



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

**Ανάπτυξη Στοχαστικού Μοντέλου για την Εκτίμηση της  
Πιθανότητας Σύγκρουσης στο Αιγαίο Πέλαγος**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**



**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Κ. ΡΑΚΑΣ**

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Π. Βεντικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

**Ανάπτυξη Στοχαστικού Μοντέλου για την Εκτίμηση της  
Πιθανότητας Σύγκρουσης στο Αιγαίο Πέλαγος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Κ. ΡΑΚΑΣ

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Π. Βεντικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

**Ανάπτυξη Στοχαστικού Μοντέλου για την Εκτίμηση της  
Πιθανότητας Σύγκρουσης στο Αιγαίο Πέλαγος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Κ. ΡΑΚΑΣ

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Π. Βεντικός, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22<sup>η</sup> Ιουλίου 2015.

.....  
Γεώργιος Δ. Τζαμπίρας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Δημήτριος Β. Λυρίδης  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Π. Βεντικός  
Επίκουρος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....  
**ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Κ. ΡΑΚΑΣ**

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2015 – All rights reserved

Εικόνα Εξωφύλλου: René Magritte - *Le séducteur*

Σύμφωνα με τον René Magritte, το έργο «αντιπροσωπεύει τη λύση στο πρόβλημα του νερού». Η τελική μορφή του έργου προέκυψε μέσω μίας διαδικασίας κατά την οποία ο καλλιτέχνης ζωγράφιζε την ίδια εικόνα επανειλημμένως, ώσπου ένας τυχαίος συνδυασμός γραμμών υπέδειξε τη λύση.

*Στους γονείς μου, Μέλπω και Κώστα...*

## **Ευχαριστίες**

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή, κύριο Νικόλαο Π. Βεντίκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την συνεργασία μας κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου μελέτης.

Επίσης ευχαριστώ τον Διδάκτορα Γεώργιο Κρητικάκη από το Πολυτεχνείο Κρήτης για τις πολύτιμες συμβουλές του, κυρίως σε τεχνικά ζητήματα, κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του μοντέλου.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια μου για την υπομονή και τη υποστήριξη όλων αυτών των χρόνων.

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η σύγκρουση πλοίων αποτελεί ένα επικίνδυνο ενδεχόμενο εντός της αλυσίδας των θαλασσιών μεταφορών, η εμφάνιση του οποίου μπορεί να προκαλέσει ανθρώπινες απώλειες, περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες, με σημαντικό αντίκτυπο στις τοπικές κοινωνίες και τις σχετιζόμενες δραστηριότητες. Σημαντικός παράγοντας μίας ανάλυσης ρίσκου που αφορά τις συγκρούσεις, είναι η πιθανότητα εμφάνισης τους. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης μεταξύ πλοίων εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, το Αιγαίο Πέλαγος. Η βασική ιδέα στην οποία βασίζεται το προτεινόμενο μοντέλο είναι η στοχαστική προσομοίωση της θαλάσσιας κυκλοφορίας και ο καθορισμός των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης. Η ιδέα αυτή εφαρμόζεται πιλοτικά στο σημαντικότερο από άποψη κυκλοφορίας τμήμα του Αιγαίου Πελάγους. Το μοντέλο κωδικοποιήθηκε σε Matlab και λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου τιμές που προέκυψαν κατόπιν στατιστικής ανάλυσης του παγκόσμιου στόλου, σε συνδυασμό με τη μελέτη χαρτών απεικόνισης της θαλάσσιας κυκλοφορίας στην υπό μελέτη περιοχή, ως εκ τούτου δεν χρησιμοποιήθηκαν λεπτομερή δεδομένα AIS. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν και ερευνάται η σύγκλιση τους με ιστορικά δεδομένα συγκρούσεων στην υπό μελέτη περιοχή.

**Λέξεις Κλειδιά:** θαλάσσια ασφάλεια, ανάλυση ρίσκου, σύγκρουση, μοντελοποίηση, θαλάσσια κυκλοφορία, προσομοίωση κυκλοφορίας, Αιγαίο Πέλαγος

## **ABSTRACT**

Ship collision is a hazardous event (casualty) within the chain of maritime transport, which may lead to human losses, adverse economic consequences, and environmental damages; hence, it can cause significant impact to the local societies and related activities. A major factor of a risk analysis concerning ship collisions refers to the possibility of these collisions to occur. The purpose of this study is to assess the probability of ship-to-ship collision in the area of interest; namely the Aegean Sea. The basic concept of the developed model is to stochastically simulate the traffic flow in the area of interest and determine the collision candidates; this will be implemented through a pilot study in a segment of the Aegean Sea. The model is coded in Matlab and the input it receives, is based on values which are extracted from statistical analysis of the international fleet in combination with the study of maps depicting the traffic flow of the studied area; hence it does not employ detailed AIS data. The obtained results are presented and their accordance with the trend of actual incidents is discussed in depth. The study concludes will interesting insights of the aforementioned tasks.

**Keywords:** marine safety; risk analysis; collision; modeling; maritime traffic; traffic simulation; Aegean Sea

## Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	1
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	3
3. Διάκριση των Μοντέλων.....	19
3.1. Βασικά χαρακτηριστικά με βάση τα οποία διακρίνονται τα μοντέλα.....	19
3.2. Μεθοδολογία ποιοτικής ανάλυσης.....	19
3.2.1. Δενδροειδή διαγράμματα ανάλυσης σφάλματος (Fault Trees).....	20
3.2.2. Δενδροδιαγράμματα (Event Trees).....	20
3.2.3. Δίκτυα πίστης (Bayesian Belief Networks).....	22
3.2.4. Συστήματα ασαφούς λογικής (Fuzzy Inference Systems).....	22
3.3. Μεθοδολογία ποσοτικής ανάλυσης.....	24
3.4. Μοντέλο ποιοτικής ανάλυσης της σύγκρουσης.....	25
3.4.1. Ταυτοποίηση των κινδύνων.....	25
3.4.2. Πιθανότητα σύγκρουσης.....	27
3.4.3. Αιτιώδης ανάλυση.....	27
3.4.4. Αρχικά δεδομένα.....	29
3.4.5. Παράγοντες που επηρεάζουν το ρίσκο.....	30
3.4.6. Bayesian Networks.....	30
3.4.7. Εκτιμήσεις πιθανοτήτων.....	32
3.5. Μοντέλο στατιστικής προσέγγισης της σύγκρουσης.....	32
3.5.1. Το γενικό περίγραμμα του μοντέλου.....	32
3.5.2. Αλγόριθμος ανίχνευσης των συγκρούσεων.....	34
3.5.3. Υποψηφιότητες σύγκρουσης.....	34
3.5.4. Προσομοίωση δεδομένων εισόδου βασισμένη σε λεπτομερή ανάλυση δεδομένων AIS.....	36
3.5.5. Περιγραφή του AIS ως πηγή δεδομένων.....	36
3.5.6. Μεθοδολογία ανάλυσης των δεδομένων AIS.....	36
3.5.7. Κατασκευή των τροχιών των πλοίων και χειρισμός των σφαλμάτων.....	37
3.5.8. Ομαδοποίηση των τροχιών των πλοίων σε διαδρομές.....	39
3.5.9. Θεώρηση για ελλιπή δεδομένα.....	39
3.5.10. Κατανομή των χρόνων αναχώρησης.....	39
3.5.11. Διαδρομές.....	40
3.5.12. Κατανομή των τύπων των πλοίων.....	42
3.5.13. Κατανομή των διαστάσεων των πλοίων.....	42
3.5.14. Κατανομή των ταχυτήτων των πλοίων.....	43
3.6. Μοντέλο γεωμετρικής προσέγγισης της σύγκρουσης.....	44

3.6.1. Εισαγωγή στο μοντέλο MDTC.....	45
3.6.2. Ερευνητικό μοντέλο .....	45
3.6.3. Τα πλοία που λήφθηκαν υπόψη.....	46
3.6.4. Σενάρια συνάντησης.....	47
3.6.5. Πρότυπες διαδικασίες ελιγμών.....	48
3.6.6. Εκτίμηση MDTC .....	49
4. Ανάπτυξη του Μοντέλου Σύγκρουσης.....	53
4.1. Θεωρία.....	53
4.1.1. Βασικές έννοιες και κριτήρια που συναντώνται σε άλλα μοντέλα σύγκρουσης... ..	53
4.1.2. Βασικές έννοιες μέσω των οποίων γίνεται αντιληπτό το μοντέλο .....	54
4.2. Η υπό μελέτη περιοχή .....	55
4.2.1. Κατασκευή του σχεδίου των διαδρομών .....	55
4.3. Εκτίμηση του όγκου της κυκλοφορίας.....	60
4.4. Ανίχνευση των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης (collision candidates) .....	63
4.5. Πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας (causation probability) .....	64
5. Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	67
Συμπεράσματα.....	73
Βιβλιογραφία.....	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	81

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 3.1</b>	Μεταβλητές δεδομένων AIS που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, με την ακρίβεια των δεδομένων (IMO, 2001).....	37
<b>Πίνακας 3.2</b>	Ανάλυση των διαδρομών στον Κόλπο της Φινλανδίας, δεδομένα για το 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).....	38
<b>Πίνακας 5.1</b>	Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 60 δευτερολέπτων.....	69
<b>Πίνακας 5.2</b>	Παράγοντες αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995).....	69
<b>Πίνακας 5.3</b>	Παράγοντες αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011).....	69
<b>Πίνακας 5.4</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995).....	69
<b>Πίνακας 5.5</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011).....	69
<b>Πίνακας 5.6</b>	Σύγκριση των αποκτηθέντων αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν μετά από εφαρμογή των παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με COWI (2008) και τους Friis-Hansen and Simonsen (2002).....	70
<b>Πίνακας 5.7</b>	Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 120 δευτερολέπτων.....	70
<b>Πίνακας 5.8</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995), επί των τιμών του Πίνακα 5.7.....	70
<b>Πίνακας 5.9</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011), επί των τιμών του Πίνακα 5.7.....	70
<b>Πίνακας 5.10</b>	Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 60 δευτερολέπτων και τεχνητή αύξηση του όγκου της κυκλοφορίας κατά 10%.....	71
<b>Πίνακας 5.11</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995), επί των τιμών του Πίνακα 5.10.....	71
<b>Πίνακας 5.12</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011), επί των τιμών του Πίνακα 5.10.....	71
<b>Πίνακας 5.13</b>	Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 120 δευτερολέπτων και τεχνητή αύξηση του όγκου της κυκλοφορίας κατά 10%.....	71
<b>Πίνακας 5.14</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995), επί των τιμών του Πίνακα 5.13.....	72
<b>Πίνακας 5.15</b>	Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011), επί των τιμών του Πίνακα 5.13.....	72

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Μοντέλο ρίσκου σύγκρουσης για LNG carrier (IMO, 2007b).....	2
Σχήμα 3.1	Fault Tree σύγκρουσης των Martins and Maturana (2013).....	21
Σχήμα 3.2	Event Tree του βασικού συμβάντος 5 Martins and Maturana (2013).	22
Σχήμα 3.3	Bayesian Belief Network επικίνδυνων συμβάντων Martins and Maturana (2013).....	23
Σχήμα 3.4	Διάγραμμα ροής από τη διαδικασία πρόσβασης σκάφους σε μια OWT (Dai et al., 2013).....	26
Σχήμα 3.5	Fault Tree για το σκάφος υπηρεσίας που κατευθύνεται προς την OWT.....	28
Σχήμα 3.6	Event Tree για τα σκάφη υπηρεσίας που προσεγγίζουν την OWT....	29
Σχήμα 3.7	RIFs για τα βασικά συμβάντα E <sub>1</sub> , E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub> (Dai et al., 2013).....	31
Σχήμα 3.8	Γενικό σχεδιάγραμμα του μοντέλου πιθανότητας σύγκρουσης (Goerlandt and Kujala, 2011).....	33
Σχήμα 3.9	Ορισμός ενός κυκλοφοριακού συμβάντος (Goerlandt and Kujala, 2011).....	33
Σχήμα 3.10	Αλγόριθμος προσομοίωσης της κυκλοφορίας (Goerlandt and Kujala, 2011).....	35
Σχήμα 3.11	Κατανομές των χρόνων αναχώρησης ανά μήνα, ημέρα και ώρα για την διαδρομή από το Ελσίνκι προς το Ταλλίν, με βάση τα δεδομένα AIS του 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).....	41
Σχήμα 3.12	Κατανομές των τύπων των πλοίων ανά διαδρομή, οι διαδρομές βασίζονται σε δεδομένα AIS από το 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).....	42
Σχήμα 3.13	Σύγκριση των κατανομών των μηκών των πλοίων ανά τύπο πλοίου στον Κόλπο της Φινλανδίας, με βάση δεδομένα AIS του 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).....	43
Σχήμα 3.14	Κατανομή των ταχυτήτων των πλοίων στον Κόλπο της Φινλανδίας ανά τύπο πλοίου, με βάση δεδομένα AIS του 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).....	44
Σχήμα 3.15	Συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή MDTC, την απόσταση ασφαλούς α),β) διέλευσης και της σύγκρουσης (Montewka et al., 2010).....	45
Σχήμα 3.16	Καμπύλες στρέψης ενός RoPax σε δύο διαφορετικά ύψη κύματος Montewka et al. (2011b). ....	46
Σχήμα 3.17	Σχετικές θέσεις των πλοίων, με τρεις επιλεγμένες γωνίες διασταύρωσης, πριν προχωρήσουν σε ελιγμούς, (Montewka et al.2010).....	47
Σχήμα 3.18	Ερευνητικό μοντέλο Montewka et al. (2011b).....	48
Σχήμα 3.19	Τα πλοία ως ελλείψεις και ερμηνεία ενός περάσματος χωρίς επαφή Montewka et al. (2011b).....	50
Σχήμα 4.1	Χάρτης Πυκνότητας Κυκλοφορίας (Traffic Density Map).....	56
Σχήμα 4.2	Προσέγγιση της διαδρομής μέσω συντεταγμένων.....	57
Σχήμα 4.3	Απεικόνιση της πύλης 1_2 και του κόμβου 3_4.....	58
Σχήμα 4.4	Απεικόνιση των κόμβων 5_6, 6_7, 10_11, 5_9, 8_9, 10_12.....	59
Σχήμα 4.5	Απεικόνιση του κόμβου 13_14 και της πύλης 15_16.....	59
Σχήμα 4.6	Δειγματική διαδρομή (sample path) ομογενούς διαδικασίας Poisson με $\lambda=0.0108$ arrivals/min, για χρονικό διάστημα $(t, t+\tau]=2768$ min....	61
Σχήμα 4.7	Τύποι συνάντησης σύμφωνα με τους COLREG (IMO, 2002).....	63

## Κατάλογος Εξισώσεων

Εξίσωση	(3.1).....	27
Εξίσωση	(3.2) .....	28
Εξίσωση	(3.3) .....	40
Εξίσωση	(3.4) .....	40
Εξίσωση	(3.5) .....	40
Εξίσωση	(3.6) .....	40
Εξίσωση	(3.7) .....	49
Εξίσωση	(3.8) .....	50
Εξίσωση	(4.1) .....	53
Εξίσωση	(4.2) .....	54
Εξίσωση	(4.3) .....	54
Εξίσωση	(4.4) .....	55
Εξίσωση	(4.5) .....	60
Εξίσωση	(4.6) .....	62
Εξίσωση	(4.7) .....	62
Εξίσωση	(4.8) .....	62
Εξίσωση	(4.9) .....	62
Εξίσωση	(4.11) .....	62
Εξίσωση	(4.12) .....	62
Εξίσωση	(4.13) .....	62
Εξίσωση	(5.1) .....	67

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή)

# 1. Εισαγωγή

---

Οι θαλάσσιες οδοί του Αιγαίου Πελάγους κατέχουν εξέχουσα σημασία για τις διεθνείς θαλάσσιες μεταφορές, αποτελώντας σύνδεσμο ανάμεσα στη Μαύρη Θάλασσα και την υπόλοιπη Μεσόγειο. Το βορειοανατολικό σύνορο του Αιγαίου Πελάγους είναι η πύλη για το Στενό των Δαρδανελίων, το νοτιοανατολικό σύνορο αποτελεί το πέρασμα για τα πλοία με προορισμό τα λιμάνια της Μέσης Ανατολής και τη Διώρυγα του Σουέζ, ενώ το νοτιοδυτικό σύνορο αποτελεί το πέρασμα για τα λιμάνια της Δυτικής Ευρώπης.

Μεγάλος όγκος κυκλοφορίας παρατηρείται καθημερινά περιλαμβάνοντας όλους σχεδόν τους τύπους πλοίων και κατ' επέκταση μεγάλη ποικιλία μεταφερόμενων προϊόντων, με ότι αυτό συνεπάγεται τόσο από άποψη οικονομικού ενδιαφέροντος όσο και από τη σκοπιά ενδεχόμενων οικολογικών και άλλων ανεπιθύμητων συνεπειών.

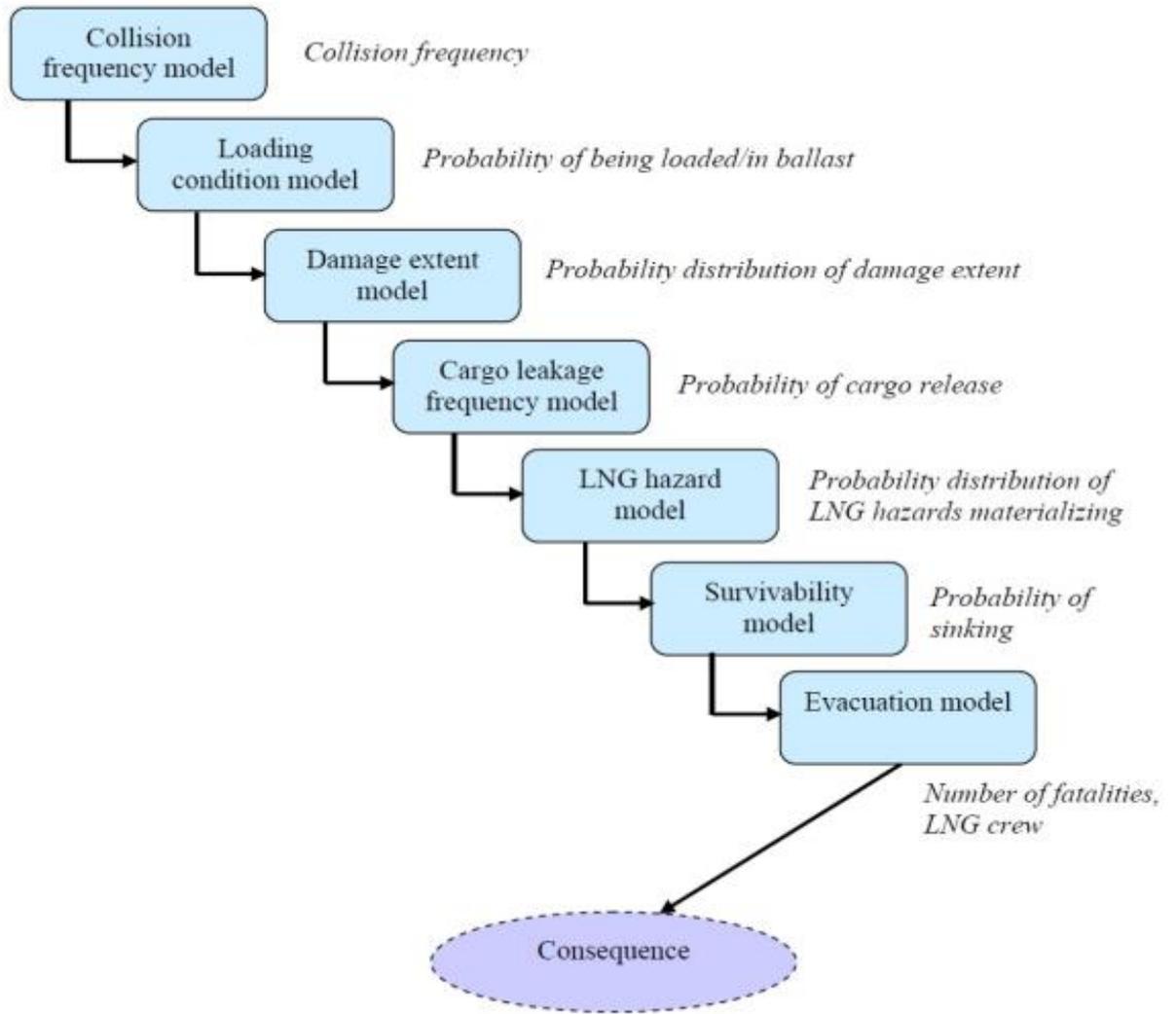
Οι συγκρούσεις κατέχουν σημαντικό ποσοστό του συνολικού αριθμού των ατυχημάτων σε διάφορες περιοχές ενδιαφέροντος (Kujala et al., 2009; Mou et al., 2010; Zhang et al., 2013). Το ανάλογο ισχύει, αναφορικά με τις συγκρούσεις, και για την υπό μελέτη περιοχή στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Ανδριτσόπουλος, 2011).

Το ρίσκο ορίζεται ως ο συνδυασμός της συχνότητας εμφάνισης του ανεπιθύμητου γεγονότος με τη δριμύτητα των συνεπειών (IMO, 2007a). Υπάρχουν πολλές αντιλήψεις αυτού του γενικότερου ορισμού του ρίσκου, πολλές από τις οποίες εξετάζονται στην εργασία των Goerlandt and Kujala (2014).

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται ένα μοντέλο για την εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης πλοίου με πλοίο, μέσω της πρόβλεψης του πλήθους των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης. Το μοντέλο είναι προσανατολισμένο αποκλειστικά στο σκέλος της συχνότητας του ανωτέρω ορισμού του ρίσκου. Τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν, προσδοκείται να χρησιμεύσουν ως τμήμα των δεδομένων εισόδου μίας ολοκληρωμένης ανάλυσης ρίσκου, ένα γραφικό παράδειγμα μίας τέτοιας ανάλυσης απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.

Μετά από εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση, γίνεται η βασική διάκριση των μοντέλων και παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες μέσω των οποίων γίνεται αντιληπτό το προταθέν μοντέλο. Περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος ανάπτυξης του αλγορίθμου και παρατίθενται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του. Κατόπιν τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, διεξάγεται συζήτηση και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε δεκτή στο 4<sup>ο</sup> «**International Workshop on Nautical Traffic Models**», όπου θα παρουσιαστεί υπό τη μορφή άρθρου το οποίο παρατίθεται στο παράρτημα. Το workshop θα λάβει χώρα στο Εσπού της Φινλανδίας στις 26-29 Αυγούστου 2015.



Σχήμα 1.1 Μοντέλο ρίσκου σύγκρουσης για LNG carrier (IMO, 2007b).

## 2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

---

Διεξάγεται εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση με σκοπό την εξοικείωση του αναγνώστη με βασικές έννοιες της ανάλυσης ρίσκου, μοντέλα σύγκρουσης και πληθώρα μεθοδολογιών που εφαρμόζονται από τους ερευνητές.

Τα θαλάσσια ατυχήματα στα οποία εμπλέκονται πλοία που μεταφέρουν επιβάτες μπορεί να εμπεριέχουν μεγάλους κινδύνους αναφορικά με τις ανθρώπινες απώλειες. Για αποτελεσματική μετρίαση του ρίσκου απαιτείται επίγνωση της διαδικασίας της κλιμάκωσης του ρίσκου. Αυτό απαιτεί μια προορατική προσέγγιση όταν πρόκειται για μοντελοποίηση των θαλάσσιων συστημάτων μεταφοράς. Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα μοντέλα βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα για θαλάσσια ατυχήματα, έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζουν τα ατυχήματα από τη σκοπιά του αποτελέσματος αντί προληπτικά. Η εργασία των [Montewka et al. \(2014a\)](#) εισάγει ένα συστηματικό πλαίσιο, το οποίο μπορεί να μεταφερθεί, εκτιμώντας το ρίσκο των θαλάσσιων μεταφορικών συστημάτων, πληρώνοντας τις προϋποθέσεις που απορρέουν από τον επίσημο ορισμό του ρίσκου. Το πλαίσιο επικεντρώνεται σε συγκρούσεις πλοίων στην ανοιχτή θάλασσα, με ένα RoRo/Επιβατηγό πλοίο (RoPax) να θεωρείται ως το συγκρουσθέν πλοίο. Αρχικά διεξάγεται μία εξακρίβωση των γεγονότων που προηγούνται μίας σύγκρουσης ανάμεσα σε δύο πλοία στην ανοιχτή θάλασσα και μετά εκτιμά τις πιθανότητες αυτών των γεγονότων καταλήγοντας με τον καθορισμό της σφοδρότητας μιας σύγκρουσης. Το πλαίσιο του ρίσκου αναπτύσσεται με τη χρήση Δικτύων Πίστης (Bayesian Belief Networks) και χρησιμοποιεί μια ομάδα αναλυτικών μεθόδων για την εκτίμηση των παραμέτρων ρίσκου του μοντέλου. Τελικά παρουσιάζεται μία μελέτη περίπτωσης στην οποία το πλαίσιο ρίσκου που αναπτύχθηκε εφαρμόζεται σε ένα θαλάσσιο σύστημα μεταφοράς το οποίο λειτουργεί στον Κόλπο της Φινλανδίας. Τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν συγκρίνονται με τα ιστορικά δεδομένα και τα διαθέσιμα μοντέλα, στα οποία ένα RoPax ενεπλάκη σε σύγκρουση, και βρέθηκε καλή σύγκλιση με τα διαθέσιμα αρχεία ([Montewka et al., 2014a](#)).

Ο χρόνος υπολογισμού και διόρθωσης των αποφάσεων είναι μετρήσιμοι δείκτες στην εκτίμηση του ρίσκου σύγκρουσης (collision risk - CR). Ωστόσο, οι υπάρχουσες προσεγγίσεις του CR, βασισμένες στη θεωρία της ασαφούς λογικής (fuzzy theory) ή των νευρωνικών δικτύων (neural networks), έχουν μικρότερη ακρίβεια και μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμού. Για να ξεπεραστούν αυτά τα μειονεκτήματα και να αποκτηθεί μια συμβιβαστική εκτίμηση, οι [Li and Pang \(2013\)](#) προτείνουν μια προσέγγιση στην εκτίμηση του CR του πλοίου βασισμένη στη θεωρία αποδείξεων των Dempster-Shafer (D-S). Λαμβάνοντας υπόψη ότι το CR συσχετίζεται με συναρτήσεις-μέλη οι οποίες αντιστοιχούν σε παραμέτρους ναυσιπλοΐας, όπως η απόσταση από το πλησιέστερο σημείο προσέγγισης (Distance to the Closest Point of Approach – DCPA), ο χρόνος μέχρι το πλησιέστερο σημείο προσέγγισης (Time to the Closest Point of Approach – TCPA) και η σχετική απόσταση, χρησιμοποιείται δίκτυο πολλαπλών radar για να καταγραφούν. Κατόπιν, εφαρμόζοντας τη θεωρία αποδείξεων των D-S, εκτιμάται επιτυχώς το CR με ενιαία βασική πιθανολογική

ανάθεση (Joint Basic Probability Assignment – JBPA). Τελικώς, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα της προτεινόμενης προσέγγισης (Li and Pang, 2013).

