τους απόστασης ανα ζεύγος και στη σύγκριση της απόστασης αυτής με τη διάμετρο σύγκρουσης. Το χρονικό βήμα που επιλέγεται ισούται με $\Delta t = 3\text{min}$ (Goerlandt and Kujala, 2014). Ξεκινώντας λοιπόν από τη χρονική στιγμή $t = 0$ ο αλγόριθμος υπολογίζει τον αριθμό των πλοίων που κινούνται εντός της περιοχής μελέτης, αλλά και την ακριβή θέση του καθενός η οποία προκύπτει ως συνδυασμός της ταχύτητάς και της τροχιάς που έχουν τυχαία επιλεγεί για αυτό κατά την είσοδο του σε κάποια από τις πύλες 1-2 και 15-16, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 4.27. Έπειτα, ελέγχονται όλοι οι ανα δύο πιθανοί μεταξύ τους συνδυασμοί. Ο αριθμός των συνδυασμών που εξετάζονται δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

όπου:

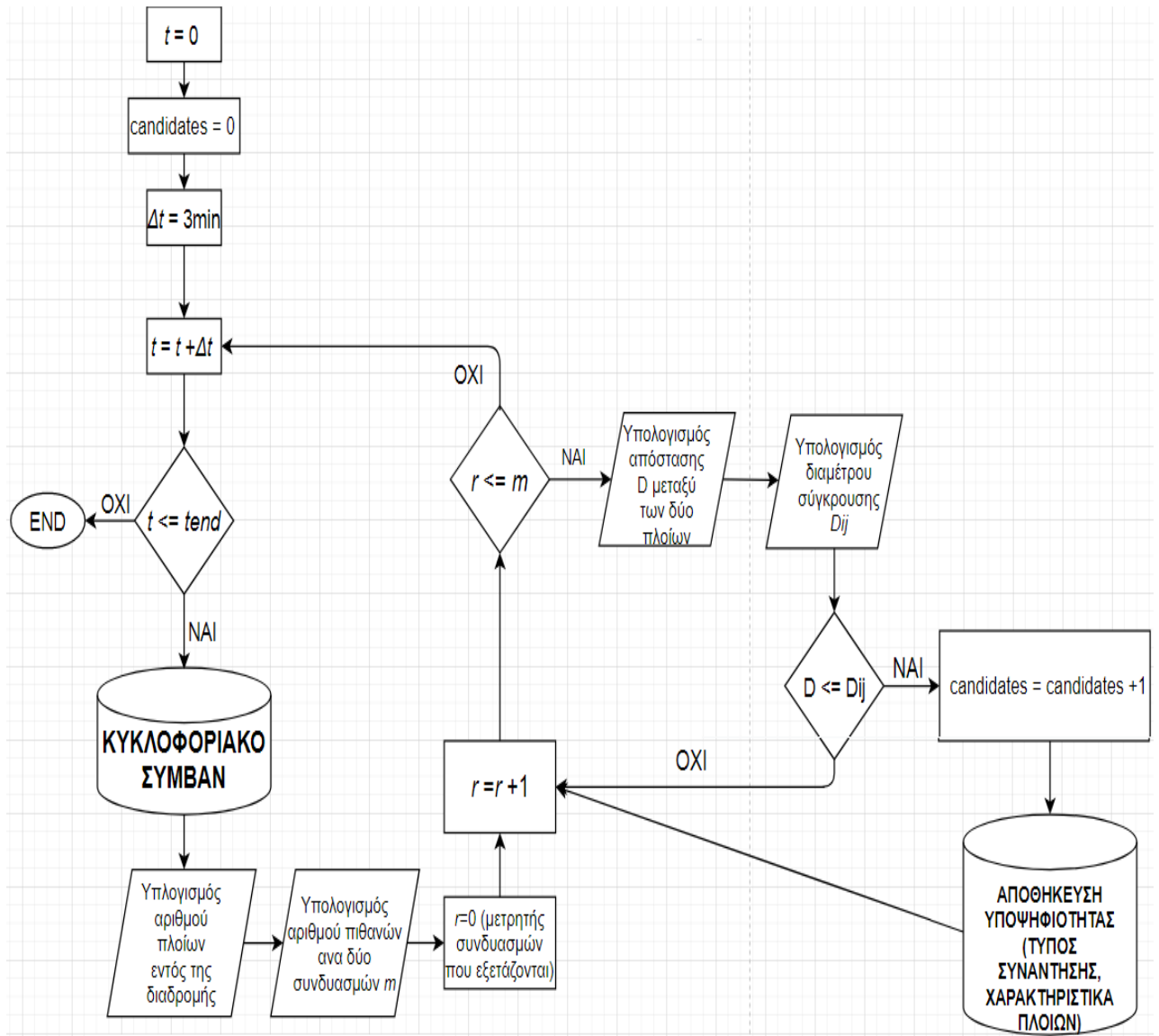
- $\binom{n}{k}$ το πλήθος των συνδυασμών n στοιχείων ανα k
- n το πλήθος των πλοίων που εντοπίζονται εντός της διαδρομής την εκάστοτε χρονική στιγμή
- $k = 2$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάμετρος σύγκρουσης κάθε ζεύγους, η οποία όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.4.1.1 αποτελεί συνάρτηση των διαστάσεων, της σχετικής ταχύτητας και της γωνίας συνάντησής τους. Εάν η απόσταση μεταξύ δύο πλοίων είναι μικρότερη από τη διάμετρο σύγκρουσής τους D_{ij} τότε το ζευγάρι θεωρείται υποψήφιο για σύγκρουση και ο αλγόριθμος αποθηκεύει τα χαρακτηριστικά τους καθώς και τον τύπο της συνάντησης. Στην Σχήμα 4.28 γίνεται εμφανής η διάκριση μεταξύ των τριών διαφορετικών τύπων συναντήσεων συναρτήσει της διαφοράς πορείας των εμπλεκόμενων πλοίων, σύμφωνα με τους κανονισμούς σύγκρουσης.



Σχήμα 4.28: Σχηματική απεικόνιση των τριών τύπων συναντήσεων σύμφωνα με τους COLREGs (Goerlandt and Kujala, 2011)

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου ολοκληρωθεί το διάστημα του ενός μήνα προσομοίωσης. Στο Σχήμα 4.29 παριστάνεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου ανίχνευσης υποψηφιοτήτων.