Από το 1998 έως το 2000 αναπτύχθηκε από το Technical University of Denmark ένα ολοκληρωμένο πακέτο λογισμικού για ανάλυση σύγκρουσης και προσάραξης στα πλαίσια του προγράμματος «Information technology for increased safety and efficiency in ship design and operation.». Το κόστος της ανάπτυξης του λογισμικού ήταν 6 ανθρωποέτη. Το λογισμικό παρέχει μια εργαλειοθήκη για ένα πλήθος αναλύσεων σχετιζομένων με ατυχήματα σύγκρουσης και προσάραξης. Το λογισμικό περιέχει τρεις βασικές μονάδες ανάλυσης και μια μονάδα μείωσης του ρίσκου: (1) συχνότητα, (2) βλάβη και (3) συνέπειες. Αυτές οι μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά ή σε σειρά και οι αναλύσεις μπορούν να διεξαχθούν με τρόπο ντετερμινιστικό ή πιθανολογικό. Τελικώς, στη μονάδα μείωσης του ρίσκου, τα προφίλ του ρίσκου για τις υπολογισθείσες συνέπειες μπορούν να υπολογιστούν και να συγκριθούν με εναλλακτικές λύσεις με την ανάθεση μιας συνάρτησης κόστους στις συνέπειες. Έτσι, οι δυνατές αναλύσεις εκτείνονται από μια ανάλυση ντετερμινιστικής σύγκρουσης έως μια συγκριτική ανάλυση ρίσκου δύο σκαφών που λειτουργούν σε καθορισμένη πορεία όπου το αποτέλεσμα είναι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για το κόστος διαρροής πετρελαίου σε μία δεδομένη περιοχή ανά έτος για τα δύο σκάφη (Friis-Hansen and Simonsen, 2002).

Στα πλαίσια σχεδίασης, βασισμένης στο ρίσκο, είναι απαραίτητο να ορισθεί με ακρίβεια και να επιλεγεί μια ομάδα έγκυρων σεναρίων, για να χρησιμοποιηθεί στη ποσοτική εκτίμηση και τη διαχείριση του ρίσκου σύγκρουσης μεταξύ δύο πλοίων. Μέχρι τώρα στη ναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιούνται ευρέως προκαθορισμένες λύσεις και εμπειρική γνώση αλλά είναι συχνά ανεπαρκείς για καινοτομία, επειδή μπορεί να καταλήξουν σε δυσμενή σχεδιαστικά φορτία και δεν ανταποκρίνονται σε όλες τις συνθήκες (Youssef et al., 2014). Οι Youssef et al. (2014) προτείνουν μια καινοτόμο μέθοδο χρησιμοποιώντας πιθανολογικές προσεγγίσεις, για την αναγνώριση συναφών ομάδων σεναρίων σύγκρουσης πλοίου με πλοίο, οι οποίες συλλογικά αντιπροσωπεύουν όλα τα πιθανά σενάρια. Τα ατυχήματα σύγκρουσης πλοίου με πλοίο και τα παρ' ολίγον ατυχήματα σύγκρουσης παγκοσμίως ταξινομούνται για την περίοδο 1991 μέχρι 2012. Κατόπιν τα σενάρια σύγκρουσης περιγράφονται χρησιμοποιώντας μια ομάδα παραμέτρων, οι οποίες χρησιμοποιούνται ξεχωριστά ως τυχαίες μεταβλητές και αναλύονται με στατιστικές μεθόδους, για να ορισθούν τα εύρη και οι διακυμάνσεις, ώστε να διαμορφωθεί η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για κάθε σενάριο. Καθώς η θεώρηση όλων των σεναρίων δεν θα ήταν πρακτική, εφαρμόζεται μία τεχνική δειγματοληψίας για να επιλεγεί ένας ορισμένος αριθμός από υποψήφια σενάρια σύγκρουσης. Παρουσιάζονται εφαρμοσμένα παραδείγματα από διάφορους τύπους σκαφών για να καταδείξουν την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου (Youssef et al., 2014).

Ο Pedersen (2010) διεξάγει μία επισκόπηση των εργαλείων πρόβλεψης και ανάλυσης για τις συγκρούσεις και τις προσάραξεις. Επιπλέον στοχεύει στη περιγραφή μιας πιθανολογικής διαδικασίας, για την οποία αυτά τα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τη ναυπηγική βιομηχανία, για την ανάπτυξη κανονισμών

βασισμένων στην απόδοση ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι που σχετίζονται με το ανθρώπινο, περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος που προκύπτει από τα περιστατικά σύγκρουσης και προσάραξης. Ο κύριος στόχος της έρευνας σχετικά με τη σύγκρουση και προσάραξη θα πρέπει να είναι η εξακρίβωση των πλέον οικονομικών επιλογών ελέγχου του ρίσκου που σχετίζονται με την αποτροπή και τη μετρίαση των περιστατικών σύγκρουσης και προσάραξης (Pedersen, 2010).

Από τους Stahlberg et al. (2013) προτείνεται η σχεδίαση του πλοίου να γίνεται βασισμένη στο πιθανολογικό ρίσκο σύγκρουσης πλοίου με πλοίο, η οποία να υπόκειται στις τοπικές συνθήκες της εμπορικής περιοχής όπου λειτουργεί το πλοίο. Η πιθανότητα σύγκρουσης και οι συνέπειες αυτής καθορίζονται βάσει των κυκλοφοριακών συνθηκών μέσα στις οποίες το πλοίο αναμένεται να λειτουργεί. Η εργασία ερευνά την επάρκεια των επί του παρόντος διαθέσιμων μοντέλων για σενάρια σύγκρουσης, δηλαδή μοντέλα τα οποία συνδέουν τις κυκλοφοριακές συνθήκες με τις συνθήκες τη στιγμή της σύγκρουσης. Ένα διερευνητικό στατιστικό μοντέλο παρουσιάζεται για να εδραιώσει ένα τέτοια σύνδεση. Διεξάγεται μια μελέτη περίπτωσης, για τη σχεδίαση βασισμένη στο πιθανολογικό ρίσκο, για ένα στόλο πλοίων RoPax τα οποία λειτουργούν σε καθορισμένη διαδρομή στον Κόλπο της Φινλανδίας. Τα διαθέσιμα από τη βιβλιογραφία μοντέλα σεναρίων σύγκρουσης συγκρίνονται με το αναπτυχθέν πιθανολογικό μοντέλο ελιγμών αποφυγής. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι τα μοντέλα σεναρίων σύγκρουσης έχουν σημαντική επίδραση στις υπολογισθείσες πιθανότητες διάρρηξης της γάστρας. Κανένα επαρκώς αιτιολογημένο μοντέλο σεναρίου σύγκρουσης δεν είναι προς το παρόν διαθέσιμο και το παρουσιασθέν πιθανολογικό μοντέλο ελιγμών αποφυγής εμπεριέχει αβεβαιότητα. Ως εκ τούτου, για τη μετάβαση στη σχεδίαση πλοίου, βασισμένη στο πιθανολογικό ρίσκο σύγκρουσης, η οποία να αποτελεί πρότυπο για σύγκρουση πλοίων σε μια συγκεκριμένη εμπορική περιοχή, είναι αναγκαία περισσότερη έρευνα για να εδραιωθεί μία αξιόπιστη σύνδεση (Stahlberg et al., 2013).

Ένα σημαντικό στοιχείο κατά την εκτίμηση των συνεπειών σε μία σύγκρουση δεξαμενόπλοιου είναι η πιθανότητα διάρρηξης μιας δεξαμενής μεταφοράς πετρελαίου (Goerlandt et al., 2012). Εύκολα διαπιστώνεται ότι οι δυναμικές παράμετροι τη στιγμή της σύγκρουσης επηρεάζουν σημαντικά την ενέργεια παραμόρφωσης. Ωστόσο οι υποθέσεις που αφορούν τις δυναμικές παραμέτρους τη στιγμή της σύγκρουσης συζητούνται λίγο στο περιεχόμενο της ανάλυσης του ρίσκου σύγκρουσης. Τα διαθέσιμα μοντέλα σεναρίων σύγκρουσης αναλύονται χρησιμοποιώντας ένα σύστημα προσέγγισης του ρίσκου. Η σύγκριση των μοντέλων για σενάρια σύγκρουσης στη βιβλιογραφία γίνεται με αλγόριθμο ανάλυσης ρίσκου δίνοντας έμφαση στις συγκρούσεις πετρελαιοφόρων. Η προσομοίωση Monte Carlo εφαρμόζεται στον αλγόριθμο ανάλυσης ρίσκου για κάθε μοντέλο σεναρίου σύγκρουσης. Μόνο η μονάδα του σεναρίου σύγκρουσης αλλάζει ενώ οι υπόλοιπες μονάδες του αλγορίθμου (παραγωγή του σεναρίου συνάντησης, καθορισμός της ενέργειας παραμόρφωσης και της στατικής ικανότητας της γάστρας) κρατούνται οι ίδιες. Η ανάλυση αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα ανάλυσης ρίσκου όταν διεξάγεται με διαφορετικές υποθέσεις για το σενάριο συνάντησης. Επιπλέον στη συζήτηση αποκαλύπτονται εγγενείς εννοιολογικοί περιορισμοί των μοντέλων σεναρίων

σύγκρουσης, στο πλαίσιο του συστήματος ρίσκου. Συμπεραίνεται ότι η χρησιμοποίηση ακριβέστερων μοντέλων ενέργειας σύγκρουσης και/ή στατικής ικανότητας από τη σκοπιά ανάλυσης ρίσκου θαλάσσιας κυκλοφορίας δεν αξίζει τον κόπο, καθώς η αβεβαιότητα που αφορά το σενάριο συνάντησης είναι υπερβολικά μεγάλη (Goerlandt et al., 2012).

Μελετώνται από τους Hanninen and Kujala (2012) οι επιδράσεις των μεταβλητών σε ένα μοντέλο Δικτύων Πίστης (Bayesian Belief Networks) για την εκτίμηση του ρόλου του ανθρώπινου παράγοντα στη πιθανότητα σύγκρουσης πλοίων στον Κόλπο της Φινλανδίας, για την ανακάλυψη των μεταβλητών με τις μεγαλύτερες επιδράσεις και για την εξέταση της εγκυρότητας του δικτύου. Εξετάστηκε η αλλαγή στην αποκαλούμενη πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας (causation probability) με ταυτόχρονη παρατήρηση κάθε κατάστασης των μεταβλητών του δικτύου και χρησιμοποιώντας αναλύσεις ευαισθησίας και αμοιβαίας πληροφορίας. Η αλλαγή πορείας σε μια κατάσταση συνάντησης είναι η μεταβλητή με την μεγαλύτερη επίδραση στο μοντέλο, ακολουθούμενη από μεταβλητές όπως η ενέργειες του αξιωματικού υπηρεσίας, η εκτίμηση της κατάστασης, ο εντοπισμός του κινδύνου, η προσωπική κατάσταση και η ανεπάρκεια. Οι μεταβλητές με τη μικρότερη επίδραση είναι οι διάφοροι περισπασμοί στη γέφυρα, η ορατότητα από τη γέφυρα, οι τακτικές συντήρησης ρουτίνας και η κόπωση του αξιωματικού υπηρεσίας. Γενικά οι μέθοδοι φαίνεται να συμφωνούν στη σειρά των μεταβλητών του μοντέλου αν και μερικές διαφωνίες προκύπτουν λόγω ελαφρώς ανόμοιων προσεγγίσεων στην αντίληψη της επίδρασης της μεταβλητής. Οι σχετικές τιμές και η κατάταξη των μεταβλητών που βασίζονται στις τιμές, ανακαλύπτεται ότι είναι πιο πολύτιμες από τις πραγματικές αριθμητικές τιμές καθαυτές. Αν και οι μεταβλητές με τη μεγαλύτερη επίδραση φαίνονται να είναι εύλογες, υπάρχουν μερικές ασυμφωνίες ανάμεσα στις υποδεικνυόμενες επιδράσεις του μοντέλου και της βιβλιογραφίας (Hanninen and Kujala, 2012).

Οι Goerlandt and Kujala (2014) συζητούν την αξιοπιστία και την εγκυρότητα της ποσοτικής ανάλυσης ρίσκου (Quantitative Risk Analysis - QRA). Αυτές οι έννοιες απευθύνονται αντιστοίχως στο αν μια ποσοτική ανάλυση ρίσκου (QRA) αποδίδει την ίδια εικόνα για το ρίσκο αν η ανάλυση επαναληφθεί και στο αν μια ανάλυση ανταποκρίνεται στο κατάλληλο πρόβλημα. Ενώ έχει υποστηριχθεί ότι η ποσοτική ανάλυση ρίσκου δεν είναι εν γένει αξιόπιστη, στην επιστημονική βιβλιογραφία υπάρχουν λίγες αποδείξεις που επιβεβαιώνουν τον ισχυρισμό. Με αυτό το δεδομένο, η εργασία μελετάει την αξιοπιστία της ποσοτικής ανάλυσης ρίσκου μέσω μιας μελέτης περιπτώσεων κινδύνου σύγκρουσης πλοίου με πλοίο. Βρίσκεται ότι η προοπτική του ρίσκου είτε από τη σκοπιά της πιθανότητας, είτε από τη σκοπιά των δεικτών δεν παρέχει απαραίτητως μια αξιόπιστη εικόνα του ρίσκου, ούτε με όρους αριθμητικής ακρίβειας, ούτε με όρους μετρήσεων του ρίσκου, ούτε με όρους ιεράρχησης των μετρήσεων του ρίσκου σε διάφορα σημεία του συστήματος. Τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν χαμηλή μεθοδολογική αξιοπιστία των επιλεγμένων μεθόδων, προκύπτει έτσι προβληματισμός για την εγκυρότητά τους. Συζητείται η εφαρμογή κριτηρίων που αφορούν την εγκυρότητα της ανάλυσης ρίσκου με όρους εγκυρότητας των μηχανισμών εντοπισμού των περιστατικών.

Σημαντική αβεβαιότητα εντοπίζεται όσον αφορά στους ορισμούς των περιστατικών στις επιλεγμένες μεθόδους, συνεπάγοντας έτσι την ανάγκη για μεγαλύτερη επικέντρωση σε αυτή τη σημαντική πτυχή της ανάλυσης του ρίσκου της θαλάσσιας κυκλοφορίας (Goerlandt and Kujala, 2014).

Στην εργασία των Saydam and Frangopol (2013) παρουσιάζεται ένα πιθανολογικό πλαίσιο εκτίμησης της επίδοσης της γάστρας πλοίου, υπό ξαφνική βλάβη που οφείλεται σε διάφορες επιχειρησιακές συνθήκες. Τα ατυχήματα σύγκρουσης και προσάραξης θεωρούνται σενάρια ξαφνικής βλάβης. Ερευνώνται τα συνδυαστικά αποτελέσματα λόγω ξαφνικής βλάβης και προοδευτικής χειροτέρευσης λόγω διάβρωσης. Η ποσοτικοποίηση της επίδοσης της γάστρας του πλοίου γίνεται με όρους αξιοπιστίας και στιβαρότητας του πλοίου. Το ξεπέρασμα της διαμήκου ροπής κάμψης του πλοίου θεωρείται ως η οριακή κατάσταση. Οι ιδιότητες της διαμήκου ροπής κάμψης άθικτης και υπό βλάβης γάστρας εκτιμώνται χρησιμοποιώντας μια εκδοχή, βασισμένη στη βελτιστοποίηση της μεθόδου στοιχειώδους καμπυλότητας. Τα επαγόμενα από κυματισμούς φορτία για διάφορους τύπους πλοίων, ταχύτητες, γωνίες πρόσπτωσης και καταστάσεις θάλασσας προσδιορίζονται μέσω υδροδυναμικής ανάλυσης και ερευνάται η επίδοση του πλοίου υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Η προσέγγιση αυτή απεικονίζεται με παράδειγμα ένα πετρελαιοφόρο. Κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας ο δείκτης αξιοπιστίας σχετίζεται με τη άθικτη και την υπό βλάβη γάστρα και ο δείκτης στιβαρότητας σχετίζεται με τα σενάρια βλάβης, παρουσιάζονται σε πολικά διαγράμματα. Επιπλέον ερευνώνται οι επιδράσεις της γήρανσης στην αξιοπιστία (Saydam and Frangopol, 2013).

Η μελέτη των Liwang et al. (2013) επιθεωρεί την εκτίμηση της ασφάλειας των πλοίων. Οι στόχοι είναι να διερευνηθούν οι δυνατότητες για ποσοτικοποίηση και για εκτέλεση μιας πληρέστερης ανάλυσης ρίσκου αναφορικά με την ασφάλεια των πλοίων από αυτή που περιγράφεται στον κώδικα «International Ship and Port Facility Security» και να εκτιμηθεί σε ποιο βαθμό αυτή η λεπτομερέστερη ανάλυση αυξάνει την ασφάλεια των πλοίων και διευκολύνει την αποτελεσματική λήψη επιλογών ελέγχου του ρίσκου. Η μελέτη επικεντρώνεται στη θαλάσσια πειρατεία που εδράζεται στη Σομαλία, χρησιμοποιώντας τον Ινδικό Ωκεανό σαν μελέτη περίπτωσης. Τα δεδομένα συλλέγονται χρησιμοποιώντας ερωτηματολόγια και συνεντεύξεις με πολίτες και στρατιωτικούς ειδικούς στην ασφάλεια οι οποίοι έχουν προσωπική πείρα από πειρατεία ανοικτά των ακτών της Σομαλίας. Τα δεδομένα συλλέγονται ειδικά για αυτή τη μελέτη και περιγράφουν και ποσοτικοποιούν την ικανότητα της απειλής, την πρόθεση και τη πιθανότητα της εκμετάλλευσης ενός τρωτού σημείου του πλοίου. Βασισμένη στη συλλεχθείσα περιγραφή της απειλής, η μελέτη αναλύει και περιγράφει την πιθανότητα εντοπισμού από τους πειρατές, την πιθανότητα επιτυχούς προσέγγισης και την πιθανότητα επιτυχούς επιβίβασης. Η διεξαχθείσα μελέτη παρουσιάζει ικανοποιητική σύγκλιση μεταξύ των υπολογισμένων πιθανοτήτων και των συχνοτήτων των περιστατικών που αναφέρθηκαν. Ακόμη τα σενάρια που αναπτύχθηκαν περιγράφουν τις πιο σημαντικές επιδράσεις στις αναλυόμενες περιοχές. Επομένως η έρευνα δείχνει ότι η προτεινόμενη προσέγγιση που βασίζεται στο ρίσκο, η οποία χρησιμοποιεί συστηματικά συλλεγμένες και τεκμηριωμένες πληροφορίες για την απειλή, μπορεί να αυξήσει την ασφάλεια του πλοίου βοηθώντας

στην εκλογή επιλογών ελέγχου ρίσκου. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει επιπλέον μια καλύτερη κατανόηση της αιτιώδους συνάφειας μεταξύ της απειλής και του ρίσκου από αυτή που παρέχεται από τη σύγχρονη ανάλυση της ασφάλειας, για παράδειγμα από τους πλοιοκτήτες (Liwang et al., 2013).

Ο Garrick (1999) διεξήγαγε μια επιθεώρηση των μεθόδων εκτίμησης ρίσκου και των πρακτικών εντός και εκτός του πεδίου της ναυτιλίας, κατάλληλων για εφαρμογή στα θαλάσσια συστήματα. Σκοπός της επιθεώρησης είναι η χρήση της ποσοτικοποιημένης εκτίμησης ρίσκου να βελτιώσει την ασφάλεια των θαλάσσιων συστημάτων, μέσω της βελτιωμένης λήψης αποφάσεων. Τα θαλάσσια συστήματα που λαμβάνονται υπόψη είναι τα πλοία και οι υπεράκτιες πλατφόρμες. Γίνονται συγκρίσεις των μεθόδων εκτίμησης ρίσκου και των πρακτικών που χρησιμοποιούνται σε άλλους σημαντικούς βιομηχανικούς κλάδους όπως είναι ο χημικός, ο πυρηνικός, ο διαστημικός και ο αμυντικός. Τα θαλάσσια συστήματα έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά που είναι πολύ σημαντικά όσον αφορά στις μεθόδους εκτίμησης ρίσκου. Τέτοια είναι ο περιορισμός και η απομόνωση, η αυτοσυντήρηση και οι ακραίοι περιορισμοί αναφορικά με την ανάκτηση μετά από ατύχημα και την απόκριση εκτάκτου ανάγκης. Άλλα χαρακτηριστικά είναι η διαφοροποίηση των συστημάτων σε μέγεθος και πολυπλοκότητα, τα ακραία περιβάλλοντα και τα επικίνδυνα ή μη φορτία. Η επιθεώρηση εντόπισε ένα πλήθος ευκαιριών για βελτίωση των μεθόδων εκτίμησης ρίσκου που εφαρμόζονται στα θαλάσσια συστήματα. Μια πρωταρχική σύσταση είναι να αναπτυχθούν ισχυρότεροι δεσμοί με άλλες υπηρεσίες και με βιομηχανίες πιο εξελιγμένες στη χρήση των τεχνικών του ρίσκου στις ρυθμιστικές τους πρακτικές και στις βιομηχανικές τους δραστηριότητες. Παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι οι «U.S. Nuclear Regulatory Commission» και «U.S. Environmental Protection Agency». Παραδείγματα τέτοιων βιομηχανιών είναι η χημική, η πετρελαϊκή, η διαστημική και η αμυντική. Υπάρχουν πολλές ευκαιρίες για τη βελτίωση της χρήσης των τεχνικών ρίσκου στο ναυτιλιακό πεδίο. Αυτές περιλαμβάνουν την υιοθέτηση ενός γενικού πλαισίου εκτίμησης ρίσκου στις βασικές δραστηριότητες της εκτίμησης του θαλάσσιου ρίσκου, την επέκταση της διαχείρισης ρίσκου πέρα από τα ατυχήματα και τις διαρροές πετρελαίου στις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στο περιβάλλον (Garrick, 1999).

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αυξάνονται σε μέγεθος και εγκαθίστανται όλο και μακρύτερα από τις ακτές. Η απαίτηση για επισκέψεις συντήρησης και επισκευής, για μεταφορά προσωπικού και εξοπλισμού στις ανεμογεννήτριες αυξάνεται και η ασφαλής λειτουργία των πλοίων είναι απαραίτητη. Προς το παρόν, στη βιομηχανία υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, δίνεται λίγη προσοχή στις συγκρούσεις μεταξύ σκαφών εξυπηρέτησης και υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Dai et al., 2013). Οι Dai et al. (2013) προτείνουν ένα πλαίσιο εκτίμησης ρίσκου για τέτοιες συγκρούσεις και ερευνούν το μέγεθος του ρίσκου σύγκρουσης και σημαντικούς παράγοντες που επιδρούν στο ρίσκο. Συμπεραίνεται ότι συγκρούσεις μεταξύ ανεμογεννητριών και σκαφών εξυπηρέτησης ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες μπορούν να προκαλέσουν δομικές βλάβες στις ανεμογεννήτριες. Επισημαίνεται η ανάγκη για βελτιωμένη θεώρηση αυτού του είδους ρίσκου σύγκρουσης κατά τη σχεδίαση ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων.

Οι θαλάσσιες οδοί της Νότιας Κινεζικής Θάλασσας - ΝΚΘ (South China Sea) είναι μεγάλης σημασίας για το παγκόσμιο εμπόριο και την παγκόσμια οικονομία αλλά συχνά απειλούνται από φυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες, όπως περίπλοκη υποβρύχια τοπογραφία, ακραίες καιρικές συνθήκες και πειρατεία (Wang et al., 2014). Προηγούμενες μελέτες για τη ναυτιλιακή ασφάλεια στη ΝΚΘ κυρίως επικεντρώθηκαν στην ατομική ασφάλεια του κάθε πλοίου ξεχωριστά και σε ευρύτερες πολιτικές. Σε αυτή τη μελέτη οι συγγραφείς εφάρμοσαν χωρική ανάλυση για να εκτιμήσουν τη ναυτιλιακή ασφάλεια κατά το μήκος των γραμμών ναυσιπλοΐας. Αρχικά εξήγαγαν τις κύριες γραμμές ναυσιπλοΐας με χωρική ανάλυση των δεδομένων του «Voluntary Observing Ships». Κατόπιν διεξήγαγαν ποιοτική επισκόπηση για να επιλέξουν παράγοντες με επίδραση στην ασφάλεια των πλοίων στη ΝΚΘ, για την οποία τα δεδομένα διατέθηκαν από μια συγκρίσιμη χρονική περίοδο. Επιπλέον αναπτύχθηκαν συστήματα με ετήσια και εποχικά κριτήρια. Μετά από κανονικοποίηση και χαρτογράφηση των παραγόντων, εκτιμήθηκε το ετήσιο και το εποχικό ρίσκο του περιβάλλοντος ναυσιπλοΐας κατά μήκος των ναυτιλιακών γραμμών, χρησιμοποιώντας ασαφή μέθοδο πολλαπλών κριτηρίων σε πληροφοριακό περιβάλλον γεωγραφικών συστημάτων και επικυρώθηκε σε σύγκριση με αναφορές πραγματικών περιστατικών. Η μελέτη έδειξε ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι μια λογική μέθοδος εκτίμησης του ρίσκου του περιβάλλοντος ναυσιπλοΐας, τουλάχιστον στη ΝΚΘ, ότι η πλειοψηφία των ναυτιλιακών γραμμών με κατεύθυνση από ΝΔ προς ΒΑ αντανακλά μια τάση γραμμικής διεύθυνσης, ότι το ρίσκο του περιβάλλοντος ναυσιπλοΐας στη ΝΚΘ ελαττώνεται σταδιακά από βορρά προς νότο με μια χωρική κατανομή σχήματος – V και διαφέρει εποχικά και ότι με όρους ναυτιλιακού ρίσκου οι τέσσερις εποχές ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά ως εξής: άνοιξη, χειμώνας, καλοκαίρι, φθινόπωρο (Wang et al., 2014).

Το Στενό της Σιγκαπούρης θεωρείται το κώλυμα και το σημείο συμφόρησης των θαλάσσιων αρτηριών που συνδέουν τον Ινδικό με τον Ειρηνικό Ωκεανό. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση ρίσκου για σύγκρουση είναι εξέχουσας σημασίας για τα πλοία που περνούν από τη στενή, ρηχή και με αυξημένη κίνηση θαλάσσια οδό (Qu et al., 2011). Από τους Qu et al. (2011), αρχικά προτείνονται τρεις δείκτες ρίσκου σύγκρουσης για να εκτιμηθούν ποσοτικά οι κίνδυνοι σύγκρουσης στο στενό, ο δείκτης της διασποράς των ταχυτήτων, ο βαθμός επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και ο αριθμός της επικάλυψης των τομέων των πλοίων. Αυτοί οι τρεις δείκτες ρίσκου για το Στενό της Σιγκαπούρης εκτιμώνται χρησιμοποιώντας σε πραγματικό χρόνο τις τοποθεσίες των πλοίων και τις ταχύτητες πλεύσης που παρέχει το αυτόματο σύστημα ταυτοποίησης (Automatic Identification System – AIS) Lloyd’s MIU (πλέον Lloyd’s List Intelligence). Βασιζόμενοι στην εκτίμηση αυτών των τριών δεικτών ρίσκου, συμπεραίνεται ότι τα σκέλη (σύμφωνα με τον ορισμό τους) 4W, 5W, 11E και 12E είναι τα πιο επικίνδυνα σκέλη του στενού. Άρα οι λύσεις μείωσης του ρίσκου σύγκρουσης πλοίου θα πρέπει να ιεραρχηθούν βάζοντας σε προτεραιότητα την εφαρμογή τους σε αυτά τα τέσσερα σκέλη. Η μελέτη εντοπίζει ότι το 25% των σκαφών πλέον με ταχύτητες μεγαλύτερες του ορίου ταχύτητας, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες πιθανότητες σύγκρουσης. Η ανάλυση καταδεικνύει ότι το επίπεδο της

ασφάλειας θα βελτιωνόταν σημαντικά εάν όλα τα σκάφη ακολουθούσαν τις οδηγίες του περάσματος (Qu et al., 2011).

Οι πλοιοκτήτες αναπτύσσουν τις επιχειρήσεις τους σε μια ανταγωνιστική και ισχυρά ρυθμισμένη βιομηχανία. Για τους εφοπλιστές είναι σημαντικό να χρησιμοποιούν συστήματα διαχείρισης ώστε να μειώνουν πιθανές απειλές στα πληρώματα των πλοίων και στα φορτία που μεταφέρουν. Ο Karahalios (2014) ενισχύει τις αρχές διαχείρισης ρίσκου σε σχέση με τις οικονομικές ζημιές που σχετίζονται με τη σύγκρουση πλοίου. Προτείνεται μια μεθοδολογία η οποία εμπεριέχει ένα σύστημα διαχείρισης της επίδοσης για να μετρήσει τα αναμενόμενα κόστη και οφέλη μιας σύγκρουσης πλοίου, τα οποία προκύπτουν για τον πλοιοκτήτη του. Ως ουσιώδη μέρη της μεθοδολογίας της έρευνας, τα ασαφή σύνολα (Fuzzy sets) και η διαδικασία αναλυτικής ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process – AHP) αναφέρονται στη σχεδίαση δελτίων επιδόσεων, τα οποία εξακριβώνουν τα σημεία κλειδιά για την αποτροπή ατυχημάτων στα πλοία. Οι πλοιοκτήτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα αποτελέσματα για να εκτιμήσουν τα δικά τους συστήματα διαχείρισης, λαμβάνοντας υπόψη το οικονομικό βάρος που θα προκύψει σε αυτούς στην περίπτωση ενός περιστατικού σύγκρουσης. Στο άρθρο συζητούνται τα αναμενόμενα οφέλη της διαχείρισης ρίσκου, οι αρχικές αιτίες και οι συνέπειες των συγκρούσεων των bulk carriers (Karahalios, 2014).

Οι θαλάσσιες μεταφορές παρουσιάζουν ποικίλους κινδύνους σε όρους ανθρώπινης, περιβαλλοντικής και οικονομικής απώλειας. Σε μια ανάλυση ρίσκου σύγκρουσης, είναι σημαντικό να ληφθεί μια λογική εκτίμηση για την πιθανότητα τέτοιων ατυχημάτων και τις συνέπειες στις οποίες αυτά οδηγούν. Στη μελέτη των Goerlandt and Kujala (2011) προτείνεται μια μέθοδος για την εκτίμηση της πιθανότητας πλοίων, να συγκρουσθούν μεταξύ τους. Η μέθοδος έχει την ικανότητα να καθορίσει τον αναμενόμενο αριθμό των ατυχημάτων, τις τοποθεσίες και τον χρόνο στον οποίο αυτά είναι πιο πιθανό να συμβούν, ενώ παρέχει και δεδομένα προς επεξεργασία και σε μοντέλα που αφορούν τις αναμενόμενες συνέπειες. Στη βάση του αλγόριθμου εντοπισμού της σύγκρουσης υπάρχει μια εκτενής μικρο-προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου της κίνησης των σκαφών στη δεδομένη περιοχή. Η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo εφαρμόζεται για να αποκτηθεί μια ουσιαστική πρόβλεψη των σχετικών παραγόντων των περιστατικών σύγκρουσης. Δεδομένα που συλλέχθηκαν από το Αυτόματο Σύστημα Ταυτοποίησης (Automatic Identification System – AIS) αναλύθηκαν λεπτομερώς για να ληφθούν ρεαλιστικά δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση κυκλοφορίας: διαδρομές κυκλοφορίας, ο αριθμός των σκαφών σε κάθε διαδρομή, οι χρόνοι αναχώρησης των πλοίων, κύριες διαστάσεις και ταχύτητα πλεύσης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την προτεινόμενη μέθοδο για την μελέτη περίπτωσης του Κόλπου της Φινλανδίας, τα οποία δείχνουν μια λογική συμφωνία με τα δεδομένα των καταγεγραμμένων ατυχημάτων και των παρ' ολίγον ατυχημάτων (Goerlandt and Kujala, 2011).

Οι περισσότεροι από τους υπάρχοντες ορισμούς για τους τομείς πλοίου, έχουν συνολικά αξιολογηθεί και ταξινομηθεί. Οι πιο πολλοί από αυτούς περιγράφονται με έναν γεωμετρικό τρόπο ο οποίος είναι δύσκολο να εφαρμοσθεί σε προσομοιώσεις στη μηχανική της θαλάσσιας κυκλοφορίας. Σύμφωνα με τους διαφορετικούς τύπους των

γεωμετρικών τομέων του πλοίου, προτείνονται από τους Wang et al. (2009) μαθηματικά μοντέλα, με βάση τα οποία εδραιώνεται ένα ενοποιημένο αναλυτικό πλαίσιο. Είναι εφικτό και πρακτικό για τα αναλυτικά μοντέλα να εφαρμόζονται για την εκτίμηση της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας, την αποφυγή της σύγκρουσης, τον σχεδιασμό της τροχιάς του πλοίου, κλπ. Παρουσιάζονται μερικές προσομοιώσεις σε υπολογιστή και συγκριτικές μελέτες του προτεινόμενου μοντέλου τομέα πλοίου και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ενοποιημένο αναλυτικό πλαίσιο για τους τομείς του πλοίου είναι αποτελεσματικό και πανομοιότυπο με τους αρχικούς γεωμετρικούς τομείς. Σημειώνεται ότι τα μοντέλα του αναλυτικού τομέα μπορούν να εφαρμοσθούν απευθείας για οποιονδήποτε κίνδυνο σύγκρουσης, για την αποφυγή της σύγκρουσης ή σε κάποιο σύστημα VTS (Vessel Traffic Service), ενώ τα γεωμετρικά μοντέλα θα ήταν πιο επεξηγηματικά αλλά λιγότερο πρακτικά στην εφαρμογή τους από το αναλυτικό (Wang et al., 2009).

Οι Montewka et al. (2011a) προτείνουν μία συγκριτική μέθοδο για την εκτίμηση του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας, ενός γεωμετρικού μοντέλου υπολογισμού της πιθανότητας σύγκρουσης πλοίου με πλοίο. Τα αποκτηθέντα αποτελέσματα από το μοντέλο συγκρίνονται με τα αποτελέσματα μίας ανάλυσης των παρ' ολίγον συγκρούσεων βασισμένης σε καταγεγραμμένα δεδομένα AIS και κατόπιν με ιστορικά δεδομένα θαλάσσιων ατυχημάτων στον Κόλπο της Φινλανδίας. Ο παράγοντας αιτιώδους συνάφειας αποκτάται για τρεις διαφορετικούς τύπους συνάντησης, για μία επιλεγμένη τοποθεσία και τις επικρατούσες κυκλοφοριακές συνθήκες σε αυτήν.

Διεξάγεται μία μελέτη από τους Montewka et al. (2011b) πάνω σε ένα νέο γεωμετρικό μοντέλο για την εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης πλοίου με πλοίο. Τα περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τις συγκρούσεις πλοίων θεωρούν ως σύγκρουση μία φυσική επαφή μεταξύ των πλοίων. Το μοντέλο που συζητείται στην εργασία ορίζει το κριτήριο σύγκρουσης με έναν νέο τρόπο. Υπολογίζεται, με τη χρήση ενός μοντέλου της κίνησης του πλοίου, μία κρίσιμη απόσταση μεταξύ δύο πλοίων που συναντώνται στην οποία μία τέτοια κατάσταση συνάντησης μπορεί να θεωρηθεί ως σύγκρουση. Αυτή η κρίσιμη απόσταση ονομάζεται ελάχιστη απόσταση για τη σύγκρουση (Minimum Distance to Collision – MDTC). Στο άρθρο συζητείται το πλήθος των παραγόντων που επηρεάζουν τη τιμή της MDTC, όπως ο τύπος πλοίου, η γωνία διασταύρωσης των τροχιών των πλοίων, οι σχετικοί άξονες μεταξύ των πλοίων που συναντώνται και οι πρότυπες διαδικασίες ελιγμών.

Οι Montewka et al. (2012) διεξάγουν μια μελέτη που οδηγεί σε ένα νέο ορισμό του κριτηρίου σύγκρουσης πλοίου με πλοίο, επιτρέποντας την περαιτέρω εκτίμηση της πιθανότητας θαλάσσιων ατυχημάτων. Το κριτήριο ονομάζεται Minimum Distance to Collision (MDTC) και αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δύο πλοία στην οποία πρέπει να προχωρήσουν σε ενέργειες αποφυγής της σύγκρουσης. Το νέο κριτήριο εκτιμάται μέσα από μια σειρά από προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο κίνησης του πλοίου για ένα εύρος τύπων πλοίων, διαδρομών και ταχυτήτων καταδεικνύοντας έτσι τη δυναμική του φύση. Ανταποκρίνεται στα περιστατικά διασταύρωσης πλοίου με πλοίο. Επιπλέον, αυτή η μελέτη ορίζει έναν παράγοντα αιτιώδους συνάφειας, ο οποίος συμβάλλει στην

ποσοτικοποίηση της αναλογίας των περιπτώσεων στις οποίες δύο πλοία που συναντώνται καταλήγουν να συγκρουστούν. Αυτός ο παράγοντας αποκτάται στην πορεία της ανάλυσης της θαλάσσιας κυκλοφορίας και των στατιστικών των ατυχημάτων. Εφαρμόζεται μια συγκριτική μέθοδος και οι παράγοντες αιτιώδους συνάφειας καθορίζονται για τρεις τύπους συνάντησης (μετωπική, διασταυρούμενη και κατά την προσπέραση). Οι παράγοντες αιτιώδους συνάφειας που αποκτώνται είναι έγκυροι για το μοντέλο της ελάχιστης απόστασης για τη σύγκρουση (MDTC), σε επιλεγμένη τοποθεσία και επιλεγμένες επικρατούσες συνθήκες κυκλοφορίας. Περιγράφονται και συζητούνται οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το κριτήριο ελάχιστης απόστασης για την σύγκρουση (MDTC) και τα σχετικά βήματα για την εκτίμηση αυτών των παραγόντων (Montewka et al., 2012).

Η ακριβής αξιολόγηση της κατάστασης της θαλάσσιας κυκλοφορίας είναι σημαντική για την ασφαλή ναυσιπλοΐα, ωστόσο η παραδοσιακή παρατήρηση και ανάλυση της θαλάσσιας κυκλοφορίας δεν είναι έτοιμη για την άμεση υπόδειξη των επικίνδυνων για τη ναυσιπλοΐα περιοχών (Pan et al., 2012). Οι Pan et al. (2012) προτείνουν ένα νέο μοντέλο απεικόνισης για την αξιολόγηση της κατάστασης της θαλάσσιας κυκλοφορίας βασισμένο στο Αυτόματο Σύστημα Ταυτοποίησης (Automatic Identification System - AIS) του πλοίου. Ο ρυθμός μεταβολής της στρέψης του πλοίου, ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας και ο ρυθμός συναντήσεων με άλλα πλοία ενσωματώνονται σε ένα νέο δείκτη ο οποίος υποδεικνύει τις σχετικά επικίνδυνες για τη ναυσιπλοΐα περιοχές. Το νέο μοντέλο εφαρμόστηκε για την ανάλυση των συνθηκών θαλάσσιας κυκλοφορίας του Κόλπου Χιαμεν και της θαλάσσιας περιοχής Meizhou Wan και αποδείχθηκε να είναι πρακτικό και χρήσιμο, κατά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων και τη διαχείριση, από τις ναυτιλιακές αρχές και τους ναυτικούς.

Ο Szlapczynski (2006) εισάγει ένα καινούριο μέτρο για το ρίσκο σύγκρουσης το οποίο προέρχεται από την ιδέα του τομέα του πλοίου. Η απλότητα του και το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη τις πορείες και των δύο πλοίων, το καθιστά μία καλή εναλλακτική στον ευρέως χρησιμοποιούμενο όρο DCPA (Distance to the Closest Point of Approach). Το μέτρο που παρουσιάζεται είναι αρκετά ευέλικτο για να εφαρμοσθεί σε συνδυασμό με κάθε δεδομένο τομέα πλοίου. Παρουσιάζεται λεπτομερώς πως προκύπτουν οι μαθηματικοί τύποι της παρούσας μελέτης από όλες τις απαραίτητες εξισώσεις του τομέα πλοίου του Fujii. Επιπλέον στην εργασία περιέχονται αριθμητικοί αλγόριθμοι ικανοί να προσδιορίσουν την τιμή, του νέου αυτού μέτρου για το ρίσκο σύγκρουσης, για οποιονδήποτε άλλο τομέα πλοίου. Με βάση αυτούς του αλγορίθμους αναπτύσσεται μία γενική μέθοδος για τον καθορισμό της απαραίτητης μεταβολής της πορείας. Ακόμη παρέχεται ένα παράδειγμα ενός ήδη γνωστού τύπου για την εκτίμηση ρίσκου, ο οποίος μπορεί να βελτιωθεί από το μέτρο που παρουσιάζεται. Όλοι οι αλγόριθμοι, οι τύποι και τα παράγωγα τους παρουσιάζονται ρητά, ώστε να μπορούν να εφαρμοσθούν απευθείας σε οποιοδήποτε σύστημα αποφυγής σύγκρουσης ή VTS (Vessel Traffic Service) (Szlapczynski, 2006).

Από τον Wang (2010) προτείνεται ένα νέο μοντέλο για τον τομέα του πλοίου που ορίζεται ως Quaternion Ship Domain (QSD). Σε αντίθεση με άλλους τομείς

πλοίου, ο προτεινόμενος QSD είναι πιο αξιόπιστος και ευέλικτος στη χρήση του από τους ναυτικούς για τη λήψη αποφάσεων. Τα κύρια χαρακτηριστικά είναι τα εξής: το μέγεθος του τομέα καθορίζεται από το τετραδόνιο (quaternion) το οποίο περιλαμβάνει τέσσερις ακτίνες, την προωαία, πρυμναία, δεξιά, αριστερή, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη ικανοποιητικά τους παράγοντες που επηρεάζουν τον τομέα (π.χ. ελικτικές ικανότητες του πλοίου, ταχύτητες, πορείες, κλπ)· το σχήμα του τομέα μοντελοποιείται από μία άλλη παράμετρο η οποία καθιστά το QSD πιο ευέλικτο καθώς το όριο του πλοίου δεν μπορεί πλέον να είναι μόνο γραμμικό ή μη γραμμικό αλλά επίσης σχετικά στενό ή πλατύ. Για να συσχετισθεί ο προτεινόμενος τομέας QSD με πρακτικές εφαρμογές όπως η εκτίμηση του ρίσκου σύγκρουσης, η αποφυγή σύγκρουσης και ο σχεδιασμός της τροχιάς αναπτύχθηκε ένας ασαφής τομέας QSD (Fuzzy Quaternion Ship Domain – FQSD) χρησιμοποιώντας ασαφή σύνολα (fuzzy sets). Τα ασαφή όρια (fuzzy boundaries) του τομέα FQSD είναι πιο πρακτικά, για τους θαλασσοπόρους ώστε να εκτιμήσουν και να κρίνουν, από τα καλά ορισμένα όρια (crisp boundaries) καθώς η αβεβαιότητα και η ασαφής πληροφορία έχουν συγχωνευθεί στον τομέα FQSD. Ακόμη εισάγονται οι ιδέες του διαμήκους και του πλευρικού ρίσκου με βάση τον τομέα FQSD, για την εκτίμηση του χωρικού ρίσκου σύγκρουσης (Spatial Collision Risk – SCR) των πλοίων που συναντώνται. Έχουν διεξαχθεί πολλαπλές προσομοιώσεις σε υπολογιστή για ποικίλες περιπτώσεις συνάντησης και έχουν αναλυθεί εκτενώς συγκριτικές μελέτες με άλλους τομείς πλοίου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι ο προτεινόμενος τομέας QSD είναι πιο αποτελεσματικός και ευέλικτος από άλλους τομείς πλοίου και το χωρικό ρίσκο σύγκρουσης (SCR) βασισμένο στον τομέα FQSD είναι αξιόπιστο (Wang, 2010).

Η ασφαλής ναυσιπλοΐα, ειδικά σε στενές θαλάσσιες οδούς, είναι υψίστης σημασίας για τους ερευνητές καθώς και για τις ναυτιλιακές αρχές. Πολλοί ερευνητές και επαγγελματίες διεξήγαγαν μελέτες για την εκτίμηση του ρίσκου θαλασσιών μεταφορών και πρότειναν αντιστοίχως μέτρα μείωσης και ελέγχου του ρίσκου. Η εργασία των Li et al. (2012) παρέχει μία λεπτομερή επισκόπηση και αξιολόγηση των μοντέλων για τις θαλάσσιες οδούς. Ογδόντα επτά ακαδημαϊκά άρθρα και εκθέσεις έργων συνοψίζονται και συζητούνται. Η επισκόπηση προβαίνει στην ανάλυση της συχνότητας και την εκτίμηση των συνεπειών των μοντέλων ξεχωριστά. Συνοψίζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των μοντέλων εκτίμησης της συχνότητας και παρέχει συστάσεις για την εφαρμογή τους. Από την επισκόπηση εντοπίζεται ότι η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων του ανθρώπινου λάθους είναι μεγάλης σημασίας και θα έπρεπε να λαμβάνεται υπόψη στις μελλοντικές μελέτες, επίσης προτείνονται πιθανές λύσεις (Li et al., 2012).

Ο Κόλπος της Φινλανδίας είναι γεωγραφικά τοποθετημένος ανάμεσα σε φινλανδικά και εσθονικά ύδατα. Ο πυθμένας ποικίλει σε βάθος και υπάρχει ένα πλήθος υποθαλάσσιων βράχων στη περιοχή του φινλανδικού αρχιπελάγους. Η θαλάσσια κυκλοφορία τα τελευταία χρόνια αυξάνεται στην περιοχή, ειδικά λόγω της ραγδαίας αύξησης της μεταφοράς φορτίων προς τη Ρωσία και τη μεταφορά κυρίως πετρελαίου από αυτή. Στην μελέτη των Kujala et al. (2009) αναλύεται η ασφάλεια της θαλάσσιας κυκλοφορίας στον Κόλπο της Φινλανδίας. Αρχικά περιγράφονται

αναλυτικά στατιστικά των τελευταίων 10 ετών και μετά μελετάται το ρίσκο σύγκρουσης με θεωρητική μοντελοποίηση σε δύο περιοχές. Τελικά τα αποτελέσματα των θεωρητικών μοντέλων συγκρίνονται με τα στατιστικά των πραγματικών ατυχημάτων. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο κυρίαρχος τύπος ατυχήματος σε αυτά τα ύδατα παίρνει μία τυπική τιμή 11 προσαράξεων ανά έτος, από τις οποίες η μία είναι προσάραξη δεξαμενόπλοιου. Για τις συγκρούσεις το υψηλότερο ρίσκο προκαλείται από την κυκλοφορία των επιβατηγών πλοίων και πλοίων RoPax ανάμεσα στο Ελσίνκι και το Ταλλίν μαζί με την, υψηλής πυκνότητας, κυκλοφορία από και προς τα ρωσικά λιμάνια. Τα θεωρητικά μοντέλα σύγκρουσης δίνουν καλά αποτελέσματα συγκρινόμενα με τα στατιστικά των ατυχημάτων. Για τον υπολογισμό των γεωμετρικών πιθανοτήτων σύγκρουσης χρησιμοποιούνται δεδομένα AIS ([Kujala et al., 2009](#)).

Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών αναπτύχθηκαν πολλές τεχνικές για την ποσοτική μελέτη της ανθρώπινης αξιοπιστίας. Τη δεκαετία του 1980 αναπτύχθηκαν τεχνικές για τη μοντελοποίηση συστημάτων με τη χρήση δυαδικών δένδρων (binary trees), οι οποίες όμως δεν επέτρεπαν την αντιπροσώπευση του γενικότερου πλαισίου στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι ανθρώπινες ενέργειες. Αυτές οι τεχνικές δεν είναι ικανές να μοντελοποιήσουν την αντιπροσώπευση των ατόμων, την αλληλοσυσχέτιση τους και την δυναμική ενός συστήματος. Αυτά τα ζητήματα κατέστησαν αναγκαία την βελτίωση των μεθόδων Ανάλυσης Ανθρώπινης Αξιοπιστίας (Human Reliability Analysis – HRA). Για την εξάλειψη ή τουλάχιστον την μείωση αυτών των περιορισμών, μερικοί συγγραφείς πρότειναν συστήματα μοντελοποίησης με τη χρήση Bayesian Belief Networks. Η εφαρμογή αυτών των εργαλείων αναμένεται να αντιμετωπίσει πολλές από τις ελλείψεις στις μέχρι τώρα προσεγγίσεις στη μοντελοποίηση του ανθρώπινου παράγοντα με δυαδικά δένδρα. Οι [Martins and Maturana \(2013\)](#) παρουσιάζουν μία μεθοδολογία βασισμένη σε Bayesian Belief Networks για την ανάλυση της ανθρώπινης αξιοπιστίας και εφαρμόζουν αυτή τη μέθοδο στη λειτουργία ενός πετρελαιοφόρου, επικεντρώνοντας στο ρίσκο ατυχημάτων σύγκρουσης. Το αποκτηθέν μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της πιθανότερης ακολουθίας των επικίνδυνων συμβάντων και με αυτόν τον τρόπο την απομόνωση των κρίσιμων δραστηριοτήτων κατά τη λειτουργία του πλοίου και ακόμη για την μελέτη των εσωτερικών παραγόντων (Internal Factors – IFs), των δεξιοτήτων, των οργανωτικών και διοικητικών παραγόντων (Management and Organizational Factors – MOFs), στους οποίους θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή για την μείωση του ρίσκου ([Martins and Maturana, 2013](#)).

Παρουσιάζεται από τους [Talavera et al. \(2013\)](#) μία νέα μέθοδος για την ποσοτικοποίηση της εγγενούς αβεβαιότητας των διαδρομών που θα ακολουθήσουν τα πλοία στο μέλλον, από τις πληροφορίες που παρέχει το σύστημα δεδομένων AIS σχετικά με τις διαδρομές που ακολούθησαν τα πλοία στο παρελθόν. Στο πλαίσιο της θεωρίας των Dempster-Shafer, η προτεινόμενη μέθοδος αναλύει τις πληροφορίες που περιέχονται σε μία γνωστή κατανομή της κυκλοφορίας των πλοίων σε μία θαλάσσια οδό, για την κατασκευή της αντίστοιχης δομής Dempster-Shafer. Από αυτή τη δομή, χρησιμοποιώντας τα όρια εμπιστοσύνης των Kolmogorov-Smirnov, είναι δυνατή η εκτίμηση των αποδεικτικών μέτρων (belief and plausibility) όλων των δυνατών

κατανομών της κυκλοφορίας σε αυτήν τη θαλάσσια οδό. Τα ενδιαφέροντα γεγονότα αυτής της πρότασης είναι ότι αυτά τα αποδεικτικά μέτρα είναι, σύμφωνα με την πιθανολογική ερμηνεία του Dempster, τα άνω και κάτω όρια ενός διαστήματος το οποίο περιέχει μελλοντικές κατανομές της θαλάσσιας κυκλοφορίας στην υπό εξέταση θαλάσσια οδό. Κατά συνέπεια συμπεραίνεται ότι η γνώση της κυκλοφορίας σε μία θαλάσσια οδό για μία δεδομένη περίοδο επιτρέπει την οριοθέτηση, με έναν ορισμένο βαθμό εμπιστοσύνης, της αβεβαιότητας που σχετίζεται με την τυχαιότητα των τροχιών που ακολουθούν τα πλοία κατά περιόδους ίσης διάρκειας. Παρουσιάζονται τα αποκτηθέντα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για την μελέτη περίπτωσης των Κανάριων Νήσων, τα οποία παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία με τα αποκτηθέντα αποτελέσματα από το λογισμικό IWRAP Mk2 (Talavera et al., 2013).

Η εργασία του Brown (2002) εξετάζει την επίδραση τυχαίων μεταβλητών του σεναρίου σύγκρουσης στην έκταση της βλάβης στις συγκρούσεις πλοίων. Η ταχύτητα του προσκρούοντος πλοίου (striking ship) και του προσκρουόμενου πλοίου (struck ship), η γωνία της σύγκρουσης, ο τύπος και το εκτόπισμα του προσκρούοντος πλοίου (striking ship) αντιμετωπίζονται σαν ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Άλλα χαρακτηριστικά του πλοίου αντιμετωπίζονται σαν εξαρτημένες μεταβλητές οι οποίες προκύπτουν από ανεξάρτητες μεταβλητές που βασίζονται σε σχέσεις που αναπτύσσονται από παγκόσμια δεδομένα για τα πλοία. Χρησιμοποιείται ένα Απλοποιημένο Μοντέλο Σύγκρουσης (Simplified Collision Model – SIMCOL) για την εκτίμηση της ευαισθησίας της πιθανολογικής έκτασης της βλάβης σε αυτές τις μεταβλητές. Το SIMCOL εφαρμόζει τις μεταβλητές του σεναρίου σύγκρουσης απευθείας σε μια σταδιακή, κατά τη διάσταση του χρόνου, ταυτόχρονη επίλυση των εσωτερικών (δομικών) και των εξωτερικών (του πλοίου) προβλημάτων. Κατά την ταυτόχρονη επίλυση το SIMCOL υπολογίζει ακόμη την απορροφώμενη ενέργεια του προσκρούοντος (striking ship) και του προσκρουόμενου (struck ship) πλοίου, κατά την διαμήκη και την κάθετη διεύθυνση. Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκτιμήσεις απορροφώμενης ενέργειας βασισμένες αποκλειστικά στη μη συζευγμένη εξωτερική δυναμική. Κατόπιν εξετάζεται η αναγκαιότητα και η αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης (Brown, 2002).

Οι Zhu et al. (2001) παρουσιάζουν μία έννοια για τον υποκειμενικό τομέα του πλοίου. Συζητούνται οι παράγοντες που σχετίζονται με τον τομέα. Χρησιμοποιείται μία μέθοδος βασισμένη σε νευρωνικά δίκτυα για την καθιέρωση ενός μοντέλου του τομέα πλοίου που λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της ορατότητας και της ελκτικότητας, οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν εντός ενός εύρους και εντός μικρού χρονικού διαστήματος (Zhu et al., 2001).