Σχήμα 4.29 : Αλγόριθμος ανίχνευσης υποψηφιοτήτων σύγκρουσης

4.11 Επιλογή Παράγοντα Αιτιώδους Συνάφειας P_c

Ο Ράκας στη διπλωματική του εργασία, είχε επισημάνει τα περιθώρια βελτίωσης στο κομμάτι της επιλογής του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας P_c ο οποίος πολλαπλασιάζεται με τον εξαγόμενο από τον αλγόριθμο αριθμό των υποψήφιων ζευγαριών, ώστε να προκύψει τελικά ο αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων. Οι Khaled and Kawamura (2014) τόνισαν ότι η πιθανότητα αυτή θα πρέπει να αντανakλά τις ιδιαιτερότητες της περιοχής που μελετάται στην εκάστοτε περίπτωση. Δυστυχώς δεν υφίσταται κάποια μελέτη η οποία να επεξεργάζεται τα τοπικά χαρακτηριστικά της περιοχής του Αιγαίου Πελάγους. Για αυτό το λόγο διεξήχθη μία βιβλιογραφική επισκόπηση των παραγόντων αιτιώδους συνάφειας που έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς από διάφορους μελετητές (βλ. Πίνακα 5.5) και οι οποίοι εφαρμόστηκαν κατάλληλα στα δεδομένα εξόδου του κώδικα. Όπως υπογράμμισαν οι Goerlandt and Kujala (2011) άλλωστε, είναι δόκιμη η εφαρμογή

τιμών οι οποίες έχουν αντληθεί από τη βιβλιογραφία. Η επιλογή των αντίστοιχων παραγόντων αναλύεται και στην Παράγραφο 5.3.

Γενικά πάντως για την επιλογή της κατάλληλης αιτιώδους πιθανότητας χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψιν αρκετοί παράμετροι όπως οι καιρικές συνθήκες, οι τύποι των εμπλεκόμενων πλοίων, η επικοινωνία κ.α. (Kujala et al., 2009).

4.12 Σύνοψη μοντέλου και ανάπτυξη κώδικα Matlab

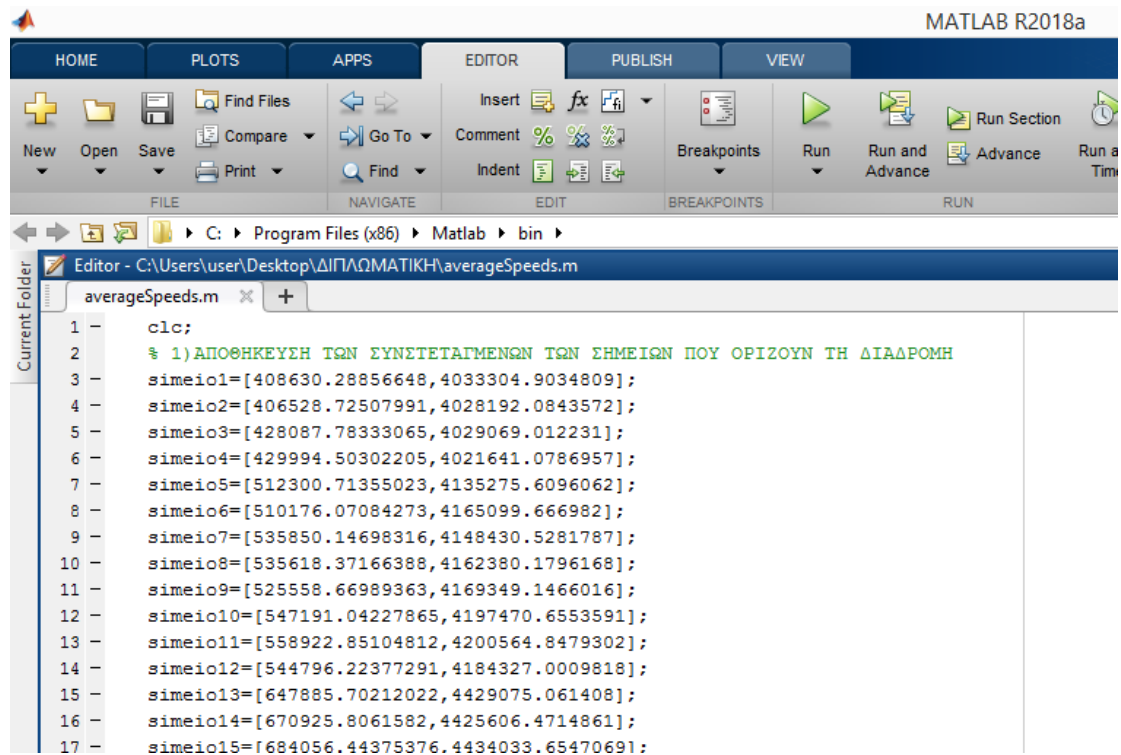
Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα στοιχεία του μοντέλου σύγκρουσης όπως αυτά αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, προκειμένου ο χαρακτήρας του να καταστεί πλήρως αντιληπτός.

Πίνακας 4.6: Σύνοψη χαρακτηριστικών στοιχείων και ταυτότητας μοντέλου σύγκρουσης

Σκοπός μοντέλου	Εκτίμηση ετήσιου αναμενόμενου αριθμού συγκρούσεων
Περιοχή μελέτης	Αιγαίο Πέλαγος (Στενό Ελαφονήσου – Στενό Δαρδανελίων)
Δεδομένα εισόδου	Marine Traffic (Ιούλιος 2019)
Μέθοδος επεξεργασίας δεδομένων	Προσαρμογή μαθηματικών κατανομών/Στατιστικοί έλεγχοι
Είδος και προσέγγιση μοντέλου	Γεωμετρικό μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης της κυκλοφορίας
Κριτήριο υποψηφιότητας	Διάμετρος σύγκρουσης D_{ij}
Χρονικό μεσοδιάστημα ελέγχου θέσεων πλοίων	3 λεπτά
Χρονικό διάστημα προσομοίωσης	1 μήνας
Πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας P_C	Βιβλιογραφικές πηγές
Παραδοχές	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1) Τα πλοία δεν πραγματοποιούν κανέναν ελιγμό αποφυγής στα πλαίσια της έννοιας της “τυφλής πλοήγησης” (blind navigation) ▪ 2) Τα πλοία κινούνται με σταθερή ταχύτητα καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας τους εντός της διαδρομής ▪ 3) Τα μεταβατικά φαινόμενα σε κάθε κόμβο διέλευσης αγνοούνται και τα πλοία θεωρείται ότι στρίβουν ακαριαία ▪ 4) Δεν λαμβάνονται υπ' όψιν οι μετεωρολογικές συνθήκες και η κατάσταση της θάλασσας ▪ 5) Τα πλοία κινούνται ευθύγραμμα από κόμβο σε κόμβο ▪ 6) Δεν ελήφθησαν υπ' όψιν αλληλεπιδράσεις με άλλες διαδρομές, καθώς και αγκυροβολημένα πλοία μηδενικής ή πολύ μικρής ταχύτητας

Γλώσσα ανάπτυξης και εκτέλεσης του κώδικα	Matlab
Διαφορετικά σενάρια κώδικα	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Εκτέλεση για τις κατανομές μέσω των ταχυτήτων ▪ Εκτέλεση για τις κατανομές μέγιστων ταχυτήτων
Επαναλήψεις κάθε σεναρίου	50

Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MatlabR2018a σε έναν κώδικα 972 γραμμών (βλ. Σχήμα 4.30).