Η αύξηση της πιθανότητας σύγκρουσης εντός λιμενικών υδάτων οδήγησε στην ανάπτυξη διαδικασίας αποφυγής σύγκρουσης στα πλαίσια της ασφάλειας της κυκλοφορίας εντός των λιμανιών. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο επί του σκάφους σύστημα αποφυγής της σύγκρουσης είναι το Automatic Radar Plotting Aid, το οποίο είναι ένα παθητικό σύστημα προειδοποίησης το οποίο ενεργοποιεί ένα συναγερμό με βάση τις προκαθορισμένες από τον πλοηγό ενδείξεις για την χωρική και χρονική εγγύτητα στο πλησιέστερο σημείο συνάντησης με τα παραπλέοντα σκάφη. Για την

διευκόλυνση του πλοηγού στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε καταστάσεις μεγάλης εγγύτητας, το ρίσκο σύγκρουσης θα πρέπει να θεωρείται σαν μία συνεχής και μονότονη συνάρτηση της εκάστοτε εγγύτητας και η αντίληψη του ρίσκου θα πρέπει να θεωρείται πιθανολογικά (Chin and Debnath, 2009). Η μελέτη των Chin and Debnath (2009) εξάγει ένα μοντέλο για το αντιληπτό ρίσκο σύγκρουσης βασισμένο στη μέθοδο Ordered Probit Regression. Για την απεικόνιση της διαδικασίας, αποκτήθηκαν οι αντιληφθέντες κίνδυνοι από τους πλοηγούς του λιμένα της Σιγκαπούρης ώστε να βαθμονομηθεί το μοντέλο της παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ένα πλαίσιο βασισμένο στο πιθανολογικό μοντέλο εκτίμησης του ρίσκου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την καλύτερη κατανόηση του ρίσκου σύγκρουσης και να ορισθεί ένα καταλληλότερο επίπεδο για τις ενέργειες αποφυγής της σύγκρουσης (Chin and Debnath, 2009).

Για τους μηχανικούς, το ρίσκο ορίζεται ως το γινόμενο της πιθανότητας εμφάνισης ενός ανεπιθύμητου συμβάντος με τις αναμενόμενες συνέπειες σε όρους ανθρώπινης, οικονομικής και οικολογικής απώλειας. Αυτά τα δύο συστατικά είναι εξίσου σημαντικά, ως εκ τούτου η σωστή εκτίμηση αυτών των τιμών είναι μεγάλης σημασίας (Montewka et al., 2010). Η εργασία των Montewka et al. (2010) επικεντρώνεται στο ένα από τα δύο συστατικά, την εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης πλοίων, παρουσιάζοντας μία νέα προσέγγιση για τη γεωμετρική πιθανότητα σύγκρουσης βασισμένη στην πείρα από τη ναυσιπλοΐα και την αεροπλοΐα. Το γεωμετρικό μοντέλο που παρουσιάζεται από αυτή τη μελέτη λαμβάνει υπόψη καταγεγραμμένα δεδομένα θαλάσσιας κυκλοφορίας και τη γενικευμένη δυναμική του πλοίου ενώ χρησιμοποιεί προηγμένες στατιστικές μεθόδους και μεθόδους βελτιστοποίησης (Monte Carlo, genetic algorithms). Τα αποκτηθέντα αποτελέσματα από το μοντέλο συγκρίνονται με καταγεγραμμένα δεδομένα για τη θαλάσσια κυκλοφορία στον Κόλπο της Φινλανδίας με τα οποία έρχονται σε ικανοποιητική συμφωνία (Montewka et al., 2010).

Λόγω της υψηλής πυκνότητας της κυκλοφορίας, οι θαλάσσιες οδοί αποτελούν περιοχές όπου η πιθανότητα σύγκρουσης είναι μεγάλη. Η εφαρμογή AIS (Automatic Identification System) καθιστά δυνατή τη διερεύνηση της ακριβούς συμπεριφοράς των εμπλεκόμενων στη σύγκρουση πλοίων και συμβάλλει στη διαχείριση της κυκλοφορίας και στη σχεδίαση των θαλάσσιων οδών (Mou et al., 2010). Ως μελέτη περίπτωσης, οι Mou et al. (2010) επικεντρώνονται σε ένα Σχέδιο Διαχωρισμού Κυκλοφορίας (Traffic Separation Scheme – TSS) για τον λιμένα του Ρότερνταμ στην Ευρώπη και διεξάγεται, χρησιμοποιώντας δεδομένα AIS, στατιστική ανάλυση για τα εμπλεκόμενα σε σύγκρουση πλοία. Για την ταυτοποίηση της συσχέτισης του CPA (Closest Point of Approach), ο οποίος είναι ένας δείκτης-κλειδί για την αποφυγή της σύγκρουσης, με το μέγεθος του πλοίου, την ταχύτητα και την πορεία, αναπτύσσονται μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης. Για την εκτίμηση του ρίσκου παρουσιάζεται μία δυναμική μέθοδος βασισμένη στο μοντέλο SAMSON (Mou et al., 2010).

Ένα από τα βασικά καθήκοντα στη ναυτιλία είναι η διασφάλιση της ασφαλούς ναυσιπλοΐας των πλοίων. Η ιδέα του τομέα του πλοίου έχει μεγάλη σημασία για την εκτίμηση μίας κατάστασης πλεύσης και την αποφυγή της σύγκρουσης πλοίων. Είναι

δύσκολο να καθοριστεί ένας τομέας πλοίου καθώς το σχήμα του και το μέγεθος του εξαρτώνται από ένα πλήθος παραγόντων. Ένα ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί πριν τον καθορισμό του τομέα του πλοίου είναι ποιά μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί: στατιστική, αναλυτική ή η γνώμη των ειδικών με τη χρήση εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης. Άλλα ερωτήματα που προκύπτουν σχετίζονται με την ερμηνεία του τομέα. Οι [Pietrzykowski and Uriasz \(2009\)](#) αναλύουν τον τομέα του πλοίου ως ένα κριτήριο για την εκτίμηση της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας σε μία κατάσταση συνάντησης πλοίων σε ανοιχτή θάλασσα. Με τη χρήση των αποτελεσμάτων της έρευνας απαντώνται μερικά από τα ερωτήματα που τέθηκαν παραπάνω. Το δεύτερο μέρος της μελέτης περιλαμβάνει ορισμούς του τομέα του πλοίου και του ασαφούς τομέα (fuzzy ship domain). Το τρίτο μέρος παρουσιάζει μεθόδους για τον καθορισμό τους καθώς και σχετικά ερωτήματα. Τα αποτελέσματα της έρευνας που περιγράφονται στο τέταρτο μέρος, συνθέτουν μία βάση για τον καθορισμό του τομέα και του ασαφούς τομέα του πλοίου. Αυτά καθορίστηκαν με σημείο εκκίνησης τους αποκαλούμενους δυναμικούς τομείς. Συζητούνται τα κριτήρια του τομέα πλοίου και του CPA (Closest Point of Approach). Στο πέμπτο μέρος λαμβάνονται υπόψη συναντήσεις πλοίων ποικίλων μεγεθών και περιγράφεται η έρευνα και τα αποτελέσματα της. Ακόμη αναλύονται οι τομείς των πλοίων που συναντώνται και οι ασαφείς τους τομείς. Στη συνέχεια εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των μεγεθών των πλοίων που συναντώνται επί του σχήματος και του μεγέθους των τομέων τους. Τα τελικά συμπεράσματα δίνονται στο έκτο μέρος ([Pietrzykowski and Uriasz, 2009](#)).

Οι [Weng et al. \(2012\)](#) διεξάγουν μία εκτίμηση της συχνότητας σύγκρουσης πλοίων στο Στενό της Σιγκαπούρης. Η συχνότητα αυτή αποκτάται ως το γινόμενο του πλήθους των σκαφών που βρίσκονται σε πιθανή πορεία σύγκρουσης, με την πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας χρησιμοποιώντας δεδομένα για την κίνηση των σκαφών από τη βάση δεδομένων Lloyd's Marine Intelligence Unit (Lloyd's MIU). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα πλοία τύπου container carriers εμφανίζουν την υψηλότερη συχνότητα σύγκρουσης ενώ αυτά του τύπου Roll-On Roll-Off (RORO) και τα επιβατηγά εμφανίζουν την χαμηλότερη συχνότητα. Τα δεξαμενόπλοια προκαλούν την υψηλότερη συχνότητα μετωπικής σύγκρουσης. Στο Στενό της Σιγκαπούρης, η πιο επικίνδυνη για σύγκρουση κατά την προσπέραση περιοχή βρίσκεται μεταξύ των γεωγραφικών μηκών  $103^{\circ}48'E$  και  $104^{\circ}12'E$ . Η πιο επικίνδυνη για μετωπική σύγκρουση περιοχή βρίσκεται μεταξύ των γεωγραφικών μηκών  $103^{\circ}50'E$  και  $104^{\circ}00'E$  ενώ οι περισσότερες συγκρούσεις κατά τη διασταύρωση συμβαίνουν μεταξύ των γεωγραφικών μηκών  $103^{\circ}50'E$  και  $104^{\circ}12'E$ . Η συχνότητα σύγκρουσης σκαφών (Vessel Collision Frequency) βρίσκεται να είναι 1.75 ανά έτος στις λωρίδες κυκλοφορίας. Προς το παρόν, η προς τα δυτικά κυκλοφορία στο στενό είναι πιο επικίνδυνη από την κυκλοφορία προς τα ανατολικά (το πλήθος των συγκρούσεων με κατεύθυνση δυτική τον Ιούλιο του 2012 ήταν 0.0991 ενώ το αντίστοιχο πλήθος για συγκρούσεις με κατεύθυνση ανατολική ήταν 0.0470). Ακόμη, η εκτιμώμενη συχνότητα σύγκρουσης σκαφών κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη από την αντίστοιχη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα αποτελέσματα της μελέτης θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα για τις ναυτιλιακές και λιμενικές αρχές

της Σιγκαπούρης για την περαιτέρω ενίσχυση των στρατηγικών ασφάλειας της ναυσιπλοΐας που εφαρμόζονται στο Στενό της Σιγκαπούρης (Weng et al., 2012).

Στην εργασία των Hanninen and Kujala (2010) μελετάται η ασφάλεια της θαλάσσιας κυκλοφορίας στον Κόλπο της Φινλανδίας εξετάζοντας τις εκτιμήσεις για την πιθανότητα σύγκρουσης σε μία επιβαρυμένη από άποψη κυκλοφορίας περιοχή διασταυρούμενης διέλευσης. Σε μία ευρέως εφαρμοζόμενη προσέγγιση για την εκτίμηση της πιθανότητας ατυχημάτων σύγκρουσης, το πλήθος των αποκαλούμενων υποψηφιοτήτων σύγκρουσης πολλαπλασιάζεται με την τιμή της αποκαλούμενης πιθανότητας αιτιώδους συνάφειας (causation probability). Στη μελέτη εφαρμόζεται ένα μοντέλο για την εκτίμηση της πιθανότητας αιτιώδους συνάφειας, βασισμένο σε ένα Δίκτυο Πίστης (Bayesian Belief Network), όπου οι παράμετροι λαμβάνουν διάφορες τιμές ώστε να εξετασθούν οι επιδράσεις του καιρού και του ανθρώπινου παράγοντα στην πιθανότητα σύγκρουσης, κατά τη διασταύρωση των σκαφών που κινούνται στο πέρασμα Ελσίνκι-Ταλλίν και εκείνων που κινούνται προς την ανατολή ή προς τη δύση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η πιθανότητα σύγκρουσης είναι ιδιαίτερος ευαίσθητη στην τιμή της πιθανότητας αιτιώδους συνάφειας οπότε η μοντελοποίηση θα πρέπει να γίνεται με προσοχή ώστε να αποκτηθούν αξιόπιστα αποτελέσματα (Hanninen and Kujala, 2010).

Η σύγκρουση πλοίων αποτελεί μία από τις κύριες κατηγορίες ατυχημάτων στις θαλάσσιες μεταφορές, με σημαντική ετήσια εμφάνιση που πάντα προκαλεί σοβαρές απώλειες. Ανάμεσα στα στοιχεία που μπορούν να διευκολύνουν την έρευνα, δεδομένα AIS που καταγράφηκαν εντός του γενικότερου πλαισίου της σύγκρουσης αποτελούν σημαντική πηγή πληροφοριών. Η μελέτη των Wang et al. (2013) εκμεταλλεύεται τα σχετικά δεδομένα AIS από μία συζευγμένη χώρο-χρονικά προοπτική. Με τα διακριτά σημεία διέλευσης καθορισμένα από τα δεδομένα AIS, οι τροχιές των συγκρουόμενων πλοίων αναπαράγονται με βάση τρεις συλλογιστικούς παράγοντες: (1) την αποφυγή της επικείμενης σύγκρουσης, όπως γίνεται αντιληπτή από το κάθε πλοίο κατά το σενάριο που επάγει τη σύγκρουση όταν δύο πλοία πλησιάζουν, (2) τον βαθμό στον οποίο τα δύο πλοία μπορούν να κάνουν εκτίμηση της κατάστασης και να διεξάγουν πρακτικά δυνατούς ελιγμούς ώστε να απομακρυνθούν, (3) το πώς γίνεται η αξιολόγηση της ποιότητας της απόφασης για την διαδικασία της ηδαιλιουχίας και το πώς μετράται η συνοχή ανάμεσα στις υποκειμενικές προσπάθειες και τα αντικειμενικά αποτελέσματα στο γενικότερο πλαίσιο των αμφίπλευρων ελιγμών αποφυγής της σύγκρουσης. Σύμφωνα με την περιοδική φύση των δεδομένων AIS, ο χρόνος χωρίζεται σε τμήματα ώστε να γίνει χρονική ανάλυση και να εξαχθεί η αλληλουχία των αποφάσεων που λαμβάνονται από τα δύο πλοία. Η μέθοδος των ασαφών συνόλων υιοθετείται για την εκτίμηση της ποιότητας των αποφάσεων και μία μέθοδος βασισμένη στη θεωρία των Dempster-Shafer (Dempster-Shafer Theory) εφαρμόζεται για να συγχωνευτεί η διάκριση ανάμεσα στο πεδίο του χρόνου και του χώρου, έτσι ώστε η συνολική επίδραση της συμπεριφοράς των δύο πλοίων να μπορέσει να υπολογιστεί. Αυτή η μελέτη παρουσιάζει ένα μικροσκοπικό-αναλυτικό σχέδιο για την διερεύνηση ενός ατυχήματος σύγκρουσης δύο πλοίων και το προτεινόμενο σχέδιο μπορεί να είναι ευρετικό για την απόδοση ενός γενικευμένου αποτελέσματος σε μία περίπτωση πολλών εμπλεκόμενων πλοίων (Wang et al., 2013).

## 3. Διάκριση των Μοντέλων

---

### 3.1. Βασικά χαρακτηριστικά με βάση τα οποία διακρίνονται τα μοντέλα

Μετά από εκτενή μελέτη της βιβλιογραφίας, γίνεται μία προσπάθεια ταξινόμησης των διαφόρων μελετών που σχετίζονται με τη μοντελοποίηση της σύγκρουσης πλοίων. Η ταξινόμηση αυτή γίνεται με κριτήριο τη βασική μέθοδο προσέγγισης του εκάστοτε μοντέλου από τους συγγραφείς και τον κορμό της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε σε κάθε περίπτωση.

Κρίνεται δόκιμη, με κριτήριο τη μέθοδο προσέγγισης, η διάκριση των μοντέλων σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει αυτά που προσεγγίζονται μέσω ποιοτικής ανάλυσης (qualitative analysis) και αυτά που προσεγγίζονται μέσω ποσοτικής ανάλυσης (quantitative analysis). Ωστόσο δεν υφίσταται απόλυτη διάκριση μεταξύ των δύο κατηγοριών, αλλά αυτή γίνεται με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του κάθε μοντέλου. Είναι σύνηθες, σε ένα μοντέλο που χαρακτηρίζεται ως ποιοτικό να ενσωματώνονται στοιχεία ποσοτικής ανάλυσης και σε ένα μοντέλο που χαρακτηρίζεται ως ποσοτικό να ενσωματώνονται στοιχεία ποιοτικής ανάλυσης. Ενδεικτικά στην περίπτωση μιας ποιοτικής ανάλυσης, συχνά είναι χρήσιμο τα αποτελέσματα να ποσοτικοποιηθούν ώστε να γίνονται πιο εύκολα κατανοητά, είτε με αυτόν τον τρόπο να γίνεται ευκολότερη η σύγκριση τους με αποτελέσματα άλλων μοντέλων. Ακόμη σε μια ποσοτική ανάλυση στο στάδιο της εξερεύνησης των κεντρικότερων εννοιών και τον καθορισμό των παραμέτρων που θα ληφθούν υπόψη είναι αναγκαία η ποιοτική εκτίμηση των μεταξύ τους σχέσεων. Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικότερα τα κύρια χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας (qualitative – quantitative).

### 3.2. Μεθοδολογία ποιοτικής ανάλυσης

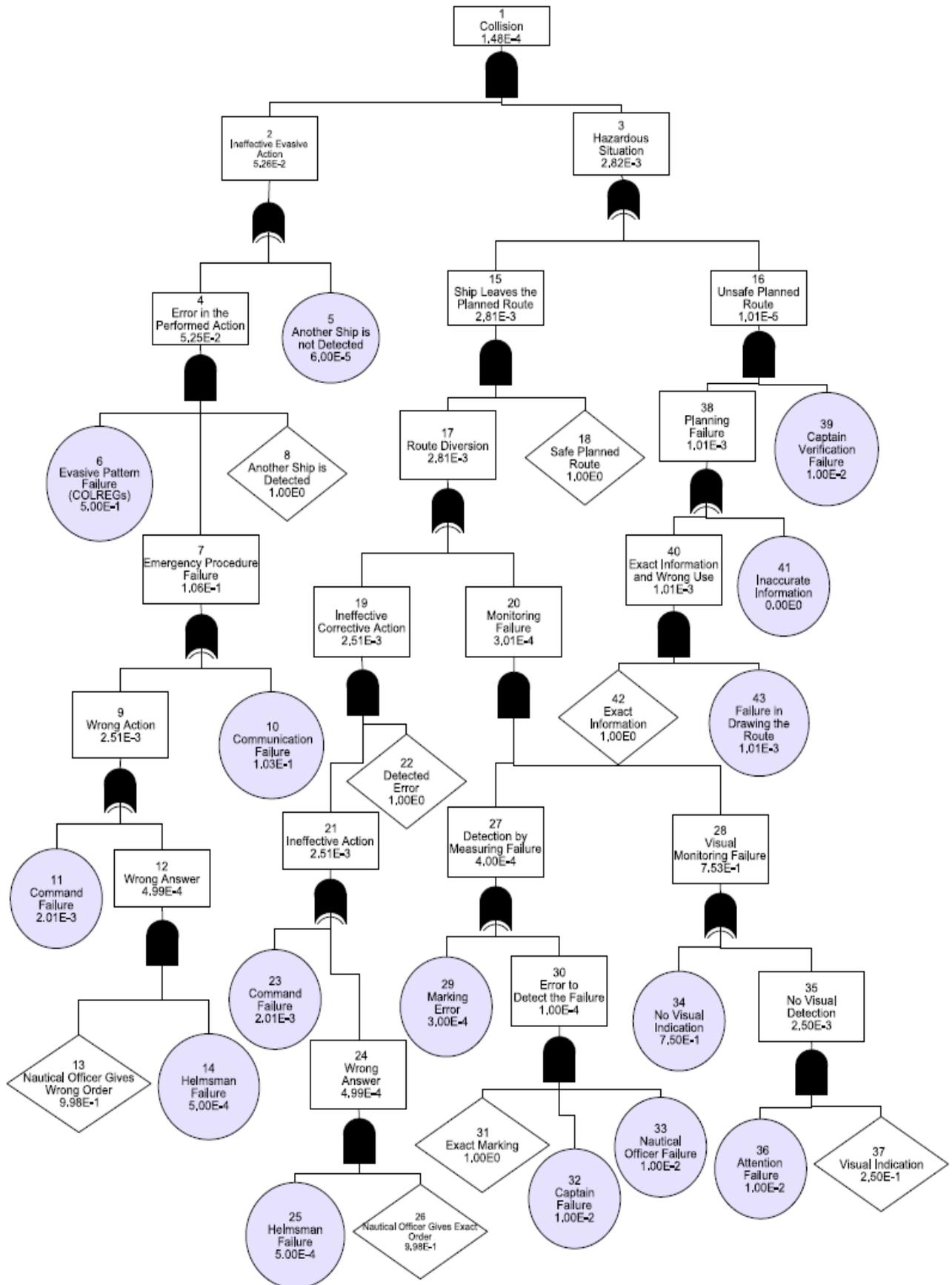
Διακριτικό των ποιοτικών μοντέλων, από τη σκοπιά των μεταβλητών που χρησιμοποιούν, είναι το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιούν ιστορικά δεδομένα ή τα χρησιμοποιούν σε περιορισμένο βαθμό. Αυτό μπορεί να είναι είτε σκόπιμο είτε να οφείλεται στην έλλειψη τους ή στην αδυναμία πρόσβασης σε αυτά. Τα ποιοτικά μοντέλα βασίζονται στη γνώση και την εμπειρία των ειδικών στο υπό μελέτη πρόβλημα και η εξαγωγή των μεταβλητών μπορεί να γίνεται για παράδειγμα με τη χρήση ερωτηματολογίων. Μπορεί επίσης να επεξεργάζονται ποιοτικές μεταβλητές διατυπωμένες σε φυσική γλώσσα που αφορούν για παράδειγμα την κατάσταση της θάλασσας, τις καιρικές συνθήκες, τον ανθρώπινο παράγοντα κλπ.

### 3.2.1. Δενδροειδή διαγράμματα ανάλυσης σφάλματος (Fault Trees)

Σε μια ποιοτική μοντελοποίηση μία μεθοδολογία που εφαρμόζεται συχνά και είναι διακριτική του ποιοτικού χαρακτήρα της προσέγγισης είναι τα Δενδροειδή Διαγράμματα Ανάλυσης Σφάλματος (Fault Trees). Με βάση τον ορισμό του [IMO \(2013\)](#), ένα Fault Tree είναι ένα λογικό διάγραμμα που καταδεικνύει την αιτιώδη συνάφεια ανάμεσα σε συμβάντα η εμφάνιση των οποίων, από μόνα τους ή σε συνδυασμό, προκαλεί την εμφάνιση ενός συμβάντος ανωτέρου επιπέδου. Χρησιμοποιείται κατά την Ανάλυση με Δενδροειδή Διαγράμματα (Fault Tree Analysis) για να προσδιοριστεί η πιθανότητα ενός κορυφαίου συμβάντος, το οποίο μπορεί να είναι ένας τύπος ατυχήματος ή κάποιο ανεπιθύμητο επικίνδυνο αποτέλεσμα. Η Fault Tree Analysis μπορεί να λαμβάνει υπόψη την κοινή αιτία αστοχιών σε συστήματα με πλεονάζοντα ή εν αναμονή στοιχεία. Τα Fault Trees μπορούν να περιέχουν συμβάντα αστοχίας ή αιτίες σχετιζόμενες με ανθρώπινους παράγοντες. Η ανάπτυξη ενός Fault Tree λαμβάνει υπόψη συστηματικά, με μια από τα πάνω προς τα κάτω προσέγγιση, τις αιτίες ή τα συμβάντα κάτω από το κορυφαίο επίπεδο. Εάν πρέπει να επέλθουν δύο ή περισσότερα συμβάντα κατωτέρου επιπέδου για να προκαλέσουν το επόμενο ανωτέρου επιπέδου συμβάν, τότε αυτό απεικονίζεται με μια λογική πύλη “and”. Εάν πρέπει να επέλθει ένα οποιοδήποτε συμβάν από δύο ή περισσότερα συμβάντα κατωτέρου επιπέδου για να προκληθεί το επόμενο ανωτέρου επιπέδου συμβάν, τότε αυτό απεικονίζεται με μια λογική πύλη “or”. Οι λογικές πύλες προσδιορίζουν την πρόσθεση ή τον πολλαπλασιασμό των πιθανοτήτων (θεωρώντας ανεξαρτησία) για να αποκτηθούν οι τιμές για το κορυφαίο συμβάν. Ως παράδειγμα, στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται ένα Fault Tree από τη μελέτη των [Martins and Maturana \(2013\)](#).