Σχήμα 4.30: Ανάπτυξη κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

5.1 Κεντρικό Οριακό Θεώρημα και Διάστημα Εμπιστοσύνης των Δεδομένων Εξόδου

Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (Central Limit Theorem), αν από έναν πληθυσμό που ακολουθεί οποιαδήποτε κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 επιλεγούν τυχαία δείγματα μεγέθους n , τότε για μεγάλα n (συνήθως για $n \geq 30$) οι δειγματικοί μέσοι ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή επίσης μ και διασπορά σ^2/n . Όσο πιο μεγάλο είναι το μέγεθος n των δειγμάτων, τόσο καλύτερη (ακριβέστερη) είναι η προσέγγιση της κατανομής των δειγματικών μέσων από την κανονική κατανομή (Kwak and Kim, 2017).

Συνεπώς κάθε σενάριο κώδικα χρειάστηκε να επαναληφθεί τουλάχιστον 30 φορές, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο δειγματικός μέσος $\bar{X}(n)$ των εξαγόμενων αποτελεσμάτων θα προέρχεται από την κανονική κατανομή με μέση τιμή την άγνωστη μέση τιμή του πληθυσμού μ και διακύμανση $\sigma^2(n)/n$ όπου $\sigma^2(n)$ η διακύμανση του δείγματος εφόσον αυτή του πληθυσμού είναι άγνωστη και n το μέγεθος του δείγματος. Επομένως για ένα ζητούμενη διάστημα εμπιστοσύνης 95% θα ισχύει:

$$Z_{97,5\%} \leq \frac{\mu - \bar{X}(n)}{\sqrt{\frac{\sigma^2(n)}{n}}} \leq Z_{97,5\%}$$

άρα για τη μέση τιμή μ ισχύει:

$$\bar{X}(n) - Z_{97,5\%} \sqrt{\frac{\sigma^2(n)}{n}} \leq \mu \leq \bar{X}(n) + Z_{97,5\%} \sqrt{\frac{\sigma^2(n)}{n}}$$

όπου $Z_{97,5\%} = 1.96$ (από πίνακες κανονικής κατανομής)

Για ένα επίπεδο εμπιστοσύνης 95% λοιπόν, η μέση τιμή θα ανήκει στο διάστημα

$$\left[\bar{X}(n) - 1.96 \sqrt{\frac{\sigma^2(n)}{n}}, \bar{X}(n) + 1.96 \sqrt{\frac{\sigma^2(n)}{n}} \right]$$

5.2 Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Κάθε σενάριο κώδικα (μέσων και μέγιστων ταχυτήτων) εκτελέστηκε 50 φορές. Ο αριθμός των αναμενόμενων συγκρούσεων προέκυψε πολλαπλασιάζοντας τα υποψήφια ζευγάρια κάθε τύπου συνάντησης με την αντίστοιχη πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας ως εξής:

$$N_{coll} = N_{A_headon} \times P_{C_headon} + N_{A_crossing} \times P_{C_crossing} + N_{A_overtaking} \times P_{C_overtaking}$$

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.1 έως 5.7.

Πίνακας 5.1: Μέσος αριθμός υποψηφίων συγκρούσεων N_A κώδικα μέσω ταχυτήτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το μοντέλο του Ράκα

Χρονικό Διάστημα		Crossing Candidates	Head – on Candidates	Overtaking Candidates	Total Candidates
31 ημέρες (διάστημα προσομοίωσης)		3.98	7.28	68.36	79.62
		± 0.5779	± 0.8135	± 6.2212	± 6.3542
1 έτος (με αναγωγή των αποτελεσμάτων)	Μοντέλο Ράκα	0.39	7.7	941.56	949.65
		± 0.0067	± 0.1717	± 41.2723	± 42.533
	Προτεινόμενο Μοντέλο	46.86	85.72	804.88	937.46
		± 6.8041	± 9.5786	± 73.25	± 74.8154

Ο συνολικός αριθμός των υποψηφιοτήτων είναι πολύ κοντά σε αυτόν του Ράκα. Παρατηρείται βέβαια μία μεγάλη αύξηση στις συναντήσεις τύπου crossing και head – on και μία μείωση στις overtaking. Αυτό εξηγείται εν πολλοίς από το γεγονός ότι ο Ράκας είχε ορίσει 10 συγκεκριμένα πιθανά σημεία διέλευσης των πλοίων από κάθε κόμβο, τη στιγμή που στο παρόν μοντέλο ο κώδικας μπορεί να επιλέξει μέσω ομοιόμορφης κατανομής “οποιοδήποτε” σημείο περάσματος πάνω στις ευθείες που τους ορίζουν (βλ. Παράγραφο 4.4). Επομένως οι συνδυασμοί των πιθανών διαδρομών αυξάνονται και περιπλέκονται κατά πολύ, με αποτέλεσμα να προκύπτουν περισσότερες υποψηφιοτήτες διασταυρούμενου τύπου. Εξ’άλλου ο αριθμός των 0.39 ετήσιων crossing συναντήσεων του Ράκα φαντάζει υπερβολικά μικρός. Το μεγάλο ποσοστό των υποψηφιοτήτων προσπέρασης (overtaking) έρχεται ως αποτέλεσμα του σχεδιασμού της διαδρομής (βλ. Παράγραφο 4.3) η οποία αποτελείται από επιμέρους μεγάλα ευθεία τμήματα. Έτσι δικαιολογείται και η σημαντική άνοδος των head – on ζευγαριών (85.71 έναντι 7.7 του Ράκα, αριθμός που είναι επίσης αρκετά μικρός).

Πίνακας 5.2: Εμπλεκόμενοι τύποι πλοίων στις υποψήφιες συναντήσεις (κώδικας μέσων ταχυτήτων)

Χρονικό Διάστημα	At least one Bulk Carrier involved	At least one Containership involved	At least one General Cargo involved	At least one RoRo involved	At least one Oil Tanker Involved	At least one Gas Carrier Involved
31 ημέρες (διάστημα προσομοίωσης)	42.66	5.44	30.8	17.78	35.42	2.52
	± 4.3614	± 1.5460	± 3.08	± 2.0517	± 4.1974	± 0.9017
1 έτος (με αναγωγή των αποτελεσμάτων)	502.28	64.05	362.64	209.34	417.04	29.67
	± 51.3519	± 18.2030	± 36.2645	± 24.1570	± 49.4212	± 10.6162

Πίνακας 5.3: Μέσος αριθμός υποψήφιων συγκρούσεων N_A κώδικα μέγιστων ταχυτήτων και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το μοντέλο του Ράκα

Χρονικό Διάστημα		Crossing Candidates	Head - on Candidates	Overtaking Candidates	Total Candidates
31 ημέρες (διάστημα προσομοίωσης)		3.75	6.35	55.55	65.65
		± 0.9091	± 0.9354	± 8.9452	± 5.5332
1 έτος (με αναγωγή των αποτελεσμάτων)	Μοντέλο Ράκα	0.39	7.7	941.56	949.65
		± 0.0067	± 0.1717	± 41.2723	± 42.533
	Προτεινόμενο Μοντέλο	44.15	74.76	654.06	772.97
		± 10.4328	± 10.7347	± 102.6553	± 100.4368