### 3.2.2. Δενδροδιαγράμματα (Event Trees)

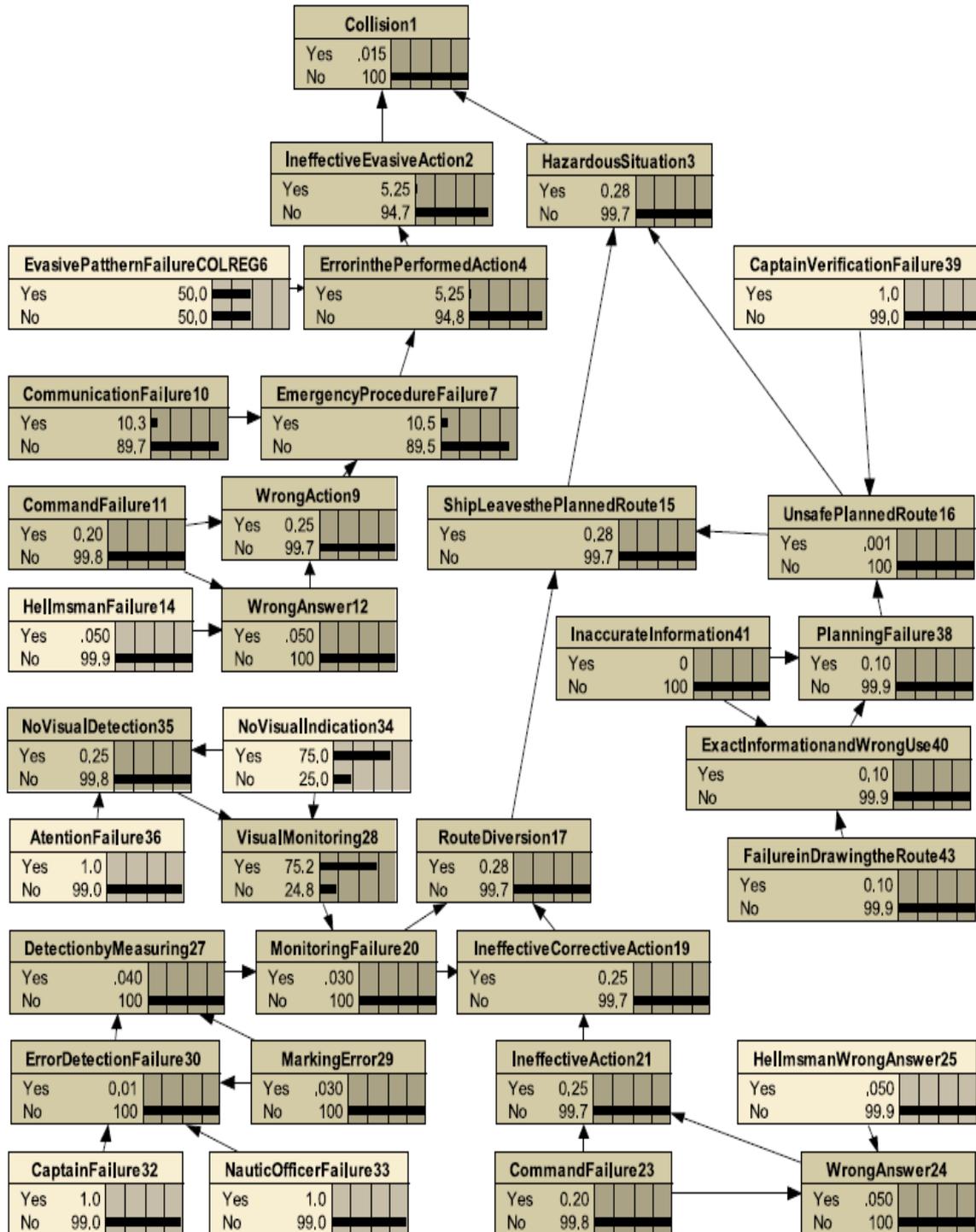
Άλλη μία μεθοδολογία, χαρακτηριστική του ποιοτικού τρόπου προσέγγισης, είναι η χρήση Δενδροδιαγραμμάτων (Event Trees). Με βάση και πάλι τον ορισμό του [IMO \(2013\)](#), ένα Event Tree είναι ένα λογικό διάγραμμα που χρησιμοποιείται για να αναλυθούν οι παράγοντες που επιδρούν σε ένα ατύχημα, μία αστοχία ή ένα ανεπιθύμητο αποτέλεσμα. Το διάγραμμα δείχνει την πιθανότητα ή τη συχνότητα του ατυχήματος που συνδέεται με εκείνα τα μέτρα διασφάλισης που πρέπει να λαμβάνονται μετά την εμφάνιση του γεγονότος για τον περιορισμό ή την αποτροπή της κλιμάκωσης. Οι πιθανότητες επιτυχίας ή αποτυχίας αυτών των μέτρων αναλύονται. Οι διαδρομές της επιτυχίας ή της αποτυχίας οδηγούν σε ποικίλες συνέπειες που διαφέρουν σε δριμύτητα ή σε μέγεθος. Πολλαπλασιάζοντας τη πιθανότητα του ατυχήματος με τις πιθανότητες της επιτυχίας ή της αποτυχίας σε κάθε διαδρομή προκύπτει η πιθανότητα κάθε συνέπειας. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 ένα Event Tree από την εργασία των [Martins and Maturana \(2013\)](#).



Σχήμα 3.1 Fault Tree σύγκρουσης των Martins and Maturana (2013).



ακρίβεια απαιτείται (universal approximation), έχουν τη δυνατότητα αξιοποίησης της γνώσης και της εμπειρίας ειδικών που ήδη κατανοούν το υπό μελέτη σύστημα και η ευκολία κατανόησης λόγω της διατύπωσης των κανόνων των ασαφών συστημάτων σε φυσική γλώσσα.



Σχήμα 3.3 Bayesian Belief Network επικίνδυνων συμβάντων Martins and Maturana (2013).

### 3.3. Μεθοδολογία ποσοτικής ανάλυσης

Το βασικό χαρακτηριστικό της δεύτερης μεγάλης κατηγορίας των ποσοτικών μοντέλων είναι ότι εξερευνούν και επεξεργάζονται συστηματικά μεγάλο εύρος ιστορικών δεδομένων. Μελετώντας περαιτέρω τα ποσοτικά μοντέλα μπορεί να γίνει ακόμα μια διάκριση χωρίζοντας τα σε στατιστικά και γεωμετρικά.

Διακριτικά χαρακτηριστικά των στατιστικών μοντέλων είναι εφαρμογές της θεωρίας των πιθανοτήτων και η χρήση εργαλείων της στατιστικής με τρόπο που θεωρεί καταλληλότερο ανάλογα με την προσέγγιση του ο συγγραφέας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η προσαρμογή κατανομών και συναρτήσεων σε μεγάλα σύνολα δεδομένων και η τυχαία δειγματοληψία από στατιστικές κατανομές. Χρήσιμο εργαλείο που συναντάται σε πλήθος μοντέλων είναι η προσομοίωση Monte Carlo. Η μέθοδος Monte Carlo παράγει τυχαίες τιμές (ή καταστάσεις ενός συστήματος) με μια συγκεκριμένη κατανομή πιθανότητας χαρακτηριστική του συστήματος που μελετάται και εξάγει τις ιδιότητες του συστήματος από τον μέσο όρο του συνόλου. Την κύρια μεθοδολογία ενός στατιστικού μοντέλου συχνά ακολουθούν μεθοδολογίες λογιστικής παλινδρόμησης (logistic regression) και ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis) όπου ερευνάται η επίδραση μιας αλλαγής μιας μεταβλητής στις υπόλοιπες μεταβλητές και στο τελικό αποτέλεσμα.

Τα γεωμετρικά μοντέλα διακρίνονται από τον καθορισμό ενός τομέα πλοίου (ship domain) το σχήμα και το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (όπως για παράδειγμα οι διαστάσεις του πλοίου), ανάλογα με την προσέγγιση του ερευνητή, και τη χρησιμοποίηση του ως κριτηρίου για την εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης. Η ιδέα του καθορισμού ενός τομέα πλοίου βρήκε ευρεία εφαρμογή μετά τις καινοτόμες εργασίες των [Fujii and Tanaka \(1971\)](#) και [Goodwin \(1975\)](#). Ακόμη τα γεωμετρικά μοντέλα μπορεί να προσομοιώνουν τη θαλάσσια κυκλοφορία σε έναν χωρικό τομέα και την μεταβολή της συναρτήσεως του χρόνου σε έναν χρονικό τομέα, επιπλέον ανάλογα με την προσέγγιση του συγγραφέα μπορεί να λαμβάνουν υπόψη τους πρότυπους χειρισμούς ελιγμών των πλοίων για την αποφυγή της σύγκρουσης. Έχουν προταθεί διάφορα γεωμετρικά μοντέλα, οι διαφορές των οποίων είναι κατά περίπτωση μικρότερες ή μεγαλύτερες, ενδεικτικά αναφέρονται αυτά των [Montewka et al. \(2011b\)](#) στο οποίο καθορίζεται ως κριτήριο σύγκρουσης η ελάχιστη απόσταση για τη σύγκρουση (Minimum Distance To Collision – MDTC) και των [Chin and Debnath \(2009\)](#) όπου εκτιμάται ο κίνδυνος σύγκρουσης σε λιμενικές εγκαταστάσεις.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τρία μοντέλα σύγκρουσης πλοίων αντιπροσωπευτικά κάθε κατηγορίας και υποκατηγορίας που ταξινομήθηκε, ένα ποιοτικό, ένα ποσοτικό – στατιστικό και ένα ποσοτικό – γεωμετρικό.

### 3.4. Μοντέλο ποιοτικής ανάλυσης της σύγκρουσης

Οι Dai et al. (2013) αναπτύσσουν ένα πλαίσιο εκτίμησης του ρίσκου για τις συγκρούσεις πλοίων με υπεράκτιες ανεμογεννήτριες (offshore wind turbines – OWT). Παρουσιάζεται ο τρόπος προσέγγισης επικεντρώνοντας μόνο στο κομμάτι της εκτίμησης της πιθανότητας σύγκρουσης. Το πλαίσιο της ανάλυσης ρίσκου περιλαμβάνει έξι βασικά βήματα: (1) προκαταρκτική ανάλυση, (2) ταυτοποίηση των κινδύνων, (3) ανάλυση πιθανότητας, (4) ανάλυση συνέπειας, (5) περιγραφή του ρίσκου και αξιολόγηση και (6) μείωση του ρίσκου. Το τμήμα της εργασίας που παρουσιάζεται είναι τα βήματα (2) και (3).

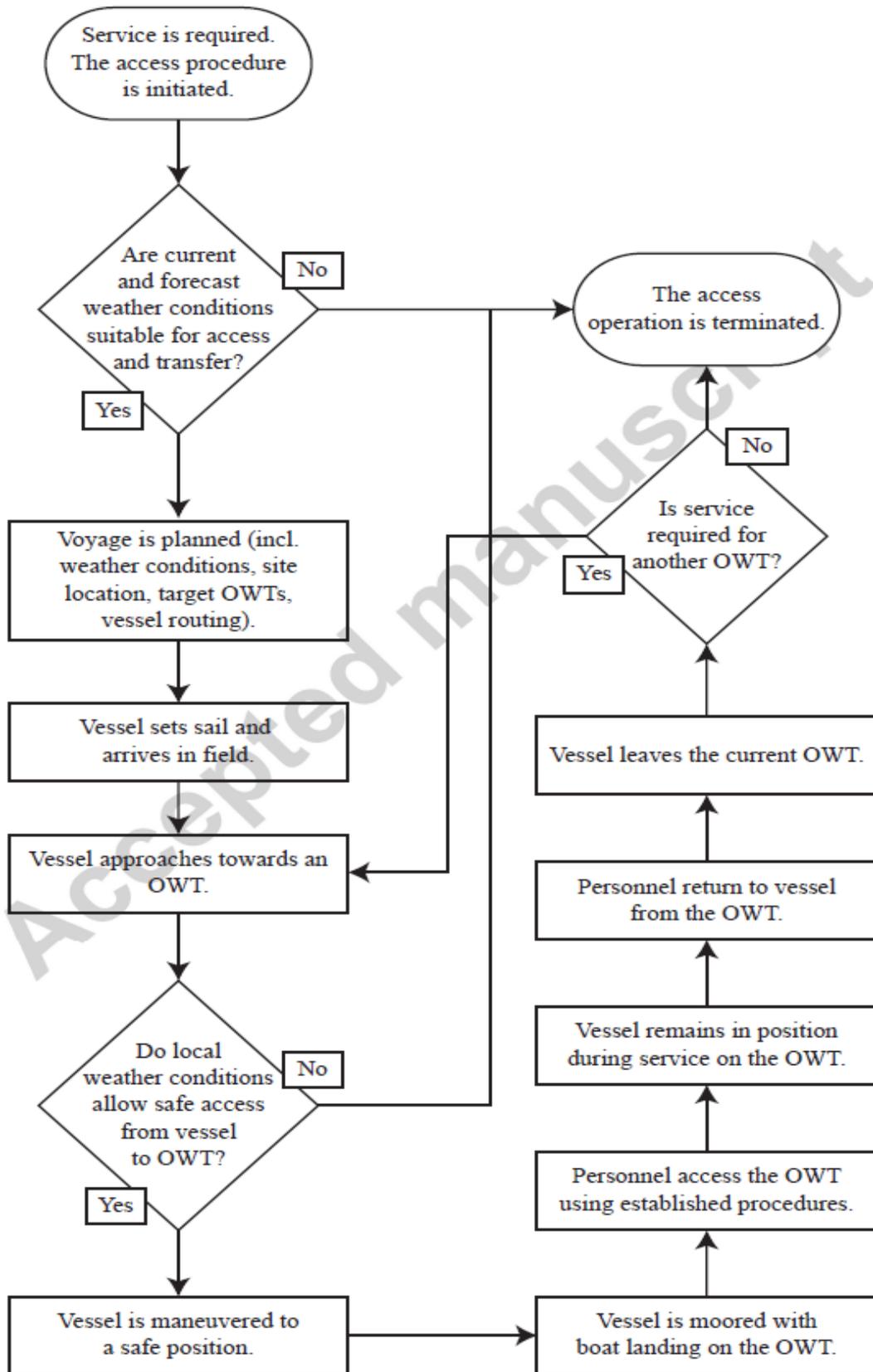
#### 3.4.1. Ταυτοποίηση των κινδύνων

Για την ταυτοποίηση των κινδύνων που σχετίζονται με το ρίσκο σύγκρουσης, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις τυπικές λειτουργίες των σκαφών υπηρεσίας. Μία γενική διαδικασία για την πρόσβαση των σκαφών υπηρεσίας προσαρμόζεται από τον οδηγό RenewableUK (2010), και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4. Οι δραστηριότητες στο Σχήμα 3.4 που μπορεί να οδηγήσουν σε σύγκρουση είναι:

- Το πλοίο υπηρεσίας πλησιάζει μία OWT:
  - Το πλοίο υπηρεσίας αποτυγχάνει να σταματήσει όταν φτάνει στην OWT και προσκρούει στην OWT με υψηλή ταχύτητα.
  - Το πλοίο κάνει λάθος χειρισμό σε μία στροφή ή έναν ελιγμό και προσκρούει στην OWT με σχετικά χαμηλή ταχύτητα.
- Το πλοίο υπηρεσίας παραμένει παραπλεύρως μιας OWT για να διεξάγει μία εργασία σχετιζόμενη με την OWT (συνήθως για να ξεφορτώσει προσωπικό συντήρησης και εξοπλισμό από το σκάφος στην OWT ή αντίστροφα):
  - Το πλοίο χάνει ισχύ ή το σύστημα δυναμικής τοποθέτησης αποτυγχάνει και το πλοίο παρασύρεται προς την OWT υπό την επήρεια του ανέμου και των κυματισμών. Η ταχύτητα της πρόσκρουσης εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και την κατάσταση της θάλασσας.

Αυτές οι λειτουργικές δραστηριότητες συνεπάγονται τις ακόλουθες κατηγορίες σεναρίων σύγκρουσης:

1. Μετωπική σύγκρουση
2. Σύγκρουση κατά τη διάρκεια ελιγμών του σκάφους
3. Σύγκρουση από παρασυρόμενο σκάφος



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής από τη διαδικασία πρόσβασης σκάφους σε μια OWT (Dai et al., 2013) (προσαρμοσμένο από RenewableUK (2010)).

### 3.4.2. Πιθανότητα σύγκρουσης

Εξαιτίας της έλλειψης ιστορικών δεδομένων, δεν είναι δυνατό να εκτιμηθεί η πιθανότητα των ανεπιθύμητων συμβάντων ή οι συνέπειες των σεναρίων σύγκρουσης από τα δεδομένα και μόνο. Η καλύτερη εναλλακτική είναι η προσέγγιση μέσω της θεωρίας του Bayes όπου η πιθανότητα σύγκρουσης μεταφράζεται ως ο *βαθμός πίστης (εμπιστοσύνης)* βασισμένος σε όλη τη διαθέσιμη γνώση. Σε ένα τμήμα αυτής της ανάλυσης είναι απαραίτητο να εξακριβωθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρίσκο (risk influencing factors – RIFs) και να εκτιμηθούν οι επιδράσεις τους στα επικίνδυνα συμβάντα και στην εξέλιξη του περιστατικού σύγκρουσης. Προτείνεται μια διαδικασία όπου το πρόβλημα της εκτίμησης χωρίζεται σε έξι βήματα:

1. Ταυτοποίηση των άμεσων αιτιών των επικίνδυνων συμβάντων με τη χρήση fault tree analysis ή event tree analysis.
2. Παροχή αρχικών δεδομένων.
3. Εξακρίβωση των σχετικών RIFs για τις πιθανότητες των βασικών συμβάντων του fault tree ή τις πιθανότητες αποτυχίας του φράγματος σε ένα event tree.
4. Δημιουργία ενός Bayesian Network με τους σχετιζόμενους RIFs.
5. Ταξινόμηση της σημαντικότητας των RIFs.
6. Υπολογισμός των πιθανοτήτων των βασικών συμβάντων και των επικίνδυνων συμβάντων.

### 3.4.3. Αιτιώδης ανάλυση

Είναι σύνηθες οι άμεσες αιτίες ενός επικίνδυνου συμβάντος να εξακριβώνονται και να εκτιμώνται με εφαρμογή fault tree analysis, όπως δείχνει το απλοποιημένο fault tree στο Σχήμα 3.5, όπου μία μετωπική σύγκρουση (που αποκαλείται κορυφαίο συμβάν) εμφανίζεται όταν εμφανίζονται και τα τρία βασικά συμβάντα  $E_1, E_2, E_3$ .

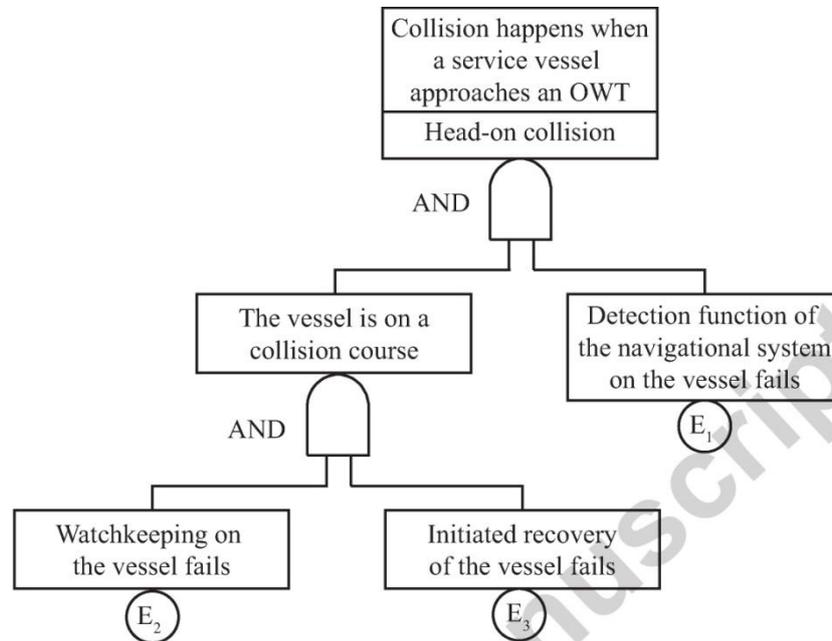
Όταν τα βασικά συμβάντα στο Σχήμα 3.5 θεωρούνται ανεξάρτητα, η πιθανότητα  $Q_{hc}$  του κορυφαίου συμβάντος για κάθε προσέγγιση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Q_{hc} = q_{E1} \cdot q_{E2} \cdot q_{E3} \quad (3.1)$$

όπου  $q_{Ei}$  είναι η πιθανότητα του βασικού συμβάντος  $i$  (για  $i=1, 2, 3$ ). Τα βασικά συμβάντα στο Σχήμα 3.5 αντιπροσωπεύουν αποτυχίες των τριών φραγμάτων:  $B_1$ : σύστημα πλοήγησης,  $B_2$ : βάρδια υπηρεσίας,  $B_3$ : διορθωτική ενέργεια. Αν το πλήθος των επισκέψεων σε μια συγκεκριμένη OWT είναι  $n_A$  ανά έτος και  $p_A$  είναι το τμήμα των προσεγγίσεων που το σκάφος κατευθύνεται μετωπικά προς την OWT, η συχνότητα  $f_{hc}$  των μετωπικών συγκρούσεων με τη συγκεκριμένη OWT ανά έτος είναι:

$$f_{hc} = n_A \cdot p_A \cdot q_{E1} \cdot q_{E2} \cdot q_{E3} \quad (3.2)$$

Η συχνότητα των μετωπικών συγκρούσεων (3.2) χωρίζεται σε στοιχεία που μπορούν να εκτιμηθούν ξεχωριστά:



Σχήμα 3.5 Fault Tree για το σκάφος υπηρεσίας που κατευθύνεται προς την OWT.

$n_A$  – Το ετήσιο πλήθος των επισκέψεων μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τις απαιτήσεις για συντήρηση της OWT.

$p_A$  – Η πιθανότητα το σκάφος να κατευθυνθεί μετωπικά προς την OWT θα εξαρτηθεί από τις διαδικασίες της προσέγγισης, για παράδειγμα εάν το σκάφος χρησιμοποιεί αυτόματο πιλότο με την OWT ως προσημασμένο σημείο κατεύθυνσης.

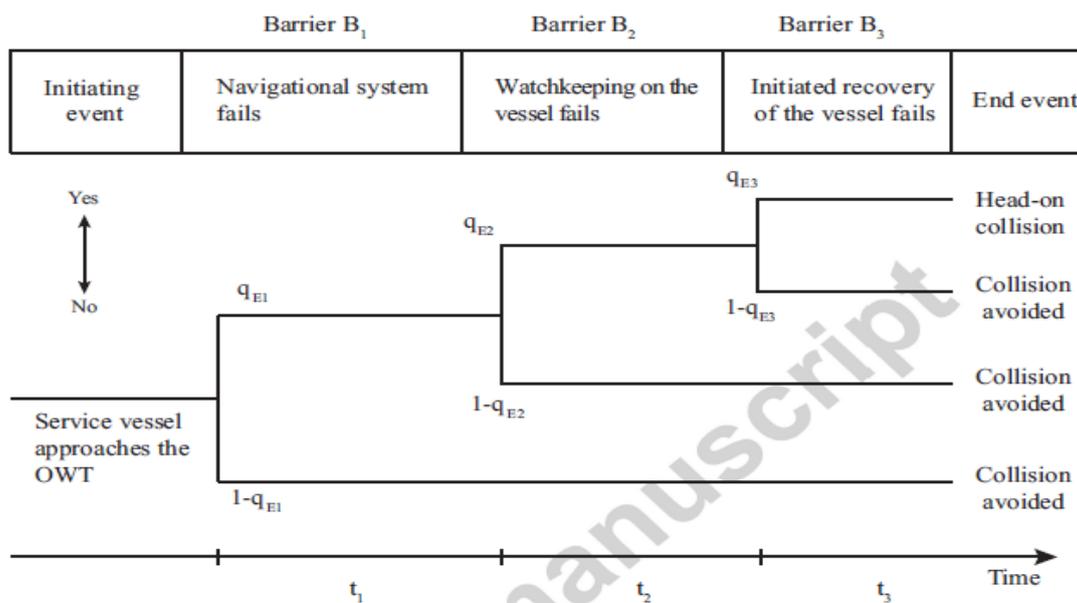
$q_{E1}$  – Η αποτυχία της βάρδιας επιφυλακής του σκάφους συνήθως σχετίζεται με ανθρώπινους και οργανωτικούς παράγοντες, όπως η απόσπαση της προσοχής του αξιωματικού υπηρεσίας από άλλα καθήκοντα, αλλά μπορεί ακόμη να σχετίζεται με εγγενή ελαττώματα της διαδικασίας και επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες.

$q_{E2}$  – Η αστοχία του συστήματος πλοήγησης και ελέγχου του σκάφους μπορεί να προκληθεί από κάποιο τεχνικό ελάττωμα ή την έλλειψη συντήρησης. Μια αρχική εκτίμηση της  $q_{E2}$  μπορεί να καθοριστεί από μια ανάλυση αξιοπιστίας του συστήματος πλοήγησης και ελέγχου. Μπορεί ακόμη να θεωρηθεί ανεξάρτητη του χρόνου και αντιπροσωπευτική του επιχειρησιακού προτύπου του σκάφους συνολικά (Kristiansen, 2005).

$q_{E3}$  – Η αποτυχία των διορθωτικών κινήσεων του σκάφους σχετίζεται με το πώς το πλήρωμα του σκάφους χειρίζεται τις έκτακτες καταστάσεις.

Η fault tree analysis είναι μία καλά εδραιωμένη μέθοδος για την αιτιώδη ανάλυση αλλά υπόκειται σε αρκετούς περιορισμούς. Ο σημαντικότερος είναι η έλλειψη της δυνατότητας να ληφθεί υπόψη η διαδοχικότητα με την οποία τα βασικά συμβάντα μπορούν να επέλθουν. Όταν αυτή η διαδοχικότητα είναι σημαντική, η event tree analysis μπορεί να αποτελεί καλύτερη επιλογή. Ένα απλοποιημένο Event Tree που σχετίζεται με μετωπική σύγκρουση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6.

Σχεδιάζεται μια κλίμακα του χρόνου κάτω από το Event Tree στο Σχήμα 3.6 όπου απεικονίζεται ο χρόνος που είναι διαθέσιμος για την διεξαγωγή των διάφορων ενεργειών. Οι πιθανότητες σε ένα Event Tree είναι πάντα εξαρτημένες από τα πρότερα συμβάντα στη συγκεκριμένη διαδρομή συμβάντων και από τον χρόνο ανάμεσα στα συμβάντα. Η συχνότητα των μετωπικών προσεγγίσεων σε μια OWT είναι  $n_A \cdot p_A$  και η συνολική συχνότητα των μετωπικών συγκρούσεων θα είναι ίδια όπως στην Εξίσωση (3.2) για το Fault Tree. Το Event Tree όμως παρέχει περισσότερες πληροφορίες για την διαδοχικότητα των συμβάντων και τον διαθέσιμο χρόνο έτσι ώστε η εκτίμηση των διαφόρων στοιχείων να είναι ακριβέστερη. Οι άλλες δύο κατηγορίες συγκρούσεων μπορούν να υπολογιστούν με τον ίδιο τρόπο.



Σχήμα 3.6 Event Tree για τα σκάφη υπηρεσίας που προσεγγίζουν την OWT.