Ο μειωμένος αριθμός των υποψήφιων ζευγαριών που προέκυψε μετά την εκτέλεση του κώδικα των μέγιστων ταχυτήτων (Πίνακας 5.3) είναι πιθανό να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες. Αρχικά έχει χρησιμοποιηθεί ένα πιο “αυστηρό” κριτήριο σε σχέση με του Ράκα (διάμετρος σύγκρουσης έναντι του μισού ναυτικού μιλίου). Πέραν τούτου, η αύξηση των ταχυτήτων με ταυτόχρονη διατήρηση του ίδιου ρυθμού αφίξεων και δεδομένου του καθεστώτος τυφλής πλοήγησης αλλά και της διατήρησης της ίδιας ταχύτητας από τα σκάφη, συνεπάγεται μικρότερο αριθμό πλοίων ταυτόχρονα εντός της διαδρομής (καθώς τη διασχίζουν γρηγορότερα) και άρα μειωμένη πιθανότητα επικίνδυνων συναντήσεων. Φυσικά παίζουν ρόλο και άλλες παράμετροι όπως η επίδραση της ταχύτητας στην τιμή της διαμέτρου σύγκρουσης η οποία δεν είναι ξεκάθαρη καθώς στην εξίσωσή της εμπλέκεται και το ημίτονο της γωνίας συνάντησης. Στην περίπτωση που στο μοντέλο περικλείονταν και οι πρότυποι ελιγμοί των πλοίων, τότε η επίδραση της αύξησης των ταχυτήτων στην τιμή της γεωμετρικής πιθανότητας N_A θα ήταν πιθανότατα διαφορετική. Η λογική

συμπεριφορά του κώδικα πάντως στις μεταβολές των δεδομένων εισόδου του μπορεί να εκληφθεί ως ικανοποιητική.

Πίνακας 5.4: Εμπλεκόμενοι τύποι πλοίων στις υποψήφιες συναντήσεις (κώδικας μέγιστων ταχυτήτων)

Χρονικό Διάστημα	At least one Bulk Carrier involved	At least one Containership involved	At least one General Cargo involved	At least one RoRo involved	At least one Oil Tanker Involved	At least one Gas Carrier Involved
31 ημέρες (διάστημα προσομοίωσης)	36.7 ± 6.0580	1.65 ± 1.3360	25.35 ± 5.4263	10.7 ± 2.7244	33.2 ± 6.2897	2.525 ± 0.9419
1 έτος (με αναγωγή των αποτελεσμάτων)	432.11 ± 71.3281	19.42 ± 15.73	298.47 ± 63.8899	125.98 ± 32.077	390.90 ± 74.0562	26.49 ± 11.0897

Τα bulk carriers και τα oil tankers παρατηρείται ότι είναι τα πλοία που συμμετείχαν στις περισσότερες υποψηφιότητες σύγκρουσης και για τα δύο σενάρια κώδικα. Αυτό εξηγείται σε μεγάλο βαθμό από το γεγονός ότι οι συγκεκριμένες υποκατηγορίες αντιπροσωπεύουν μεγάλο ποσοστό του τοπικού στόλου (βλ. Πίνακας 4.3). Αντίστοιχα, τα Containership και τα Gas Carrier ενεπλάκησαν στις λιγότερες επικίνδυνες συναντήσεις ως τύποι πλοίων που συναντώνται σπανιότερα στο χώρο του Αιγαίου Πελάγους.

Πίνακας 5.5: Πιθανότητες αιτιώδους συνάφειας P_c που έχουνε προταθεί και εφαρμοστεί από διαφορετικούς μελετητές ανά τον κόσμο

Proposed Causation Factor P_c	Θαλάσσιες Περιοχές στις οποίες έχει εφαρμοστεί	P_c Head-on	P_c Crossing	P_c Overtaking
Fuji and Mizuki (1998); Christian and Kang (2017); Cucinotta et al. (2017) κ.α.	Ιαπωνικά Στενά, Νοτιοκορεάτικες Ακτές, Στενό της Μεσσήνης (Ιταλία)	4.9E-05	1.23E -04	1.1E -04
Otto et al. (2002); Kujala et al. (2009); Montewka et al. (2010); Weng et al. (2012); Silveira et al. (2013); Weng et al. (2020) κ.α.	Νότια Ισπανία -Κανάρια Νησιά/ Κόλπος Φινλανδίας/ Κόλπος Σιγκαπούρης/ Πορτογαλικές ακτές/ Ποταμός Γιανγκτσέ	4.9E-05	1.3E -04	4.9E -05
Pedersen (1995); Hänninen and Ylitalo (2010); Rakas (2015) κ.α	Κόλπος της Φινλανδίας, Αιγαίο Πέλαγος	1.01E-05	2.56E -04	5.62E -05

Μετά από εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές ομάδες τιμών για την αιτιώδη πιθανότητα P_c , κοινώς αποδεκτές μεταξύ των ερευνητών (βλ. Πίνακας 5.5). Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Fuji and Mizuki (1998) η πιθανότητα αποτυχίας αποφυγής μίας σύγκρουσης σε μία επικίνδυνη κατάσταση ισούται με 4.90×10^{-5} για μετωπικές (head – on), 1.23×10^{-4} για διασταυρούμενες (crossing) και 1.1×10^{-4} για συναντήσεις προσπέρασης (overtaking), ενώ μία άλλη μεγάλη ομάδα μελετητών (Otto et al., 2002, Kujala et al., 2009 κ.α.) έχει υιοθετήσει την τιμή 4.90×10^{-5} για τις παράλληλες (head – on, overtaking) και την 1.3×10^{-4} για της διασταυρούμενες συναντήσεις. Τέλος, εφαρμόστηκαν και οι τιμές κατά Pedersen (1995) που είχαν επιλεγεί από τον Ράκα στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας προκειμένου να καταστεί δυνατή η άμεση σύγκριση με τα αποτελέσματα που ο ίδιος εξήγαγε.

Πίνακας 5.6: Ετήσιος αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων κώδικα μέσων ταχυτήτων, μετά από εφαρμογή των αντίστοιχων πιθανοτήτων αιτιώδους συνάφειας επί των τιμών του Πίνακα 5.1

Selected Causation Factor P_c		Head – on Collisions	Crossing Collisions	Overtaking Collisions	Total Annual Number of Expected Collisions	No. of Years Between Collisions
Fuji and Mizuki (1998); Christian and Kang (2017); Cucinotta et al. (2017) κ.α.		0.0043	0.0057	0.0885	0.0985	10.15
		± 4.6935E - 04	± 8.3691E - 04	± 8.1E - 03	± 8.2E - 03	
Otto et al. (2002); Kujala et al. (2009); Montewka et al. (2010); Weng et al. (2012); Silveira et al. (2013); Weng et al. (2020) κ.α.		0.0043	0.006	0.0394	0.0497	20.12
		± 4.6935E - 04	± 8.8454E - 04	± 3.6E - 03	± 3.9E - 03	
Pedersen (1995); Hänninen and Ylitalo (2010), Rakas (2015) κ.α.	Μοντέλο Ράκα	0.0000998	0.0000778	0.0529	0.0531	18.82
		± 1.73E - 06	± 1.73E - 06	± 2.32E - 03	± 2.32E - 03	
	Προτεινόμενο Μοντέλο	0.0008	0.012	0.0452	0.058	17.24
		± 9.6744E - 05	± 1.7E - 03	± 4.1E - 03	± 4.8E - 03	

Ο Andritsopoulos (2011) είχε διεξάγει μία στατιστική ανάλυση των ατυχημάτων σε τρεις διαφορετικές ζώνες του Αιγαίου Πελάγους για τη χρονική περίοδο 1999-2009. Στη Ζώνη 2 (Αδριατική – Δαρδανέλια) – το μεγαλύτερο κομμάτι της οποίας ταυτίζεται με την υπο μελέτη περιοχή – καταγράφηκαν 21 ατυχήματα

μέσα σε αυτό το διάστημα των 11 ετών, 6% εκ των οποίων προήλθαν από σύγκρουση. Κάτι τέτοιο ισοδυναμεί με 0,1145 συγκρούσεις ανα έτος. Τα αποτελέσματα (βλ. Πίνακας 5.6) που προέκυψαν μετά την εφαρμογή των δύο επιλεγμένων παραγόντων αιτιώδους συνάφειας ($0.0985 \pm 8.2E - 03$ και $0.0497 \pm 3.9E - 03$ συγκρούσεις ανα έτος αντίστοιχα) κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά συγκρινόμενα με την παραπάνω μελέτη, δίνοντας έναν μέσο όρο $0.0741 \pm 3.9E - 03$ αναμενόμενων ετήσιων ατυχημάτων. Η υποεκτίμηση σε σχέση με τα αποτελέσματα του Ανδριτσόπουλου μπορεί να βρει πολλές εξηγήσεις. Αρχικά η ζώνη που είχε οριστεί από τον Ανδριτσόπουλο δεν ταυτίζεται απόλυτα με την διαδρομή που έχει σχεδιαστεί στα πλαίσια της παρούσας ΔΕ αλλά περιλάμβανε και κάποια επιπλέον τμήματα όπως λόγω χάρη την περιοχή του Αργοσαρωνικού Κόλπου. Συν τοις άλλοις, στην στατιστική αυτή έρευνα είχαν συμπεριληφθεί τύποι πλοίων όπως αλιευτικά, βοηθητικά και σκάφη αναψυχής τα οποία αμελήθηκαν κατά τη δημιουργία του μοντέλου. Τέλος, το γεγονός ότι στο μοντέλο δεν έχουν ληφθεί υπ'όψιν αλληλεπιδράσεις με άλλες διαδρομές, μπορεί και αυτό να συμβάλλει στην υποτίμηση των αποτελεσμάτων καθώς ένα πλοίο που εισέρχεται στη διαδρομή από κάπου άλλου (π.χ. Λιμάνι του Πειραιά), είναι πιθανό να εμπλακεί σε κάποιο ζευγάρι σύγκρουσης.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την εφαρμογή των παραγόντων που είχαν εφαρμοστεί από τον Ράκα, για τις μέσες ταχύτητες παρατηρείται ότι παρότι είχε εξαχθεί από τον αλγόριθμο μικρότερος αριθμός υποψηφιοτήτων, προκύπτουν τελικά περισσότερες αναμενόμενες συγκρούσεις. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον αυξημένο αριθμό διασταυρούμενων συναντήσεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη συγκριτικά με τους άλλους δύο τύπους συνάντησης.

Πίνακας 5.7: Ετήσιος αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων κώδικα μέγιστων ταχυτήτων, μετά από εφαρμογή των αντίστοιχων πιθανοτήτων αιτιώδους συνάφειας επί των τιμών του Πίνακα 5.3

Selected Causation Factor P_c		Head - on Collisions	Crossing Collisions	Overtaking Collisions	Total Annual Number of Expected Collisions	No. of Years Between Collisions
Fuji and Mizuki (1998), Christian and Kang (2017), Cucinotta et al. (2017) κ.α.		0.0038	0.0057	0.0755	0.085	11.76
		± 3.3267E - 04	± 8.1159E - 04	± 7.1E - 03	± 7.1E - 03	
Otto et al. (2002); Kujala et al. (2009); Montewka et al. (2010); Weng et al. (2012); Silveira et al. (2013); Weng et al. (2020) κ.α.		0.0038	0.006	0.0336	0.0432	23.14
		± 3.3267E - 04	± 8.1159E - 04	± 3.2E - 03	± 3.2E - 03	
Pedersen (1995), Hänninen and Ylitalo (2010), Rakas (2015) κ.α.	Μοντέλο Ράκα	0.0000998	0.0000778	0.0529	0.0531	18.82
		± 1.73E - 06	± 1.73E - 06	± 2.32E - 03	± 2.32E - 03	
	Προτεινόμενο Μοντέλο	0.0007	0.0118	0.0385	0.051	19.6
		± 6.8571E - 05	± 1.7E - 03	± 3.6E - 03	± 3.9E - 03	

Πίνακας 5.8: Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων που έχει εξαχθεί από διάφορους μελετητές μετά από εφαρμογή των ίδιων παραγόντων P_c σε διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές

Μελετητής/ές	Θαλάσσια Περιοχή	Ετήσιος Αναμενόμενος Αριθμός Συγκρούσεων
ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΕ (Μέσος Όρος)	Αιγαίο Πέλαγος	0.0741
Cucinotta et al. (2017)	Στενό της Μεσσήνης	0.14
Pedersen (1995)	Κόλπος Φινλανδίας	0.153
Silveira et al. (2013)	Ακτές Πορτογαλίας (μία διαδρομή)	0.0838
Andritsopoulos (2011)	Αιγαίο Πέλαγος	0.1145
Montewka et al. (2010)	Κόλπος Φινλανδίας (μία διαδρομή)	0.077

Παρότι η αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων με μελέτες επικεντρωμένες σε διαδρομές άλλων θαλάσσιων περιοχών δεν μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα λόγω του διαφορετικού όγκου κυκλοφορίας και των χαρακτηριστικών της καθεμίας, παρατηρείται μία ικανοποιητική σύγκλιση ως προς την τάξη μεγέθους με έρευνες στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιοι P_C , όπως γίνεται άλλωστε εμφανές στον Πίνακα 5.8. Ειδικότερα όσον αφορά τη μελέτη των Silveira et al. (2013) οι οποίοι είχανε εξάγει 0.08387 συγκρούσεις ανα έτος στη διαδρομή προς Λεισόες και των Montewka et al. (2010) στην οποία είχανε υπολογιστεί 0.077 ετήσια ατυχήματα επίσης σε μία διαδρομή, τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε μία ρεαλιστική εκτίμηση του αναμενόμενου αριθμού συγκρούσεων σε μία υψηλού ενδιαφέροντος ζώνη του Αιγαίου Πελάγους, μέσω της ανάπτυξης ενός εξελιγμένου στοχαστικού μοντέλου το οποίο συμβαδίζει με τις βιβλιογραφικές τάσεις, αντικατοπτρίζει τα χαρακτηριστικά του τοπικού στόλου και πηγαίνει “ένα βήμα παραπέρα” σε σχέση με τις προηγούμενες προσεγγίσεις.