### 3.4.4. Αρχικά δεδομένα

Εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων από υπεράκτια αιολικά πάρκα, τα αρχικά δεδομένα δύναται να συλλεχθούν από παρόμοια περιστατικά σύγκρουσης στη βιομηχανία της υπεράκτιας εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου. Σύμφωνα με τους Vinnem (2007) και Spouge (1999), οι συχνότητες σύγκρουσης ποικίλουν σε διαφορετικές εξέδρες άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η εμπειρία από τις υπάρχουσες OWT δείχνει ότι για προγραμματισμένη συντήρηση (αναμένεται να γίνεται 1-2 φορές ανά έτος) απαιτούνται 2-3 εργάσιμες ημέρες και για επιδιορθωτική

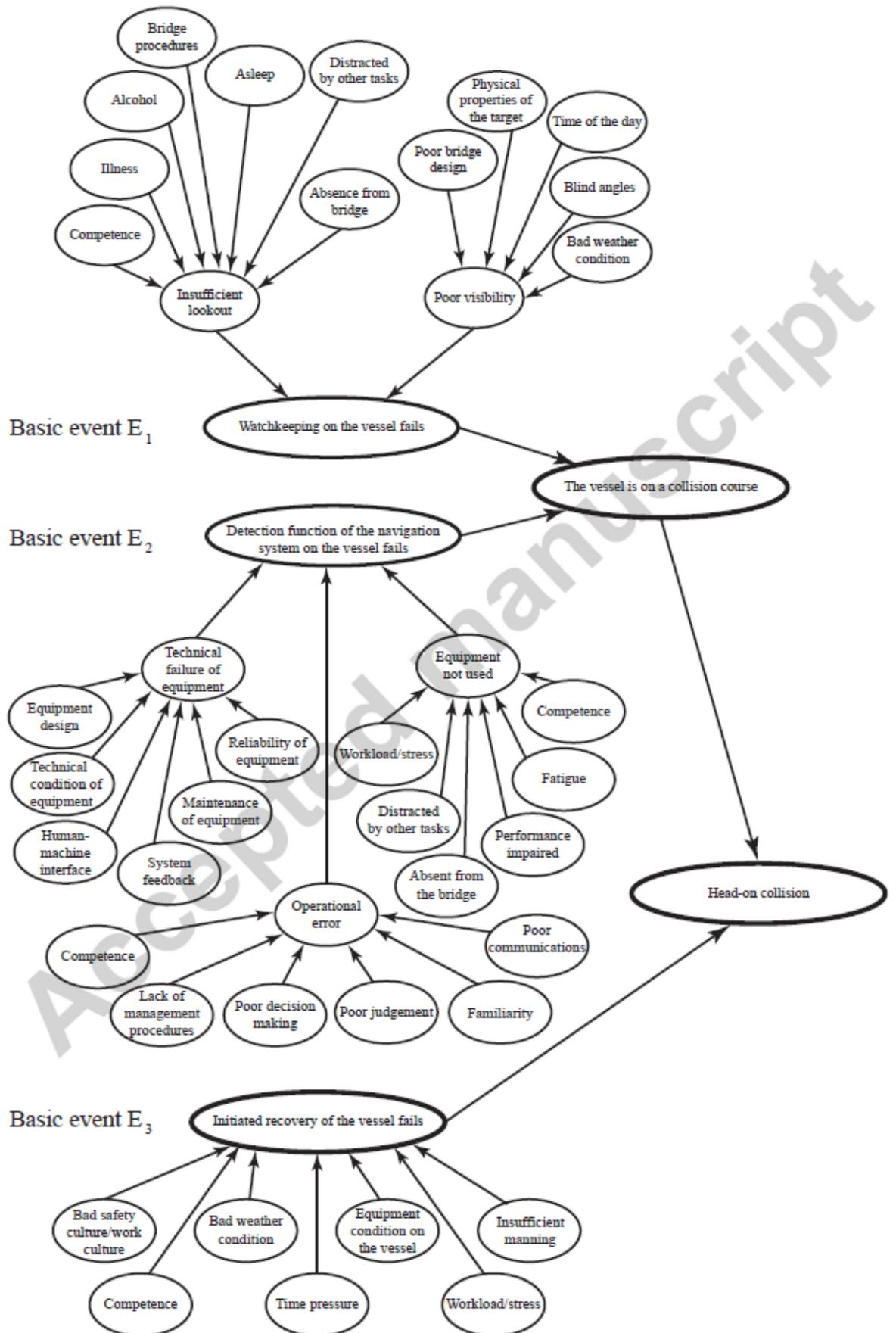
συντήρηση (αναμένεται να γίνεται 2-4 φορές ανά έτος) απαιτούνται 2-4 ημέρες (Eggen et al., 2008). Μία αρχική εκτίμηση για όλους τους τύπους σύγκρουσης ανάμεσα σε σκάφη υπηρεσίας και ημιβυθισμένες εξέδρες είναι 1.56E-03 ανά επίσκεψη (Eggen et al., 2008), ή κατά μέσο όρο μία σύγκρουση ανά 641 προσεγγίσεις. Αυτό σημαίνει ότι ο αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά OWT σύμφωνα με την Εξίσωση (3.2) θα είναι 2.8E-02 ανά έτος (υποθέτοντας ότι όλες οι προσεγγίσεις θα είναι μετωπικές, δηλαδή  $p_A = 1$ ). Ο αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων για ένα μεγάλο υπεράκτιο πάρκο αιολικής ενέργειας με 500 OWTs ανέρχεται σε 14 ανά έτος. Σύμφωνα με τον Spouge (1999), περίπου 20% των συγκρούσεων γίνονται κατά την προσέγγιση και 80% υπό την επίδραση του ανέμου και των κυματισμών, που αντιστοιχούν σε 3 συγκρούσεις κατά την άφιξη και τη διαδικασία ελιγμών και 11 συγκρούσεις λόγω της επίδρασης του ανέμου και των κυματισμών. Λαμβάνοντας υπόψη την αποτυχία των τεχνικών φραγμάτων, για παράδειγμα, βλάβη της κύριας μηχανής, είναι διαθέσιμο ένα πλήθος βάσεων δεδομένων γενικής αξιοπιστίας. Μία λίστα μερικών από αυτές παρέχεται στην ιστοσελίδα Rausand (2012).

#### 3.4.5. Παράγοντες που επηρεάζουν το ρίσκο

Ένας παράγοντας που επηρεάζει το ρίσκο (risk influencing factor – RIF) είναι μια διαρκής συνθήκη που επηρεάζει την εμφάνιση επικίνδυνων συμβάντων και την επίδοση των φραγμάτων (Rausand, 2011). Για παράδειγμα, η επίδοση της βάρδιας επιφυλακής μπορεί να επηρεαστεί από τις κακές καιρικές συνθήκες, την ικανότητα του προσωπικού και τον φόρτο εργασίας. Είναι αποδοτικό να εξακριβώνονται οι RIFs σε συγκεκριμένες κατηγορίες, όπως τα χαρακτηριστικά του προσωπικού, τα χαρακτηριστικά της εργασίας, τα χαρακτηριστικά του τεχνικού συστήματος, τον διοικητικό έλεγχο και τους οργανωτικούς παράγοντες (Haugen et al., 2007). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι RIFs αντιπροσωπεύουν τις μέσες συνθήκες οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν με συγκεκριμένες ενέργειες σε συγκεκριμένους τομείς. Η εξακρίβωση των RIFs συμβάλλει στην εκτίμηση των συνθηκών που επηρεάζουν τα φράγματα ή τα βασικά συμβάντα και στην εκτίμηση των πιθανοτήτων.

#### 3.4.6. Bayesian Networks

Η πιθανότητα σύγκρουσης μπορεί να επηρεάζεται από ένα μεγάλο πλήθος RIFs. Η καλύτερη προσέγγιση για τη μοντελοποίηση αυτών των επιδράσεων είναι με τη χρήση ενός Bayesian Network (Friis-Hansen, 2000; Kjaerulff and Madsen, 2008; Hänninen and Kujala, 2012). Για παράδειγμα, ένα Bayesian network για τα βασικά συμβάντα του Σχήματος 3.5 προτείνεται στο Σχήμα 3.7. Οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν RIFs οι οποίοι συνήθως εξακριβώνονται μέσω της γνώμης των ειδικών και της βιβλιογραφίας. Το Σχήμα 3.7 βασίζεται σε δεδομένα εισόδου από Spouge (1999), af Geijerstam and Svensson (2008), Ali (2011).



Σχήμα 3.7 RIFs για τα βασικά συμβάντα E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> (Dai et al., 2013).

### 3.4.7. Εκτιμήσεις πιθανοτήτων

Για τις εκτιμήσεις των πιθανοτήτων για τους RIFs έχουν προταθεί αρκετές προσεγγίσεις, αν και για διαφορετικές εφαρμογές. Οι τρεις πιο σχετικές προσεγγίσεις είναι:

- *Barrier and operational risk analysis* (BORA) (Vinnem et al., 2009) αναπτύχθηκε για τη Νορβηγική βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η προσέγγιση BORA αφορά στη συχνότητα διαρροών φυσικού αερίου στο υπεράκτιο σύστημα επεξεργασίας και επικεντρώνεται κυρίως σε ανθρώπινους και οργανωτικούς παράγοντες.
- *Failure rate evaluation with influencing factors* (Brissaud et al., 2011) περιγράφει μία προσέγγιση παρόμοια με την προσέγγιση BORA, αλλά αφορά κυρίως στους βαθμούς αποτυχίας του τεχνικού εξοπλισμού.
- *Unified partial method* (UPM) παρουσιάζει κάποιες ομοιότητες με τις δύο πρώτες προσεγγίσεις αλλά αφορά στο τμήμα των κοινών αιτιών αποτυχίας σε τεχνικά συστήματα (Zitrou et al., 2007).

## 3.5. Μοντέλο στατιστικής προσέγγισης της σύγκρουσης

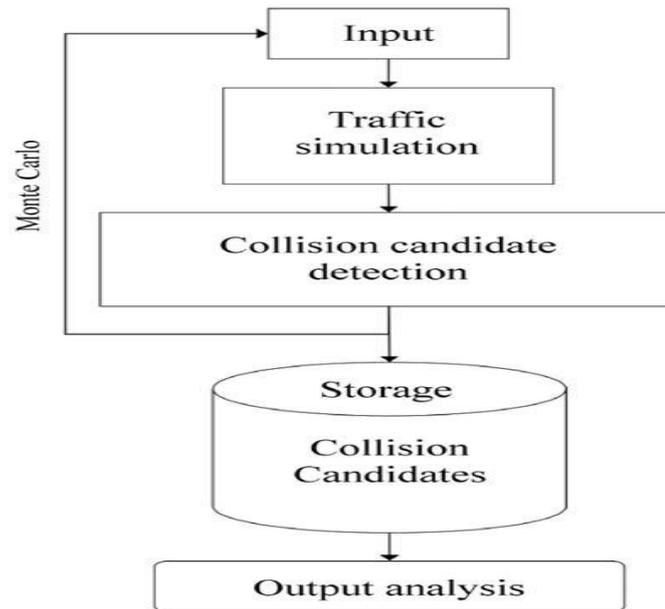
Οι Goerlandt and Kujala (2011) αναπτύσσουν ένα μοντέλο για την εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης μεταξύ πλοίων μέσω της πρόβλεψης των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης. Το μοντέλο λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου λεπτομερή δεδομένα AIS, από την περιοχή του Κόλπου της Φινλανδίας, τα οποία αναλύονται με στατιστικό τρόπο. Στη συνέχεια το μοντέλο περιγράφεται συνοπτικά, επικεντρώνοντας στα στοιχεία τα οποία αναδεικνύουν τον στατιστικό χαρακτήρα της προσέγγισης.

### 3.5.1. Το γενικό περίγραμμα του μοντέλου

Η ανίχνευση των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης βασίζεται σε μία προσομοίωση της θαλάσσιας κυκλοφορίας. Τα πλοία που αντιπροσωπεύονται στη προσομοίωση της κυκλοφορίας εκτιμώνται ανά ζεύγος, ώστε να εξακριβωθεί εάν θεωρούνται υποψήφια για σύγκρουση. Η τελική πιθανότητα σύγκρουσης αποκτάται με την εφαρμογή ενός παράγοντα αιτιώδους συνάφειας για κάθε υποψηφιότητα σύγκρουσης, ο οποίος εξαρτάται από τις συνθήκες της συνάντησης. Αυτές οι υποψηφιότητες σύγκρουσης δίνουν λεπτομερείς πληροφορίες για τα περιστατικά σύγκρουσης, οι οποίες αναλύονται περαιτέρω με σκοπό να αποτελέσουν δεδομένα εισόδου για μοντέλα των συνεπειών.

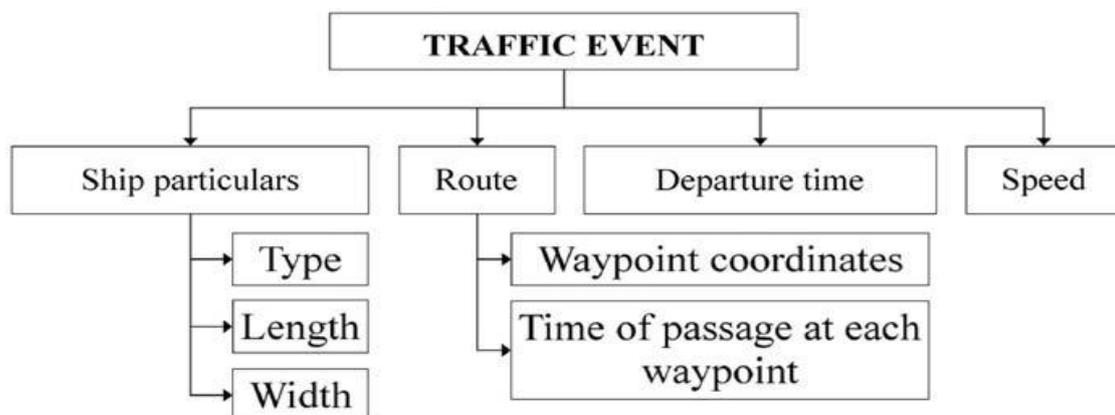
Το κριτήριο για την εκτίμηση ενός περιστατικού σύγκρουσης είναι το ακόλουθο: όποτε δύο σκάφη βρίσκονται ακριβώς στην ίδια γεωγραφική θέση στην ίδια χρονική στιγμή, εμφανίζεται μία σύγκρουση. Η ομάδα όλων των υποψηφίων για σύγκρουση πλοίων είναι τα δεδομένα εξόδου του αλγόριθμου ανίχνευσης συγκρούσεων, ο οποίος είναι στοχαστικής φύσης επειδή τα δεδομένα εισόδου του αλγόριθμου ανίχνευσης συγκρούσεων είναι μία στοχαστική αντιπροσώπευση της

κατάστασης κυκλοφορίας. Ως εκ τούτου, εφαρμόζεται η τεχνική Monte Carlo η οποία παράγει καταστάσεις προσομοίωσης και υποψηφιοτήτων σύγκρουσης. Η συνολική διαδικασία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8 Γενικό σχεδιάγραμμα του μοντέλου πιθανότητας σύγκρουσης (Goerlandt and Kujala, 2011).

Η κυκλοφορία για προσομοιωμένο χρόνο ενός έτους αποκτάται με τη παραγωγή, για κάθε διαδρομή, ενός πλήθους κυκλοφοριακών συμβάντων ανταποκρινόμενου στον κυκλοφοριακό όγκο της συγκεκριμένης διαδρομής κατά τη διάρκεια αυτού του έτους. Αυτό συνεπάγεται ότι για κάθε κυκλοφοριακό συμβάν, όλα τα χαρακτηριστικά από το Σχήμα 3.9 πρόκειται να αποκτηθούν από μία τυχαία δειγματοληψία από συγκεκριμένες κατανομές δεδομένων εισόδου. Το σύνολο όλων των παραγόμενων κυκλοφοριακών συμβάντων είναι μία στοχαστική αντιπροσώπευση της κυκλοφορίας για το υπό μελέτη έτος.



Σχήμα 3.9 Ορισμός ενός κυκλοφοριακού συμβάντος (Goerlandt and Kujala, 2011).

### 3.5.2. Αλγόριθμος ανίχνευσης των συγκρούσεων

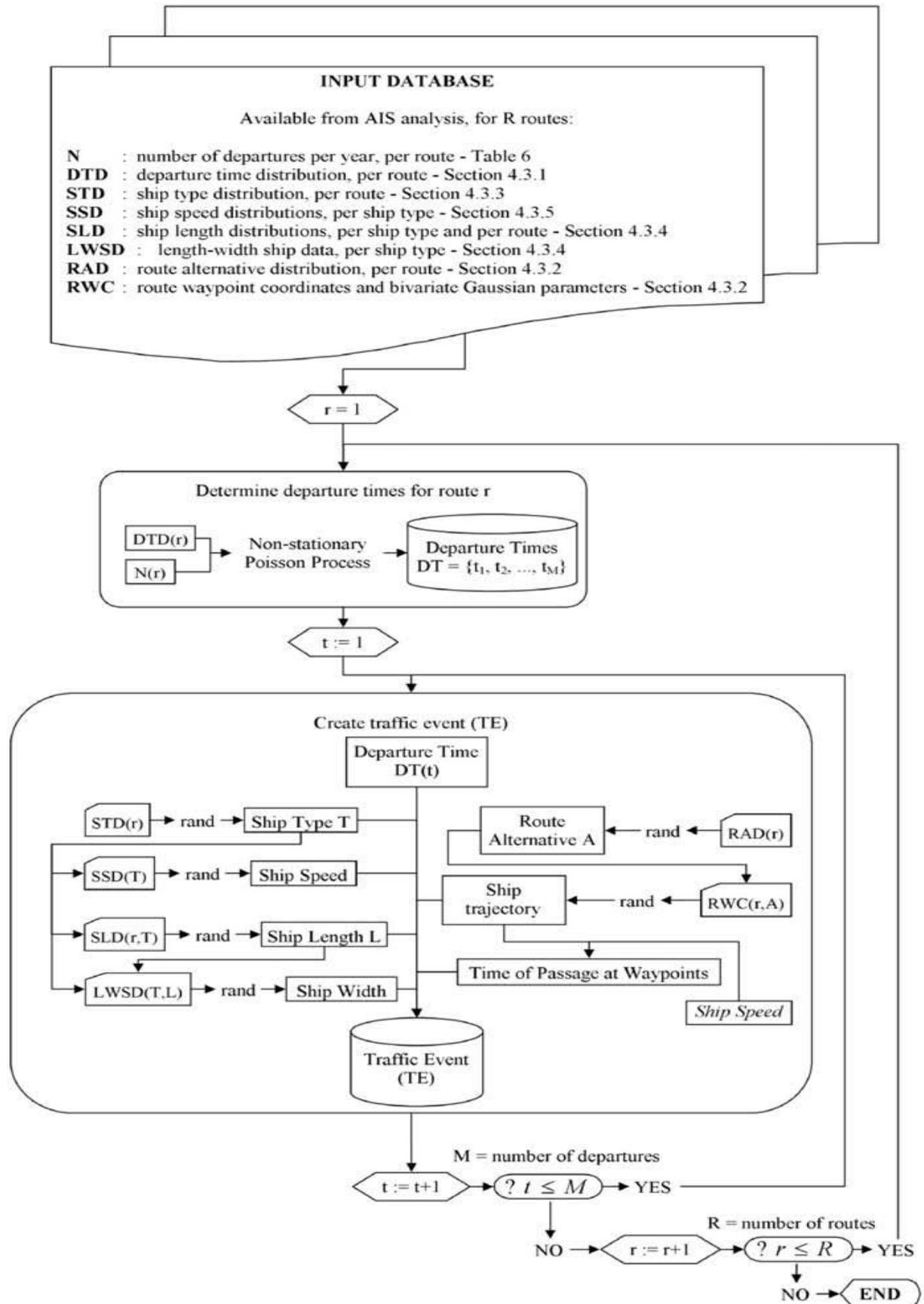
Ο καθορισμός του πλήθους των συγκρούσεων που θα συμβούν σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα σε μία δεδομένη τοποθεσία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μία προσέγγιση δύο σταδίων βασισμένη σε μία ιδέα που παρουσιάζεται από τους Fujii and Shiobara (1971) και εφαρμόζεται σε άλλα μοντέλα όπως των Pedersen (1995), Przywarty (2008), Montewka et al. (2010). Ο αριθμός των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης  $N_A$  πολλαπλασιάζεται με την κατάλληλη πιθανότητα αιτιώδους σχέσης  $P_C$  και αποκτάται ο αριθμός των συγκρούσεων  $N_{coll}$ . Ο αλγόριθμος προσομοίωσης της κυκλοφορίας απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 3.10.

### 3.5.3. Υποψηφιότητες σύγκρουσης

Οι υποψηφιότητες σύγκρουσης αποκτώνται από το παραγόμενο σύνολο των κυκλοφοριακών συμβάντων. Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι να ελέγξει, για κάθε συνδυασμό των κυκλοφοριακών συμβάντων, εάν υπάρχει οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά την οποία τα περιγράμματα των πλοίων που αντιστοιχούν σε αυτά τα κυκλοφοριακά συμβάντα επικαλύπτονται. Εάν εντοπιστεί μία επικάλυψη, αυτό υποδεικνύει μία υποψηφιότητα σύγκρουσης.

Ο γεωγραφικός χώρος που καταλαμβάνεται από ένα πλοίο κατά τη διάρκεια ολόκληρου του ταξιδιού του είναι το άθροισμα των περιγραμμάτων του πλοίου για κάθε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Εάν οι χώροι των δύο κυκλοφοριακών συμβάντων δεν επικαλύπτονται, ερευνάται ο επόμενος συνδυασμός κυκλοφοριακών συμβάντων. Εάν υπάρχει τουλάχιστον μία επικάλυψη, το τμήμα (ή τα τμήματα) της διαδρομής όπου αυτή η χωρική επικάλυψη (ή οι επικαλύψεις) συμβαίνει, βρίσκεται για κάθε κυκλοφοριακό συμβάν. Για κάθε ένα από αυτά τα ζεύγη των τμημάτων των διαδρομών, καθορίζονται τα χρονικά πλαίσια για κάθε πλοίο που πλέει στο αντίστοιχο τμήμα της διαδρομής και εκτιμάται η επικάλυψη αυτών των χρονικών διαστημάτων. Περιστατικά όπου η επικάλυψη ανάμεσα σε αυτά τα χρονικά πλαίσια δεν είναι κενή υποδεικνύουν ότι αυτά τα σκάφη βρίσκονται σε χωρικός επικαλυπτόμενες τροχιές σε χρονικές στιγμές κοντινές η μία στην άλλη στο πεδίο του χρόνου.

Η μεθοδολογία της ανίχνευσης των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης προϋποθέτει ότι τα πλοία βρίσκονται αρχικά σε πορεία σύγκρουσης. Αυτή η υπόθεση, που απορρέει από τις αρχικές ιδέες των Fujii and Shiobara (1971), συνεπάγεται ότι τα συγκρουόμενα πλοία τα οποία δεν βρίσκονται αρχικά σε πορεία σύγκρουσης, για παράδειγμα λόγω λανθασμένων ελιγμών αποφυγής της σύγκρουσης από τους πλοηγούς, δεν ανιχνεύονται. Αυτή η απλούστευση είναι παρούσα και στα μοντέλα των Pedersen (1995) και Montewka et al. (2010). Παρά ταύτα, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επικυρώνονται από την ικανοποιητική τους σύγκλιση με τα δεδομένα των πραγματικών ατυχημάτων και των παρ' ολίγον ατυχημάτων.



Σχήμα 3.10 Αλγόριθμος προσομοίωσης της κυκλοφορίας (Goerlandt and Kujala, 2011).

### 3.5.4. Προσομοίωση δεδομένων εισόδου βασισμένη σε λεπτομερή ανάλυση δεδομένων AIS

Οι κατανομές των δεδομένων εισόδου για την προσομοίωση της κυκλοφορίας αποκτώνται από μία εκτενή στατιστική ανάλυση δεδομένων AIS. Αυτά τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τη Φινλανδική Υπηρεσία Μεταφορών (Finnish Transport Agency – FTA) για τον Κόλπο της Φινλανδίας και αφορούν την περίοδο από Ιανουάριο μέχρι Δεκέμβριο 2006. Επιλέχθηκε ο Κόλπος της Φινλανδίας λόγω της διαθεσιμότητας των δεδομένων και της ύπαρξης και άλλων μελετών για αυτή τη περιοχή, επιτρέποντας επικύρωση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η υπό μελέτη περιοχή είναι μία περιοχή ανοιχτής θάλασσας (εξαιρώντας έτσι λιμενικές περιοχές, διαύλους και αρχιπελάγη) βόρεια του 58°54'00''N και ανατολικά του 21°28'00''E.

### 3.5.5. Περιγραφή του AIS ως πηγή δεδομένων

Το 2000, ο IMO εισήγαγε την υποχρεωτική χρήση AIS για εμπορικά σκάφη σε μία τροπολογία στο συνέδριο SOLAS, που τέθηκε σε ισχύ την 31<sup>η</sup> Δεκεμβρίου του 2004. Ο κανονισμός καθιστά το AIS υποχρεωτικό για όλα τα εμπορικά πλοία από 300 gross tonnage (GT) εμπλεκόμενα σε διεθνή ταξίδια, φορτηγά πλοία από 500 GT και πάνω τα οποία δεν είναι εμπλεκόμενα σε διεθνή ταξίδια και όλα τα επιβατηγά πλοία, ανεξαρτήτως μεγέθους (IMO (2009)). Το σύστημα AIS εκπέμπει ένα πλήθος μεταβλητών ναυσιπλοΐας σε άλλα πλοία και παράκτιους σταθμούς. Μία λεπτομερής περιγραφή του συστήματος AIS δίνεται από τους Aarsaether and Moan (2009). Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης χρησιμοποιείται ένας περιορισμένος αριθμός των εκπεμπόμενων μεταβλητών. Αυτές παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.1 (IMO, 2001), όπου φαίνεται επίσης η ακρίβεια των δεδομένων.

Έχει εξακριβωθεί ότι το AIS περιέχει διάφορους τύπους σφαλμάτων (Graveson, 2004; Norris, 2007; Mokhtari et al., 2007). Αυτοί συμπεριλαμβάνουν τη διάβρωση δεδομένων, εσφαλμένους αριθμούς MMSI, ελαττωματικές αναφορές θέσης και λάθη στην εκπεμπόμενη ταχύτητα. Αυτά τα σφάλματα περιπλέκουν περαιτέρω τον χειρισμό των δεδομένων, καθώς θα πρέπει να προηγείται της ανάλυσης των δεδομένων ένας αλγόριθμος ελέγχου των σφαλμάτων.

### 3.5.6. Μεθοδολογία ανάλυσης των δεδομένων AIS

Σε μία περιοχή του μεγέθους του Κόλπου της Φινλανδίας, εκπέμπονται δεκάδες εκατομμυρίων μηνύματα AIS κατά την περίοδο ενός έτους. Τα δεδομένα αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων της Φινλανδικής Υπηρεσίας Μεταφορών (FTA), η οποία χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη. Η βάση δεδομένων δεν περιέχει όλα αυτά τα μηνύματα, πραγματοποιείται μία επιπλέον δειγματοληψία. Η διαθέσιμη βάση δεδομένων περιέχει πάνω από 19.78 εκατομμύρια δείγματα δεδομένων, καθένα από τα οποία περιέχει τα δεδομένα που φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

### Πίνακας 3.1

Μεταβλητές δεδομένων AIS που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, με την ακρίβεια των δεδομένων (IMO, 2001).

Transmitted variable	Accuracy	Unit
Maritime Mobile Service Identity*	-	-
Timestamp: UTC time	1	s
Position: longitude and latitude <sup>a</sup>	1/10,000	Min
Speed over ground	0.1	Kn
Ship type <sup>b</sup>	-	-
Ship length	1	M
Ship width	1	M

\*MMSI: 9-ψήφιος κωδικός μοναδικός για κάθε πλοίο.

<sup>a</sup>WGS84 σύστημα αναφοράς.

<sup>b</sup>Cargo ship, tanker, passenger vessel, HSLC ή άλλο πλοίο, σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά IMO (2003).

#### 3.5.7. Κατασκευή των τροχιών των πλοίων και χειρισμός των σφαλμάτων

Οι αναφορές του συστήματος AIS στη βάση δεδομένων FTA δεν δίνονται σε διαδοχική σειρά δεδομένων για ένα δεδομένο πλοίο, αλλά αποθηκεύονται με σειρά εγγραφής. Ένα πρώτο βήμα στην ανάλυση είναι η ανακατασκευή της χρονικής σειράς για κάθε πλοίο, με χρονολογική κατάταξη των δειγμάτων των δεδομένων για έναν συγκεκριμένο αριθμό MMSI. Αυτό το βήμα χωρίζεται περαιτέρω σε ξεχωριστές τροχιές πλοίων, με τη διαγραφή ομάδων δεδομένων που ανταποκρίνονται σε μηδενική ταχύτητα πλοίου (ελλιμενισμός) και κατά συνέπεια την ανίχνευση μεγάλων ασυνεχειών στον χρόνο, που ανιχνεύονται μέσω της μέσης και της τυπικής απόκλισης του δείγματος για κάθε αριθμό MMSI.