Παρά την ύπαρξη μιας σειράς αυστηρών και μάλλον εξιδανικευμένων παραδοχών όπως λόγου χάρη η σταθερή ταχύτητα των πλοίων ή η ευθεία μετάβασή τους από κόμβο σε κόμβο, τα – εξαγόμενα μετά από την εφαρμογή του κριτηρίου της διαμέτρου σύγκρουσης – αποτελέσματα του μοντέλου χαρακτηρίζονται ως ικανοποιητικά συγκρινόμενα τόσο με ιστορικά στοιχεία ατυχημάτων, όσο και με μελέτες σε άλλες θαλάσσιες περιοχές ανα τον πλανήτη (στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό).

Ωστόσο, υφίσταται ακόμη πρόσφορο έδαφος για αρκετές περαιτέρω βελτιώσεις. Η καταλληλότητα του εφαρμοζόμενου παράγοντα αιτιώδους συνάφειας συνεχίζει να αποτελεί μείζον ζήτημα, ως εκ τούτου ένα μελλοντικό μοντέλο υπολογισμού του στο οποίο θα λαμβάνονται υπ’όψιν οι ιδιαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά της περιοχής του Αιγαίου Πελάγους, θα αποδεικνυόταν χρήσιμο στην κατεύθυνση της ακριβέστερης προσέγγισης των αναμενόμενων ατυχημάτων. Επιπλέον κρίνεται σημαντική η συμπερίληψη των αλληλεπιδράσεων του όγκου κυκλοφορίας με άλλες διαδρομές προκειμένου να αποφεύγονται τυχόν υποεκτιμήσεις των αποτελεσμάτων. Εξ’άλλου φαντάζει σκόπιμη και η προσθήκη επιπρόσθετων παραμέτρων όπως η ηλικία των πλοίων, η σημαία τους κ.α. Η μοντελοποίηση των καιρικών συνθηκών όπως και η εκτίμηση των πιθανών συνεπειών επίσης, θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικά συνοδευτικά εργαλεία κατά την προσομοίωση της κυκλοφορίας.

Τέλος, η απευθείας χρήση δεδομένων του AIS θα αποτελούσε μία σημαντική αναβάθμιση αποτυπώνοντας ρεαλιστικότερα τα κυκλοφοριακά μοτίβα και παρέχοντας μία πιο ξεκάθαρη εικόνα όσον αφορά το ρυθμό των αφίξεων συναρτήσει της περιόδου της μέρας. Προσφέρουν πέραν τούτου τη δυνατότητα πιο άμεσης εκτίμησης του ρίσκου σύγκρουσης (εφόσον πρόκειται για πραγματικά στοιχεία κυκλοφορίας) και λήψης προληπτικών μέτρων περιορισμού του. Το παρόν μοντέλο αποτελεί πάντως την απαραίτητη βάση και το σημείο εκκίνησης για την υλοποίηση όλων των παραπάνω προτάσεων.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abdelkhalik, O., Darani, S., (2016). Hidden genes genetic algorithms for systems architecture optimization. In Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, ACM2016, 629–636.
- Andritsopoulos, A., (2011). Analysis of Maritime Accidents in the Aegean Sea, Diploma Thesis. Athens, Greece: National Technical University of Athens, School of Naval Architecture and Marine Engineering.
- Asariotis, R., Benamara, H., Hoffmann, J., Premti, A., Valentine, V., Youssef, F., (2016). Review of Maritime Transport, 2016.
- Aven, T., (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety* 99 (2012), 33-44.
- Barnes, P., (2019). LLM/MA in International Trade and Maritime Law. University of Essex., School of Law.
- Buber, M., Toz, A.C., Sakar, C., Koseoglu, B., (2018). Determination of Risk Levels in the Southern Aegean Region in Terms of Ship Accidents Using Geographic Information System (GIS). ISHAD2018-page: 503-511.
- Calle, M., Alves, M., (2011). Ship collision: A brief survey. Conference: 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering. At: Natal – Brazil, Volume: 123201.
- Chai, T., Weng, J., De-qi, X., (2017). Development of a quantitative risk assessment model for ship collisions in fairways. *Safety Science* 91, 71-83.
- Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J.P., Langard, B., (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accid Anal Prev* 59(0):26–37.
- Chen, P., Mou, J., Van Gelder, P.H.A.J.M., (2017). Risk assessment methods for ship collision in estuarine waters using AIS and historical accident data. *Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources – Guedes Soares & Teixeira (Eds)*.
- Chen, P., Huang, Y., Mou, J.M., van Gelder, P.H.A.J.M., (2018). Ship collision candidate detection method: a velocity obstacle approach. *Ocean Eng.* 170, 186–198.
- Chen, P., Huang, Y., Mou, J., van Gelder, P. H. A. J. M., (2019). Probabilistic risk analysis for ship-ship collision: State-of-the-art. *Safety Science*, 117, 108–122.
- Chen, P., Mou, J., van Gelder, P.H.A.J.M., (2019). Integration of individual encounter information into causation probability modelling of ship collision accidents. *Safety Science*, 120, 636–651.

- Christian, R., Kang, H.G. (2017). Probabilistic risk assessment on maritime spent nuclear fuel transportation (Part II: Ship collision probability). *Reliability Engineering & System Safety*, 164, 136–149. doi:10.1016/j.ress.2016.11.017 .
- Code for Casualty Investigations. (1997, November 27). Resolution A.849(20). Retrieved February 20, 2015.
- Cucinotta, F., Guglielmino, E., Sfravara, F., (2017). Frequency of ship collisions in the strait of Messina through regulatory and environmental constraints assessment. *J. Navig.* 70, 1002–1022.
- Debnath, A.K., Chin, H.C., (2010). Navigational Traffic Conflict Technique: A Proactive Approach to Quantitative Measurement of Collision Risks in Port Waters. *Journal of Navigation* 63 (01), 137. DNV-GL, 2015. The ReVolt. DNV GL AS.
- Degré, T., Lefèvre, X., (1981). A collision avoidance system. *J. Navig.* 34, 294–302.
- De Larrucea, J.R., (2017). A new model of Port Safety Management: The analysis and risk management based on the Formal Safety Assessment (FSA). *Journal of Maritime Research*.
- Demirel, E., Bayer, D., (2015). The further studies on the COLREGs (Collision Regulations). *TransNav, Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.* 9, 17–22.
- Eliopoulou, E., Papanikolaou, A., Voulgarellis, M., (2016). Statistical analysis of ship accidents and review of safety level. *Safety Sci.* 85, 282–292.
- EMSA, (2020). Preliminary annual overview of marine casualties and incidents 2014-2019.
- Endrina, N., Rasero, J.C., Konovessis, D., (2018). Risk analysis for RoPax vessels: A case of study for the Strait of Gibraltar. *Ocean Engineering*, 151, 141–151.
- Fan, S., Yan, X., Zhang, J., Wang, J., (2017). A review on human factors in maritime transportation using seafarers' physiological data. 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS).
- Fowler, TG., Sorgrad, E., (2000). Modeling ship transportation risk. *Risk Analysis*, 20(2):225– 44.
- Fuazudeen, M., (2013). IMO, the human element and safety in shipping London: UCL (First Public Workshop).
- Fujii, Y., Mizuki, N., (1998). Design of VTS systems for water with bridges. In Gluver & Olsen, eds. *International Symposium on Advances in Ship Collision Analysis*. Copenhagen, 177–190
- Fujii, Y., Shiobara, R., (1971). The Analysis of Traffic Accidents. *The Journal of the Institute of Navigation* 24 (4), 534-543.

- Fujii, Y., Tanaka, K., (1971). Traffic capacity. *The Journal of Navigation*, 24, 543–552.
- Goerlandt, F., Kujala, P., (2011). Traffic simulation based ship collision probability modeling. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 96, 91–107.
- Goerlandt, F., Kujala, P., (2014). On the reliability and validity of ship–ship collision risk analysis in light of different perspectives on risk. *Safety Science*, 62, pp. 348–365.
- Goerlandt, F., Montewka, J., (2014). A probabilistic model for accidental cargo oil outflow from product tankers in a ship–ship collision. *Marine Pollution Bulletin*, 79(1-2), 130–144.
- Goodwin, E.M., (1975). A statistical study of ship domains. *The Journal of Navigation*, 28, 329–341.
- Groth, K.M., Swiler, L.P., (2013). Bridging the gap between HRA research and HRA practice: a Bayesian network version of SPAR-H. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 115, 33-42.
- Gucma, L., Bąk, A., (2016). Simplified methods for the assessment of consequences of navigational accidents as a tool for development of port regulations: Liquefied Petroleum Gas ships in Świnoujście-Szczecin waterway taken as example. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 46 (118). pp. 134–140.
- Guia, J., Teixeira, A.P., Guedes Soares, C., (2016). Sensitivity analysis on the optimum hull girder safety level of a Suezmax tanker. In: Guedes Soares, C. & Santos T. A. (eds.) *Maritime Technology and Engineering 3*. London, UK: Taylor & Francis Group, 823-830.
- Hänninen, M., Kujala, P., (2009). The effects of causation probability on the ship collision statistics in the Gulf of Finland. In: Weintrit, A (ed.). *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 8th International Navigational Symposium*. Gdansk, Poland. June 2009. UK: Taylor & Francis. pp. 267-272.
- Hänninen, M., Kujala, P. (2012). Influences of variables on ship collision probability in a Bayesian belief network model. *Reliability Engineering & System Safety*, 102, pp. 27–40.
- Healy, N.J., Sweeney, J.C., (1998). *The Law of Marine Collision*. Centreville: Cornell Maritime Press.
- Helle, I., Ahtiainen, H., Luoma, E., Hänninen, M., Kuikka, S., (2015). A probabilistic approach for a cost-benefit analysis of oil spill management under uncertainty: A Bayesian network model for the Gulf of Finland. *Journal of Environmental Management*, 158, 122–132.

- Hermanski, G., Daley, C., (2005). On Formal Safety Assessment (FSA) Procedure. Institute for Ocean Technology National Research Canada (NRC). Canada Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland.
- Hetherington, C., Flin, R., Mearns, K., (2006). Safety in shipping: The human element. *Journal of Safety Research*, 37(4), 401–411.
- Hollnagel, E., (2002). Understanding accidents e from root causes to performance variability. *Human Factors and Power Plants*. In: Proceedings of the 2002, IEEE 7th Conference. Scottsdale, Arizona, ABD.
- IMO (1972). Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972, (COLREGs). London.
- IMO (2002). Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process. IMO Document MSC/Circ. 1023 Dated April 5, 2002. London: IMO
- IMO (2013). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process, 44(0), p. 72.
- IMO (2018). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2, London.
- IMO MSC-MEPC.3/Circ.3 (2008). ‘Casualty-Related Matters* Reports on Marine Casualties and Incidents’.
- Kemp, J., (2008). The COLREGS and the Princess Alice. *The Journal of Navigation* (2008), 61, 271–281.
- Khaled, M.E., Kawamura, Y., (2014). Application of Bayesian Belief Network to Estimate Causation Probability of Collision at Chittagong Port by Analyzing Accident Database of Bangladesh. *JASNAOE 2014*. Sendai, Japão.
- Konovessis, D., Vassalos, D., (2008). Risk evaluation for RoPax vessels. *Proceedings IMechE Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 222, 13–26.
- Kontovas, C.A., Psaraftis, H.N., (2009). Formal Safety Assessment: A Critical Review. *Marine Technology*, Vol. 46, No. 1, January 2009, pp. 45-59.
- Kristiansen, S., (2013). *Maritime transportation: Safety management and risk analysis*. Butterworth-Heinemann.
- 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*.

- Kujala, P., Hänninen, M., Arola, T., Ylitalo, J., (2009). Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland. *Reliability Engineering and System Safety*, 94 (8), pp. 1349- 1357.
- Kwak, S.G., Kim, J.H., (2017.) Central limit theorem: the cornerstone of modern statistics. *Korean Journal of Anesthesiology* 70: 144–156.
- Lenart, A.S., (1983). Collision threat parameters for a new radar display and plot technique. *J. Navig.* 36, 404–410.
- Liu, Z., Zhang, Y., Yu, X., Yuan, C., (2016). Unmanned surface vehicles: an overview of developments and challenges. *Annu. Rev. Control* 41, 71–93.
- Lusic, Z., Coric, M., (2015). Models for estimating the potential number of ship collisions. *J. Navig.* 68, 735–749.
- MacDuff, T., (1974). The probability of vessel collision. *Ocean Industry* 9 (9), 144-148.
- Martins, M.R., Maturana, M.C., (2010). Human error contribution in collision and grounding of oil tankers. *Risk Anal.* 30, 674–698.
- McKoy, K.A., (1999). Collisions: a legal analysis. *World Maritime University Dissertations*. 187.
- Montewka, J., Hinz, T., Kujala, P., Matusiak, J., (2010). Probability modelling of vessel collisions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 95, 573–589.
- Montewka, J., Goerlandt, F., Kujala, P., (2014). On a systematic perspective on risk for formal safety assessment (FSA). *Reliability Engineering & System Safety*, 127, 77–85.
- Mou, J.M., Tak, C.V.D., Ligteringen, H., (2010). Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering* 37, 483–490.
- Naeem, W., Irwin, G.W., Yang, A., (2012a). COLREGs-based collision avoidance strategies for unmanned surface vehicles. *Mechatronics*, 22(6), 669–678.
- Nivolianitou, Z.S., Koromila, I.A., Giannakopoulos, T., (2016). Bayesian network to predict environmental risk of a possible ship accident. *International Journal of Risk Assessment and Management* 19 (3), 228- 239.
- Otto, S., Pedersen, P.T., Samuelides, M., Sames, P.C., (2002). Elements of risk analysis for collision and grounding of a RoRo passenger ferry. *Marine Structures*; 15(4–5):461–74.
- Parvez, T., (2010). Does the presence of human element in shipping companies company can lead to accidents on ships. *Greenwich Maritime Institute*.