Εσφαλμένοι αριθμοί MMSI είναι δύσκολο να αντισταθμιστούν σε καταστάσεις όπου πολλαπλοί αναμεταδότες εκπέμπουν τον ίδιο αριθμό. Οι αλλαγές του στόχου και οι πολλαπλότητες του ίδιου αριθμού MMSI φιλτράρονται χρησιμοποιώντας μία τεχνική που περιγράφεται από τους Aarsaether and Moan (2009). Εσφαλμένες ταχύτητες σκαφών προκύπτουν όταν τα δεδομένα του σκάφους δεν εκπέμπονται λόγω τεχνικής αστοχίας του φερόμενου AIS αναμεταδότη. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ταχύτητα υπολογίζεται με βάση την απόσταση που διανύθηκε ανάμεσα σε διαδοχικά σημεία και τον χρόνο που χρειάστηκε για να διανυθεί.

**Πίνακας 3.2**

Ανάλυση των διαδρομών στον Κόλπο της Φινλανδίας, δεδομένα για το 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).

No.	Departure harbor	Arrival harbor	No. of ships
1	St. Petersburg	Baltic Sea <sup>*</sup>	3728
2	Helsinki	Tallinn	3564
3	Tallinn	Helsinki	3285
4	Baltic Sea	St. Petersburg	3495
5	Baltic Sea	Helsinki	1756
6	Helsinki	Baltic Sea	1411
7	Kotka	Baltic Sea	1087
8	Baltic Sea	Hanko	1104
9	Helsinki	Sweden <sup>a</sup>	818
10	Hanko	Baltic Sea	1139
11	Baltic Sea	Kotka	892
12	Paldiski	Sweden	925
13	Sweden	Helsinki	834
14	Muuga	Baltic Sea	947
15	Sweden	Paldiski	797
16	Vyborg	Baltic Sea	614
17	Primorsk	Baltic Sea	514
18	Baltic Sea	Hamina	602
19	St. Petersburg	Sweden	608
20	Baltic Sea	Muuga	498
21	Hamina	Baltic Sea	560
22	Skoldvik	Sweden	492
23	Sweden	Tallinn	422
24	Skoldvik	Baltic Sea	386
25	Sweden	Skoldvik	413
26	Tallinn	Sweden	385
27	Baltic Sea	Primorsk Wait Area	271
28	Primorsk Wait Area	Primorsk	288
29	Sweden	St. Petersburg	432
30	Baltic Sea	Skoldvik	366
31	Baltic Sea	Vyborg	312
32	Paldiski	Hanko	234
33	Hanko	Paldiski	176
34	Baltic Sea	Primorsk	177

<sup>\*</sup>“Baltic Sea”: the area in the main traffic separation zone around 221°N and 591100°E, either towards the Baltic Sea (heading southwest), or coming from the Baltic Sea (heading northeast).

<sup>a</sup>“Sweden”: the area west of 221°N, where traffic is heading either west or east.

### 3.5.8. Ομαδοποίηση των τροχιών των πλοίων σε διαδρομές

Το επόμενο βήμα στην ανάλυση δεδομένων είναι η ομαδοποίηση των ξεχωριστών τροχιών των πλοίων σε διαδρομές, οι οποίες ορίζονται ως το σύνολο των τροχιών των πλοίων που αντιστοιχούν σε ταξίδια ανάμεσα σε ένα συγκεκριμένο λιμάνι αναχώρησης και ένα συγκεκριμένο λιμάνι άφιξης. Αυτό το σύνολο γενικά παρουσιάζει μία συγκεκριμένη γεωγραφική συγκέντρωση των τροχιών των πλοίων καθώς το κάθε πλοίο ακολουθεί μία παρόμοια διαδρομή για τον προορισμό του (Aarsaether and Moan, 2009).

Τα πλοία ακολουθούν ένα πλήθος εναλλακτικών διαδρομών ανάμεσα στο λιμάνι αναχώρησης και άφιξης, που οφείλεται στην παρουσία ρηχών θαλάσσιων περιοχών ή νησιών. Αυτές ορίζονται ως εναλλακτικές διαδρομές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν παραδειγματικά με μεθόδους όπως περιγράφονται από τους Aarsaether and Moan (2009).

Το σύνολο των τροχιών των σκαφών που ομαδοποιούνται σε διαδρομές βασίζεται στην ανάλυση της κυκλοφορίας στον Κόλπο της Φινλανδίας, από την οποία εξάγεται ένα πλήθος κατανομών. Στην ανάλυση για την μελέτη περίπτωσης, συγκρατούνται μόνο οι διαδρομές ανοιχτής θάλασσας με περισσότερη κυκλοφορία από ένα σκάφος ανά δεύτερη μέρα. Αυτές οι διαδρομές φαίνονται στον Πίνακα 3.2, μαζί με το πλήθος των κινήσεων των σκαφών σε αυτή τη διαδρομή. Το συνολικό πλήθος των καταγεγραμμένων κινήσεων των σκαφών είναι 44,324 και οι 34 αναλυμένες διαδρομές αντιπροσωπεύουν 29,155 κινήσεις σκαφών, συνεπάγοντας ότι το 65.7% της κυκλοφορίας λαμβάνεται υπόψη.

### 3.5.9. Θεώρηση για ελλιπή δεδομένα

Η βάση δεδομένων AIS περιέχει ένα πλήθος περιόδων για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα λόγω τεχνικών προβλημάτων με το σύστημα αποθήκευσης δεδομένων. Αυτά τα κενά θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση, καθώς αυτό έχει επιπτώσεις στον αριθμό των πλοίων που βρίσκεται ότι πλέουν σε κάθε διαδρομή και στις κατανομές των χρόνων αναχώρησης. Υποτίθεται ότι αυτά τα δεδομένα που λείπουν δεν έχουν σημαντική επίδραση στις κατανομές των τύπων των σκαφών, στις κατανομές των διαστάσεών τους ή της ταχύτητας.

Τα κενά των δεδομένων εκτιμώνται μετρώντας το πλήθος των μηνυμάτων δεδομένων ανά ώρα κατά τη διάρκεια μίας περιόδου ενός έτους. Με βάση αυτό υπολογίζεται πόσο μεγάλο μερίδιο των δεδομένων λείπει ανά ώρα της ημέρας, ανά ημέρα της εβδομάδας και ανά μήνα του έτους.

### 3.5.10. Κατανομή των χρόνων αναχώρησης

Ο χρόνος αναχώρησης ενός σκάφους για το ταξίδι του (ή ισοδύναμα, η εμφάνιση ενός σκάφους σε μία συγκεκριμένη περιοχή) λαμβάνεται συνήθως να ακολουθεί μία στάσιμη διαδικασία Poisson (Pedersen, 1995; Przywarty, 2008). Αυτή η προσέγγιση είναι δυνητικά αμφίβολη, καθώς μπορεί κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων ωρών της ημέρας ή συγκεκριμένου μήνα του έτους, να αναχωρούν

περισσότερα πλοία από το λιμάνι παρά κατά τη διάρκεια άλλων περιόδων (Jagerman and Altiok, 2003). Τουλάχιστον οι εποχιακές διακυμάνσεις έχουν βρεθεί να είναι σημαντικές για τον Κόλπο της Φινλανδίας (Ylitalo, 2010).

Ο χρόνος αναχώρησης μπορεί να εκτιμηθεί από τα δεδομένα AIS. Οι χρόνοι αναχώρησης όλων των πλοίων συλλέγονται ανά διαδρομή. Εξακριβώνεται το πλήθος των αναχωρήσεων ανά ώρα της ημέρας, ανά ημέρα της εβδομάδας και ανά μήνα του έτους. Όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν μερικές περιόδους κατά τις οποίες δεν καταγράφηκαν δεδομένα. Αυτές πρέπει να ληφθούν υπόψη στην κατασκευή των κατανομών του χρόνου αναχώρησης. Η πιθανότητα κατανομής για αναχωρήσεις πλοίων ανά μήνα  $P_M$ , ανά ημέρα  $P_D$  και ανά ώρα  $P_H$  ορίζεται ως εξής:

$$P_M(i) = \frac{N(i)}{N_{tot}} \frac{100}{100 - P_{U,M}(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, 12 \quad (3.3)$$

$$P_D(i) = \frac{N(i)}{N_{tot}} \frac{100}{100 - P_{U,D}(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (3.4)$$

$$P_H(i) = \frac{N(i)}{N_{tot}} \frac{100}{100 - P_{U,H}(i)}, \quad i = 1, 2, \dots, 24 \quad (3.5)$$

Όπου  $N(i)$  είναι ο αριθμός των αναχωρήσεων που βρέθηκε στο  $i$ -οστό διάστημα και  $P_{U,M}$ ,  $P_{U,D}$  και  $P_{U,H}$  είναι το ποσοστό των περιστάσεων με ελλιπή δεδομένα ανά μήνα, ημέρα και ώρα αντίστοιχα. Εφόσον η  $P_{U,M}$  διαφέρει από το μηδέν μόνο για Μάιο - Αύγουστο, οι εξισώσεις (3.4), (3.5) εφαρμόζονται μόνο για αυτούς τους μήνες.  $N_{tot}$  είναι ο συνολικός αριθμός των αναχωρήσεων κατά την περίοδο ενός έτους, ορίζεται ως:

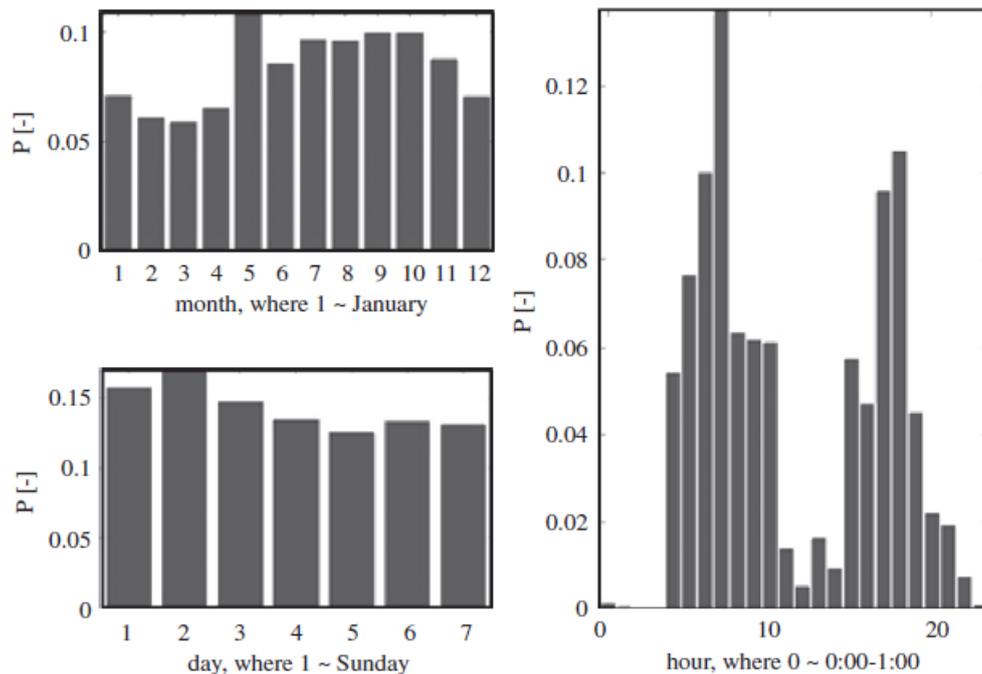
$$N_{tot} = \sum_{i=1}^{12} \frac{100N(i)}{100 - P_{U,M}(i)} \quad (3.6)$$

Ο ετήσιος αριθμός των αναχωρήσεων ανά διαδρομή, διορθωμένος με βάση την Εξίσωση (3.6), απεικονίζεται στον Πίνακα 5.2. Ως παράδειγμα, οι κατανομές των χρόνων αναχώρησης για τη διαδρομή Ελσίνκι-Ταλλίν απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 3.11.

### 3.5.11. Διαδρομές

Στο μοντέλο προσομοίωσης της κυκλοφορίας, οι τροχιές των πλοίων αντιπροσωπεύονται από μία σειρά σημείων προορισμού, ανάμεσα στα οποία τα πλοία θεωρείται ότι ακολουθούν ευθεία πορεία. Αυτά τα σημεία προορισμού έχουν αποκτηθεί από δεδομένα AIS με οπτική εκτίμηση της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης μίας διδιάστατης γκαουσιανής πυκνότητας σε περιοχές όπου τα πλοία στρίβουν μέσα στη διαδρομή, αυτή η προσέγγιση επίσης χρησιμοποιείται από τον Przywarty (2008). Εάν υπάρχουν πολλές εναλλακτικές διαδρομές, αυτή η εκτίμηση

των σημείων προορισμού έχει διεξαχθεί για κάθε μία από αυτές και έχει καθοριστεί το τμήμα των πλοίων που έχει ακολουθήσει κάθε εναλλακτική διαδρομή.



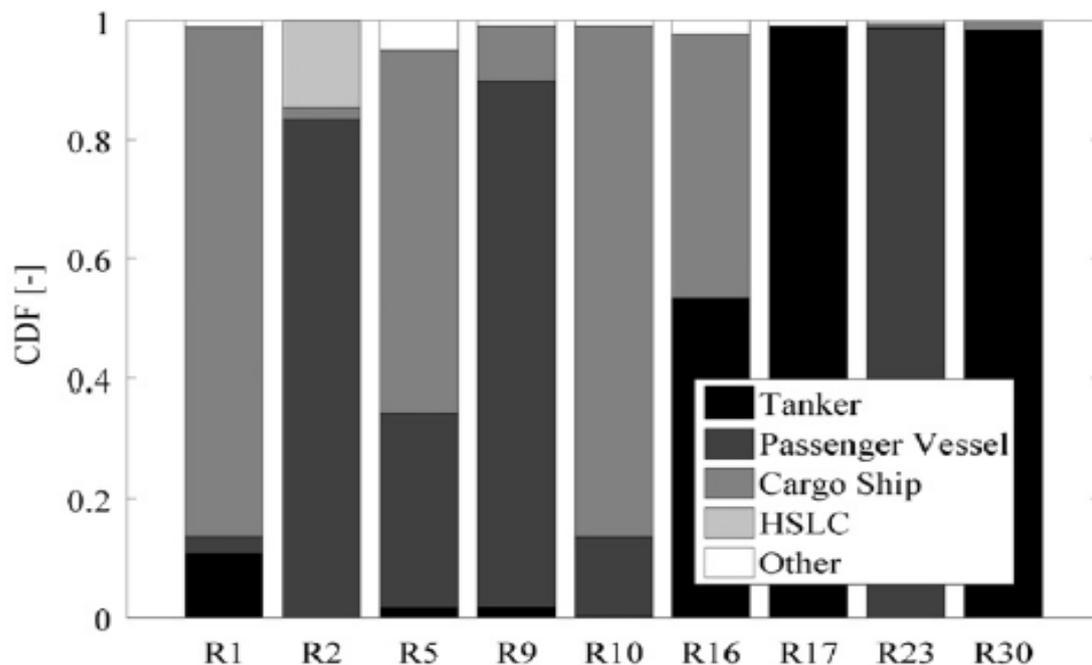
Σχήμα 3.11 Κατανομές των χρόνων αναχώρησης ανά μήνα, ημέρα και ώρα για την διαδρομή από το Ελσίνκι προς το Ταλλίν, με βάση τα δεδομένα AIS του 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).

Ένας σημαντικός περιορισμός στη δρομολόγηση των πλοίων είναι οι Κανονισμοί Σύγκρουσης (Collision Regulations) (IMO, 2002), οι οποίοι απαιτούν «Ένα σκάφος που χρησιμοποιεί ένα σχέδιο διαχωρισμού κυκλοφορίας θα πρέπει [...] να προχωρήσει στην κατάλληλη κυκλοφοριακή λωρίδα στη γενική κατεύθυνση της κυκλοφοριακής ροής για αυτή τη λωρίδα». Αυτό συνεπάγεται ότι δεν επιτρέπεται κάθετη πλεύση κατά το μήκος της κυκλοφοριακής λωρίδας. Στην προσομοίωση, αυτή η συμπεριφορά υποτίθεται για όλες τις διαδρομές, όχι μόνο σε λωρίδες με σχέδια διαχωρισμού της κυκλοφορίας.

Η μάλλον εμπειρική μέθοδος εκτίμησης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας των σημείων πορείας επιδέχεται σίγουρα βελτίωσης, αλλά η παρούσα μέθοδος οδηγεί σε αποδεκτά αποτελέσματα για τους σκοπούς αυτής της μελέτης. Η ανταπόκριση είναι τουλάχιστον ποιοτικώς ικανοποιητική. Μέθοδοι όπως αυτή των Aarsaether and Moan (2009) θα μπορούσαν να αναπτυχθούν περαιτέρω ώστε να παρέχουν χρήσιμες τροχιές για προσομοίωση κυκλοφορίας και ανίχνευση συγκρούσεων.

### 3.5.12. Κατανομή των τύπων των πλοίων

Λόγω της διαφορετικής φύσης των αγαθών που αποστέλλονται από και προς διάφορες γεωγραφικές τοποθεσίες, διαφορετικές διαδρομές έχουν μία διακριτά διαφορετική κατανομή πλοίων που ταξιδεύουν σε κάθε διαδρομή. Για παράδειγμα, ανάμεσα στο Ελσίνκι και το Ταλλίν, υπάρχει κυρίως επιβατική κίνηση, ενώ η κίνηση από και προς το Πρίμορσκ αποτελείται σχεδόν αποκλειστικά από δεξαμενόπλοια. Με ενδεικτικό τρόπο, οι κατανομές των τύπων των πλοίων απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12 για έναν αριθμό διαδρομών.



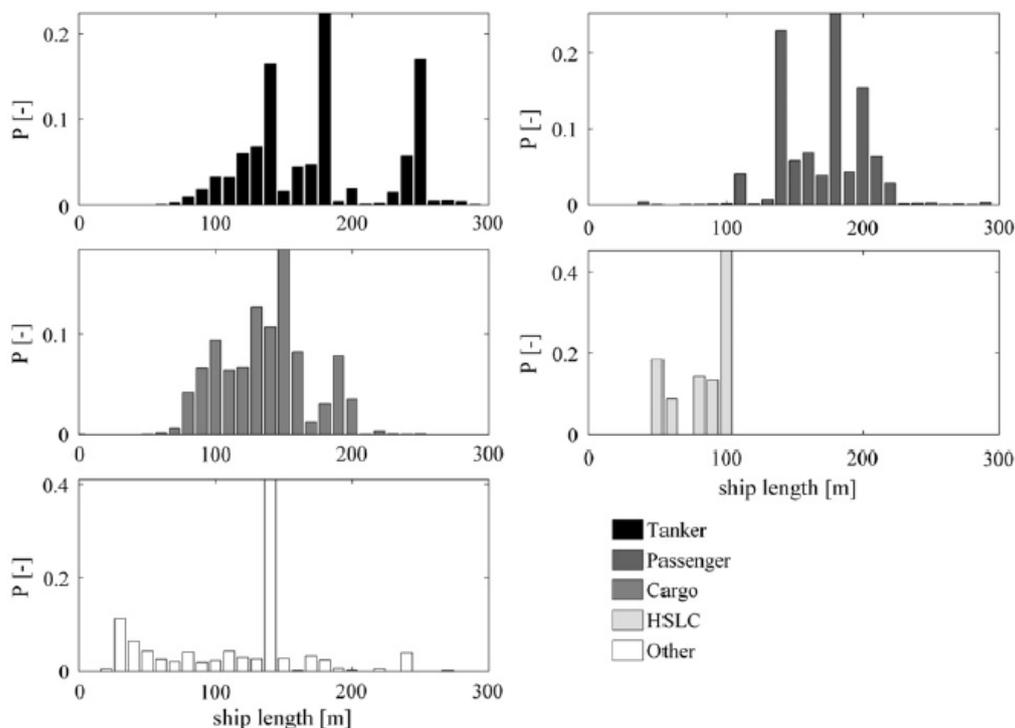
Σχήμα 3.12 Κατανομές των τύπων των πλοίων ανά διαδρομή, οι διαδρομές βασίζονται σε δεδομένα AIS από το 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).

### 3.5.13. Κατανομή των διαστάσεων των πλοίων

Λόγω συγκεκριμένων περιορισμών στις διαστάσεις των θαλάσσιων δρόμων διέλευσης και των λιμενικών εγκαταστάσεων και για λόγους οικονομίας κλίμακας, μεγαλύτερα πλοία χρησιμοποιούνται σε διαδρομές με μεγαλύτερο εμπορικό όγκο, διαφορετικά λιμάνια υποδέχονται πλοία με σημαντικά διαφορετικό μέγεθος. Επιπλέον, η κατανομή των διαστάσεων των πλοίων εξαρτάται από τον τύπο πλοίου, όπως μπορεί να εκτιμηθεί από τα ιστογράμματα στο Σχήμα 3.13, όπου συγκρίνονται τα μήκη πλοίων για τους τύπους πλοίων στον Κόλπο της Φινλανδίας (GOF).

Ως εκ τούτου αποφασίζεται να γίνει η εκτίμηση του μήκους των πλοίων με βάση την διαδρομή και τον τύπο πλοίου. Εφόσον γενικά δεν υπάρχει μαθηματική κατανομή που να μπορεί να περιγράψει αυτά τα εμπειρικά ιστογράμματα, αποφασίζεται να χρησιμοποιηθεί τυχαία δειγματοληψία από εμπειρικές κατανομές που αποκτήθηκαν από ανάλυση δεδομένων AIS, για τη δεδομένη διαδρομή και τον επιλεγθέντα τύπο πλοίου.

Για λόγους υδροδυναμικής αντίστασης, τα πλοία διαθέτουν μία μεγάλη αναλογία μήκους προς πλάτος. Αυτό συνεπάγεται ότι το πλάτος  $B$  συσχετίζεται με το μήκος  $L$ , όπου κάποια διακύμανση υπάρχει και εξαρτάται από τον τύπο πλοίου και τις ειδικές σχεδιάσεις των πλοίων. Συνήθως, αργότερα σκάφη όπως τα δεξαμενόπλοια έχουν μικρότερη αναλογία  $L/B$  από τα γρηγορότερα πλοία όπως τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και τα επιβατηγά πλοία (Lewis, 1989). Στο μοντέλο, αυτή η συσχέτιση λαμβάνεται υπόψη κατασκευάζοντας κατανομές για το πλάτος του πλοίου, ανά τύπο πλοίου και για το επιλεγμένο μήκος πλοίου. Γενικά, καμία μαθηματική κατανομή δεν μπορεί να περιγράψει με έναν στατιστικά αποδεκτό τρόπο την εμπειρική κατανομή που αποκτάται από τα δεδομένα του συστήματος AIS. Κατά συνέπεια, το πλάτος καθορίζεται με τυχαία δειγματοληψία από αυτές τις εμπειρικές κατανομές.

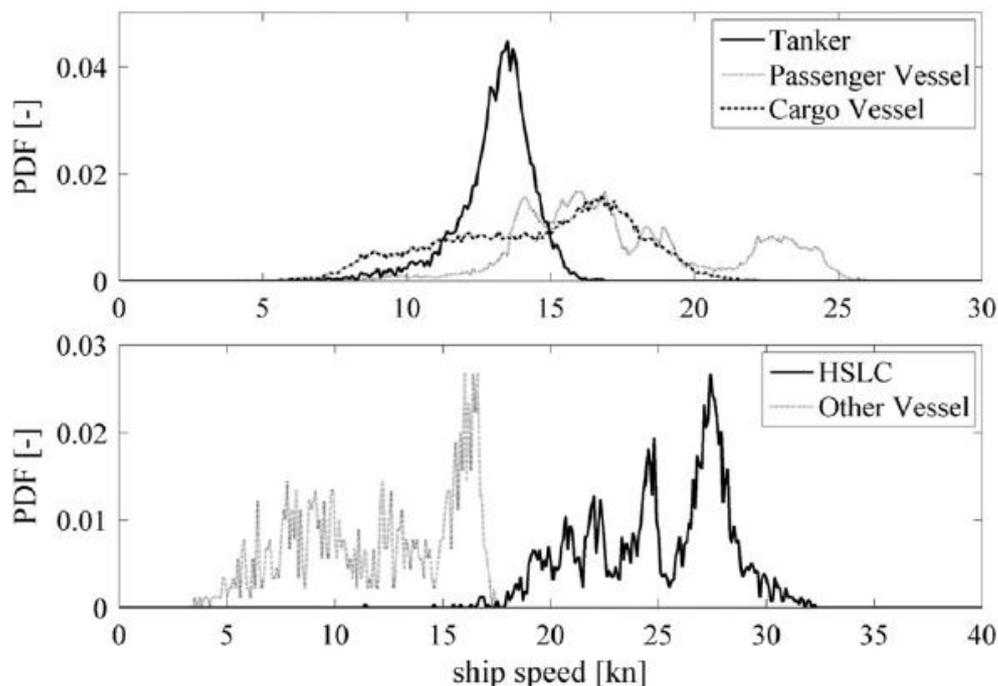


Σχήμα 3.13 Σύγκριση των κατανομών των μηκών των πλοίων ανά τύπο πλοίου στον Κόλπο της Φινλανδίας, με βάση δεδομένα AIS του 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).

### 3.5.14. Κατανομή των ταχυτήτων των πλοίων

Για οικονομικούς λόγους, διάφοροι τύποι πλοίων ταξιδεύουν με διαφορετικές υπηρεσιακές ταχύτητες: τα δεξαμενόπλοια είναι γενικά αργότερα από τα φορτηγά πλοία, ενώ τα επιβατηγά λειτουργούν σε ακόμη μεγαλύτερες ταχύτητες (Lewis, 1989). Οι περιβαλλοντικές συνθήκες επιτρέπουν συνήθως στα πλοία να πλέουν με την ταχύτητα σχεδιάσεως τους στην ανοιχτή θάλασσα, ανεξάρτητα από τον προορισμό. Αυτό συνεπάγεται ότι η κατανομή των ταχυτήτων των πλοίων μπορεί να ληφθεί ως ανεξάρτητη της διαδρομής, αλλά θα έπρεπε να ληφθεί ως έντονα

εξαρτημένη από τον τύπο του πλοίου. Παρά ταύτα, αυτό είναι σαφώς μία απλούστευση καθώς η ταχύτητα του πλοίου στην πραγματικότητα αλλάζει λόγω τοπικών συνθηκών ναυσιπλοΐας ή κανονισμών. Οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για τις ταχύτητες των πλοίων, των τύπων πλοίων που λήφθηκαν υπόψη απεικονίζονται στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14 Κατανομή των ταχυτήτων των πλοίων στον Κόλπο της Φινλανδίας ανά τύπο πλοίου, με βάση δεδομένα AIS του 2006 (Goerlandt and Kujala, 2011).