- Pedersen, P.T., (1995). Collision and grounding mechanics. Danish Society of Naval Architects and Marine Engineers: 125–57.
- Pedersen, P.T., (2010). Review and application of ship collision and grounding analysis procedures. *Marine Structures* 23, 241–262.
- Perez, A.R., Antonio, C A.T., Consunji. R.J., (2011). The Sinking of the MV Doña Paz – A Critique on Maritime Disaster Preparedness in Philippines: An analysis of the event, *Acta Medicina Philippina*, Vol. 45 No.3, pp. 1-5.
- Pieri, S.P., Stamos, A., Tzouvadakis, I. (2014). Reducing tourist carbon footprint through strategic mapping of the existing hotel stock – Attica. *International Journal of Sustainable Energy*, 35(8), 734–745.
- Przywarty, M., (2008). Probabilistic model of ships navigational safety assessment on large sea areas. In: *Proceedings of the 16th international symposium on electronics in transport*, Ljubljana, Slovenia, 9–10 October 2008.
- Przywarty, M., Gucma, L., Marcjan, K., Bąk, A., (2015). Risk Analysis Of Collision Between Passenger Ferry And Chemical Tanker In The Western Zone Of The Baltic Sea. *Polish Maritime Research*, 22(2), 3-8.
- Psaraftis, H.N., (2012). Formal Safety Assessment: an updated review. *Journal of Marine Science and Technology*, 17, 390-402.
- Ren, J., Jenkinson I., Wang, J., Xu D., Yang, J., (2008). A methodology to model causal relationships on offshore safety assessment focusing on human and organizational factors. *Journal of Safety Research*, 2008, 39(1): 87- 100.
- Rong, H., Teixeira, A., Soares, C.G. (2015). Evaluation of near-collisions in the Tagus river estuary using a marine traffic simulation model. *Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie*, 43(115), 68–78.
- Sanaei, N., Fatemi, A., Phan, N. (2019). Defect characteristics and analysis of their variability in metal L-PBF additive manufacturing. *Materials & Design*, 108091.
- Serrat, S., (2012). Maritime traffic, safety and penalties. Available at: <http://www.barcelonaworldrace.org/en/news/articles/maritime-traffic-safety-and-penalties>.
- Shaluf, I., Ahmadun, F., Rashid S., Saari, M., (2003). Fire Explosion at Mutual Major Hazard Installations: Review of a case History. *Journal of Loss Prevention in Process Industries* 16(2): pp. 149-155.
- Silveira, P.A.M., Teixeira, A.P., Soares, C.G., (2013). Use of AIS Data to Characterise Marine Traffic Patterns and Ship Collision Risk off the Coast of Portugal. *Journal of Navigation* 66, 879–898.

- Sotiralis, P., Ventikos, N.P., Hamann, R., Golyshev, P., Teixeira, A.P., (2016). Incorporation of human factors into ship collision risk models focusing on human centred design aspects. *Reliability Engineering & System Safety* 156, 210-227.
- Stahlberg, K., Goerlandt F., Ehlers S., Kujala P., (2013). Impact scenario models for probabilistic risk-based design for ship–ship collision. *Marine Structures*, 33, pp. 238–264.
- Statheros, T., Howells, G., McDonald-Maier K., (2008). Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques. *Journal of Navigation* 2008; 61:129–42.
- Suppiah, R., (2007). Departure from COLREGS infringement or good seamanship. *World Maritime University Dissertations*.
- Szlapczynski, R., Szlapczynska, J., (2015). A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions. *J. Navig.* 68, 1041–1055.
- Trucco, P., Cagno, E., Ruggeri, F., Grande, O., (2008). A Bayesian belief network modelling of organisational factors in risk analysis: a case study in maritime transportation. *Reliability Engineering and System Safety* 93 (6), 845–856.
- Tzannatos, E., (2010). Human element and accidents in Greek shipping. *J Navigat* 2010; 63: 119–127.
- Uğurlu, Ö., Köse, E., Yıldırım, U., Yüksekıldız, E., (2013). Marine accident analysis for collision and grounding in oil tanker using FTA method. *Maritime Policy & Management*, 42(2), 163–185.
- Uğurlu, Ö., Yıldırım, U., Başar, E., (2015b). Analysis of grounding accidents caused by human error. *J. Mar. Sci. Technol.* 23 (5), 748–760.
- Ventikos, N.P., Stavrou, D.I., Andritsopoulos, A., (2017). Studying the marine accidents of the Aegean Sea: critical review, analysis and results. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 16(3), 103–113.
- Wang, Y., Chin, H.C., (2016). An empirically-calibrated ship domain as a safety criterion for navigation in confined waters. *J. Navig.* 69, 257–276.
- Weng, J., Liao, S., Wu, B., Yang, D. (2020). Exploring effects of ship traffic characteristics and environmental conditions on ship collision frequency. *Maritime Policy & Management*, 1–21.
- Weng, J., Meng, Q., Qu, X., (2012). “Vessel Collision Frequency Estimation in the Singapore Strait”, *The Journal of Navigation* Vol. 65, pp. 207 – 221, 2012.

- Weng, J., Xue, S. (2015). Ship Collision Frequency Estimation in Port Fairways: A Case Study. *Journal of Navigation*, 68(03), 602–618.
- William, A., (2003). The Human Element in Shipping Casualties. *Wmu Journal of Maritime Affairs* 2(2): 95-97.
- Wu, B., Cheng, T., Yip, T. L., Wang, Y., (2020). Fuzzy logic based dynamic decision-making system for intelligent navigation strategy within inland traffic separation schemes. *Ocean Engineering*, 197, 106909.
- Yip, T.L., (2008). Port traffic risks – a study of accidents in Hong Kong waters. *Transportation Research Part E* 44, 921–931.
- Ylitalo, J., (2010). Modeling marine accident frequency, Master's thesis. Espoo, Finland: Aalto University School of Science and Technology.
- Yong, W., (2019). Studies on the Application of Bayesian Network in the Cause Analysis of Ship Collision. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 9 (2019) 30-34.
- Youssef, S.A.M., Kim, Y.S., Paik, J.K., Cheng, F., Kim, M.S., (2014). Hazard Identification and Probabilistic Scenario Selection for Ship-ship Collision Accidents. *International Journal of Marine Engineering*.
- Zaccone, R., Martelli, M., Figari, M., (2019). A COLREG-Compliant Ship Collision Avoidance Algorithm. 2019 18th European Control Conference (ECC).
- Zhang, W.B., Goerlandt, F., Montewka, J., Kujala, P., (2015b). A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Eng.* 107, 60–69.
- Zhang, J., Teixeira, Â. P., Guedes Soares, C., Yan, X., (2018). Quantitative assessment of collision risk influence factors in the Tianjin port. *Safety Science*.
- Zhang, G., Thai, V.V., (2016a). Expert elicitation and Bayesian Network modeling for shipping accidents: A literature review. *Safety Science* 87, 53–62.