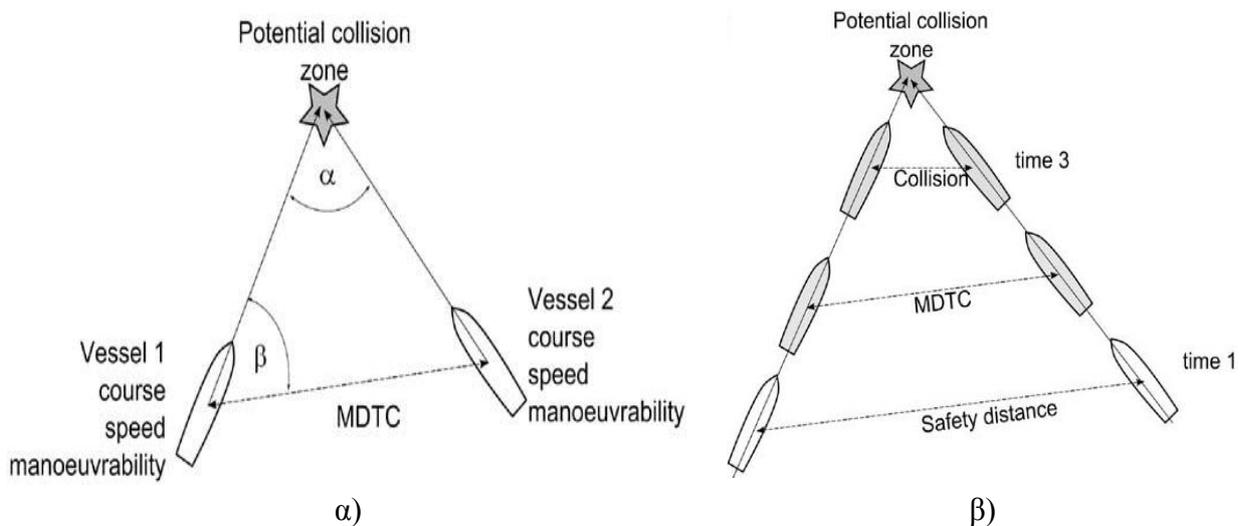
Συμπερασματικά, μέσω της παρουσίασης των μεθοδολογιών που εφαρμόστηκαν από τους Goerlandt and Kujala (2011) γίνεται αντιληπτός ο στατιστικός χαρακτήρας του μοντέλου που προτείνεται από τη μελέτη τους, με βάση τη διάκριση που γίνεται στο παρόν κεφάλαιο.

### 3.6. Μοντέλο γεωμετρικής προσέγγισης της σύγκρουσης

Ενδεικτικά διεξάγεται συνοπτική παρουσίαση ενός ποσοτικού – γεωμετρικού μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους Montewka et al. (2011b). Βάσει του μοντέλου προτείνεται ένα γεωμετρικό κριτήριο για τον καθορισμό της σύγκρουσης ανάμεσα σε πλοία. Η παρουσίαση εστιάζει στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου σύμφωνα με τα οποία γίνεται η διάκριση ανάμεσα στα μοντέλα.

### 3.6.1. Εισαγωγή στο μοντέλο MDTC

Το μοντέλο MDTC (Minimum Distance To Collision) παρουσιάστηκε σε μία προηγούμενη εργασία των (Montewka et al., 2010) και αναπτύχθηκε περαιτέρω σε αυτή τη μελέτη, είναι βασισμένο στην αρχική υπόθεση, ότι δύο πλοία συγκρούονται εάν η απόσταση ανάμεσα τους γίνει μικρότερη από μία συγκεκριμένη τιμή, αποκαλούμενη MDTC. Αυτή η τιμή MDTC δεν είναι ένας σταθερός αριθμός αλλά υπολογίζεται δυναμικά για κάθε τύπο πλοίου και για κάθε συνάντηση ξεχωριστά. Ως εκ τούτου αλλάζει ανάλογα με την περίπτωση. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή MDTC είναι: οι ελικτικές ικανότητες του πλοίου, η γωνία της διασταύρωσης (η οποία ορίζεται ως  $\alpha$  στο Σχήμα 3.15 α)), ο σχετικός άξονας από το ένα σκάφος στο άλλο (ο οποίος ορίζεται από τη γωνία  $\beta$  στο Σχήμα 3.15 α)) και ένα πρότυπο ελιγμών αποφυγής (το ένα πλοίο να κινείται ή και τα δύο). Στη προηγούμενη μελέτη, εφαρμόστηκε μία απλοποιημένη μέθοδος, κατά την οποία υποτίθεται ότι δύο σκάφη συναντώνται σε ένα σταθερό σχετικό άξονα ενώ προχωρούν με τους υπηρεσιακές τους ταχύτητες. Η παρούσα μελέτη θεωρεί ένα ευρύ φάσμα για τη γωνία του σχετικού άξονα, που ποικίλει από 10 έως 80 μοίρες και λαμβάνει υπόψη δύο διαφορετικές ρυθμίσεις μηχανής για κάθε τύπο πλοίου, οπότε παρέχει λεπτομερέστερα αποτελέσματα.



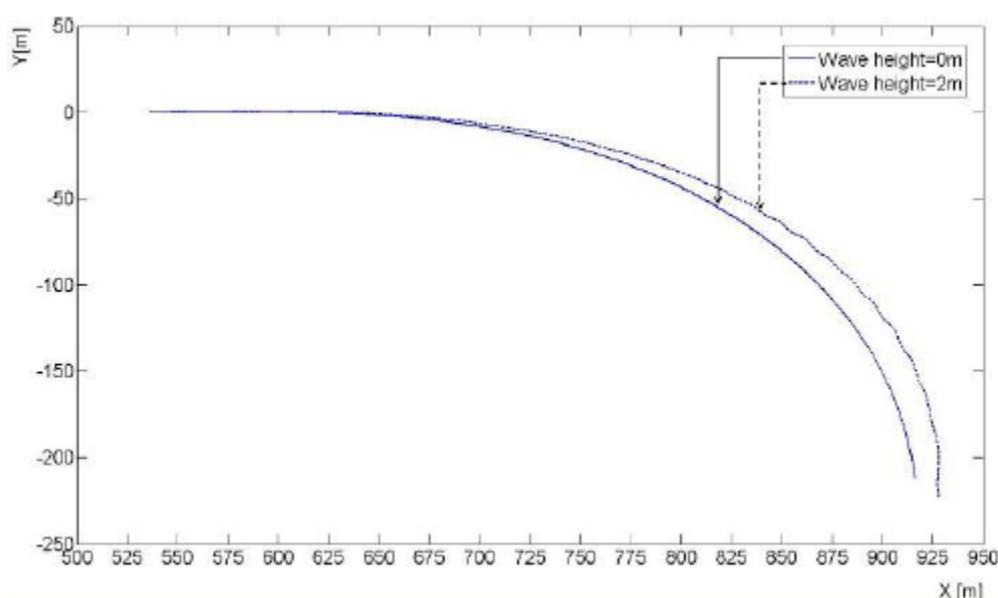
Σχήμα 3.15 Συσχέτιση ανάμεσα στην τιμή MDTC, την απόσταση ασφαλούς διέλευσης και της σύγκρουσης (Montewka et al., 2010)

### 3.6.2. Ερευνητικό μοντέλο

Η θεωρία του μοντέλου και η προκαταρκτική έρευνα με σκοπό τον ορισμό της «ζώνης σύγκρουσης» παρουσιάστηκαν από τους (Montewka et al. 2010). Σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας σχετικά με τους διαφορετικούς τύπους πλοίων, τις ταχύτητες των πλοίων και τις διάφορες γωνίες συνάντησης. Μόνο η επίπεδη κίνηση του πλοίου λαμβάνεται υπόψη και γίνεται η υπόθεση ότι η ναυσιπλοΐα διεξάγεται σε βαθύ νερό. Ακόμη γίνεται η υπόθεση ότι οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες δεν χειροτερεύουν σημαντικά την ικανότητα ελιγμών των πλοίων που πλέουν στο υπό ανάλυση τμήμα του Κόλπου της

Φινλανδίας. Για να επικυρωθεί αυτό, προσομοιώθηκε ένας ελιγμός κυκλικής στρέψης προς τα δεξιά, για πλοίο τύπου RoPax, για δύο διαφορετικές συνθήκες κυματισμών (χωρίς κυματισμούς και με ένα μέσο ύψος κύματος για τον Κόλπο της Φινλανδίας). Σύμφωνα με τους (Pettersen et al. 2010) και (Raamet et al. 2010) το μέσο μηνιαίο ύψος κύματος που καταγράφηκε στην υπό ανάλυση περιοχή (η θάλασσα μεταξύ Ελσίνκι και Ταλλίν) δεν ξεπερνά τα 2 μέτρα και αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση. Για αυτό το σκοπό υιοθετήθηκε το μοντέλο κίνησης πλοίου Laidyn (Matusiak 2007).

Τα αποτελέσματα επέτρεψαν να διατηρηθούν οι υποθέσεις, καθώς η διαφορά μεταξύ των τροχιών ενός πλοίου σε δύο διαφορετικά ύψη κύματος φαίνεται να είναι αμελητέα για τους σκοπούς αυτής της έρευνας (Σχήμα 3.16).



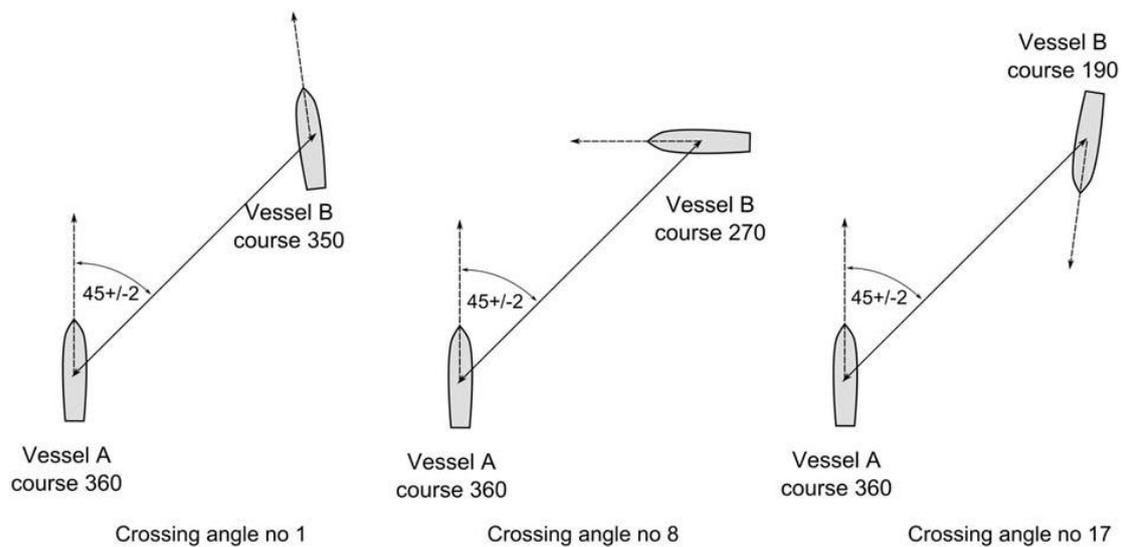
Σχήμα 3.16 Καμπύλες στρέψης ενός RoPax σε δύο διαφορετικά ύψη κύματος Montewka et al. (2011b).

### 3.6.3. Τα πλοία που λήφθηκαν υπόψη

Στην πορεία της ανάλυσης θεωρήθηκαν τέσσερις κύριοι τύποι πλοίων: ένα επιβατηγό πλοίο, ένα Containership, ένα RoPax και ένα δεξαμενόπλοιο. Σε κάθε σενάριο, τα πλοία υποτίθεται να πλέουν με δύο διαφορετικές ρυθμίσεις στις μηχανές τους (εκτός από το επιβατηγό πλοίο που υποτίθεται να πλέει πάντα με τη μέγιστη ταχύτητα), κατά συνέπεια προκύπτουν 42 σενάρια συνάντησης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18. Χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες συντομογραφίες: 'FA', για full ahead και 'HA', για half ahead. Η συντομογραφία 'FA' αντιστοιχεί σε μία μέση ταχύτητα ενός πλοίου δεδομένου τύπου όπως αποκτήθηκε από καταγεγραμμένα δεδομένα AIS. Η συντομογραφία 'HA' δεν αντιστοιχεί σε μία ρύθμιση της μηχανής, μάλλον αντανακλά ένα εύρος καταγεγραμμένων τιμών ταχυτήτων για δεδομένο τύπου πλοίου στην υπό ανάλυση περιοχή. Η τιμή για το 'HA' για δεδομένο τύπο πλοίου υπολογίστηκε αφαιρώντας την τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή.

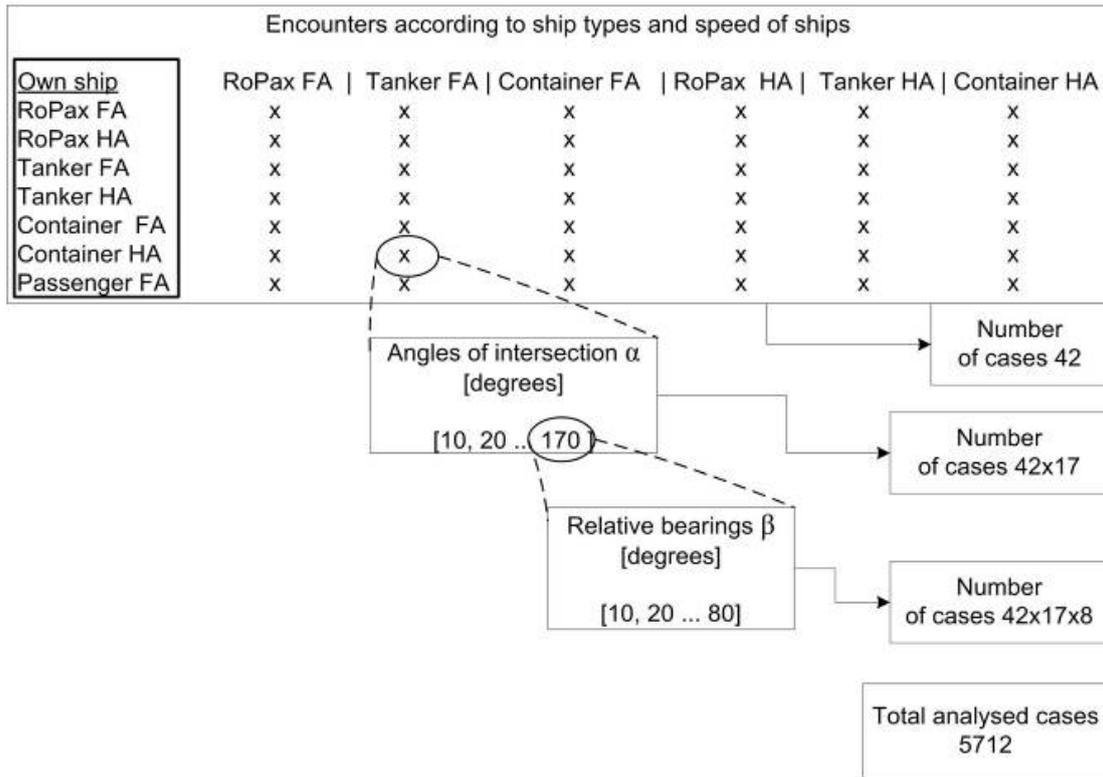
### 3.6.4. Σενάρια συνάντησης

Κάθε σενάριο συνάντησης εκτελείται για δεκαεφτά γωνίες διασταύρωσης ( $\alpha$ ), που κυμαίνονται από 10 έως 170 μοίρες με προσαύξηση 10 μοιρών. Όπου 10 μοίρες σημαίνουν σχεδόν προσπέραση (το σκάφος B σε μία πορεία 350 μοιρών) και 170 παριστάνουν σχεδόν μετωπική συνάντηση (το σκάφος B σε μία πορεία 190 μοιρών), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.17. Στην κατάσταση που απεικονίζεται εκεί θεωρείται το ένα πλοίο να «βλέπει» το άλλο υπό σχετικό άξονα γωνίας 45 μοιρών. Στην πορεία του πειράματος, κάθε γωνία διασταύρωσης υπολογίζεται για ένα εύρος σχετικών αξόνων από 10 έως 80 μοίρες, μετρώντας ως προς το πρωραίο τμήμα του ενός πλοίου.



Σχήμα 3.17 Σχετικές θέσεις των πλοίων, με τρεις επιλεγμένες γωνίες διασταύρωσης, πριν προχωρήσουν σε ελιγμούς, (Montewka et al.2010).

Για κάθε συνάντηση πλοίων με μία δεδομένη γωνία ( $\alpha$ ) και έναν δεδομένο άξονα ( $\beta$ ), αποκτήθηκε μία τιμή MDTC. Όπως προσδιορίστηκε στο διάγραμμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18, σε σύνολο αποκτήθηκαν 5712 τιμές MDTC. Κατόπιν για κάθε γωνία διασταύρωσης ( $\alpha$ ) αποκτάται η μέγιστη τιμή MDTC από τις οκτώ τιμές (καθώς θεωρούνται οκτώ σχετικοί άξονες). Επίσης καταδεικνύεται ο σχετικός άξονας ο οποίος είναι ο δυσμενέστερος από τη σκοπιά της αποφυγής της σύγκρουσης και ο οποίος απαιτεί τον περισσότερο χώρο για ελιγμούς. Για περαιτέρω στατιστική ανάλυση επιλέχθηκαν 714 τιμές MDTC από σύνολο 5712 για κάθε πρότυπη διαδικασία ελιγμών.



Σχήμα 3.18 Ερευνητικό μοντέλο [Montewka et al. \(2011b\)](#).

### 3.6.5. Πρότυπες διαδικασίες ελιγμών

Στην περίπτωση της πρώτης πρότυπης διαδικασίας ελιγμών, το ένα πλοίο εκτελεί μία ενέργεια αποφυγής, στρίβοντας κυκλικά και το άλλο πλοίο ακολουθεί την αρχική του πορεία. Στην περίπτωση της δεύτερης πρότυπης διαδικασίας ελιγμών, τα δύο πλοία εκτελούν κυκλικούς ελιγμούς ώστε να αποφύγουν τη σύγκρουση. Θεωρούνται οι ακόλουθες απλουστεύσεις στην μεθοδολογία:

- στην περίπτωση πρότυπης διαδικασίας αποφυγής όπου δύο σκάφη εκτελούν κυκλικές στροφές, και τα δύο σκάφη ξεκινούν τους ελιγμούς τους ταυτόχρονα.
- τα πλοία στρέφουν σε αντίθετες κατευθύνσεις το ένα από το άλλο, γεγονός το οποίο συνεπάγεται απομάκρυνση του ενός από το άλλο για να αποφευχθεί η σύγκρουση και να μειωθεί η χρονική διάρκεια που βρίσκονται σε εγγύτητα (αυτή η υπόθεση ικανοποιεί τις απαιτήσεις των COLREG, όπου καθορίζεται ότι τα πλοία πρέπει να αποφύγουν να αλλάξουν πορείες το ένα προς την κατεύθυνση του άλλου εφόσον βρίσκονται σε κοντινή απόσταση).
- οι ρυθμίσεις των μηχανών των πλοίων και τα πηδάλια τους διατηρούνται σταθερά κατά τη διάρκεια των ελιγμών.
- η επίδραση των καιρικών συνθηκών αμελείται.
- οι υδρομηχανικές αλληλεπιδράσεις πλοίου με πλοίο παραλείπονται.

### 3.6.6. Εκτίμηση MDTC

Για να υπολογιστεί η τιμή MDTC για ένα δεδομένο ζεύγος σκαφών, χρησιμοποιείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος. Η βασική υπόθεση είναι ότι τα δύο πλοία συγκρούστηκαν σε μία χρονική στιγμή  $t_0$ . Κατόπιν ξεκινώντας από αυτή τη χρονική στιγμή εφαρμόζεται ο αντίστροφος επαναληπτικός αλγόριθμος. Σχεδιάζονται δύο τροχιές δύο πλοίων και οι διαδοχικές θέσεις των κέντρων βάρους των πλοίων αποτυπώνονται κάθε δευτερόλεπτο ( $dt=1s$ ). Εάν τα αντίστοιχα περιγράμματα των πλοίων που ακολουθούν τις τροχιές παρουσιάζουν τουλάχιστον ένα κοινό σημείο, θεωρείται ότι συγκρούστηκαν, ο αλγόριθμος αυξάνει την αρχική απόσταση μεταξύ των δύο πλοίων κατά μία σταθερή τιμή ίση με  $0.1LOA_{average}$ . Οι τροχιές επανασχεδιάζονται ξεκινώντας από τις νέες αρχικές θέσεις των πλοίων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου τα περιγράμματα των δύο πλοίων δεν επικαλύπτονται σε καμία χρονική στιγμή για ένα δεδομένο σχετικό άξονα.

Οι νέες αρχικές θέσεις ορίζονται μετακινώντας το πλοίο B μακρύτερα από το πλοίο A. Για ένα δεδομένο σενάριο συνάντησης (μία δεδομένη γωνία διασταύρωσης και έναν δεδομένο σχετικό άξονα) τα πλοία μετακινούνται απομακρύνοντας το ένα από το άλλο κατά μήκος μίας γραμμής ενός δεδομένου σχετικού άξονα (γραμμή β). Για την απλούστευση των υπολογισμών γίνεται η υπόθεση ότι το ένα πλοίο διατηρεί την αρχική του θέση, ενώ το άλλο μετακινείται μακρύτερα κατά μήκος της γραμμής β.

Στην κατάσταση όπου δύο τροχιές δεν έχουν κανένα κοινό σημείο και τα περιγράμματα των πλοίων δεν επικαλύπτονται, η αρχική θέση του σκάφους B καταγράφεται (καθώς η αρχική θέση του πλοίου A ήταν πάντα (0,0)), και η απόσταση μεταξύ των δύο σημείων υπολογίζεται και αποθηκεύεται. Αυτή η απόσταση ονομάζεται MDTC για έναν δεδομένο σχετικό άξονα. Καθώς κάθε σενάριο συνάντησης αναλύεται για ένα εύρος σχετικών αξόνων (από 10 έως 80 μοίρες), η διαδικασία που περιγράφηκε επαναλαμβάνεται για όλους τους σχετικούς άξονες, αποδίδοντας οκτώ τιμές MDTC για κάθε γωνία διασταύρωσης  $\alpha$ . Τελικά αποκτάται η μέγιστη τιμή MDTC από τις οκτώ. Αυτή η τιμή θεωρείται μία τιμή MDTC για μία δεδομένη γωνία διασταύρωσης. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις γωνίες διασταύρωσης, κατόπιν για κάθε πρότυπη διαδικασία ελιγμών. Έτσι αποκτήθηκαν οι πίνακες τιμών MDTC.

Για να προσδιοριστούν οι πίνακες τιμών MDTC, όλες οι διαδικασίες κωδικοποιήθηκαν σε Matlab. Επιλέχθηκε η έλλειψη, ως μία πολυγωνική περιοχή η οποία θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει το περίγραμμα ενός πλοίου. Για να προσδιοριστεί εάν τα δύο περιγράμματα των πλοίων (αντιπροσωπευόμενα από δύο ελλείψεις) επικαλύπτονται, εφαρμόζεται η ακόλουθη συνάρτηση της Matlab:

$$\mathbf{IN}=\text{inpolygon}(X,Y,xv,yv) \quad (3.7)$$

Επιστρέφει έναν πίνακα  $\mathbf{IN}$  του ίδιου μεγέθους με τα  $X$  και  $Y$ . Σε κάθε στοιχείο του ( $\mathbf{IN}$ ) ανατίθεται η τιμή 1 ή 0 ανάλογα με το αν το σημείο  $(X(p,q),Y(p,q))$  βρίσκεται

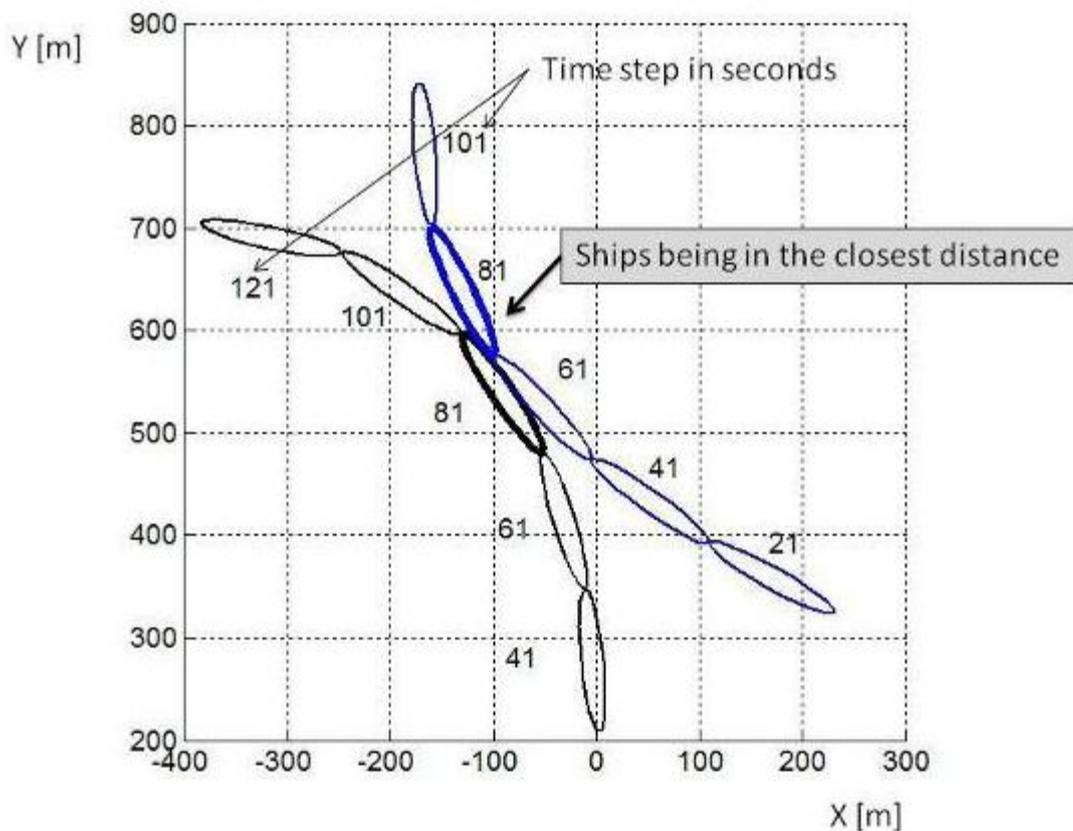
ενός της πολυγωνικής περιοχής της οποίας οι κορυφές ορίζονται από τα διανύσματα  $x_n$  και  $y_n$ .

Προς όφελος της αποδοτικότητας των υπολογισμών, κάθε έλλειψη μετασχηματίζεται σε διακριτή μορφή και το πλήθος των σημείων που αντιπροσωπεύουν την έλλειψη είναι 24. Οι άξονες της έλλειψης ορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{aligned} a &= 0.5LOA \\ b &= 0.5B \end{aligned} \quad (3.8)$$

όπου το  $a$  υποδηλώνει τον μεγάλο άξονα, το  $b$  τον μικρό άξονα,  $LOA$  είναι το συνολικό μήκος του πλοίου και  $B$  το πλάτος του.

Η απόκτηση μίας τιμής MDTC για μία δεδομένη συνάντηση συνεπάγεται ασφαλή διέλευση των δύο πλοίων, γεγονός το οποίο αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου αυτά τα δύο πλοία που προσεγγίστηκαν με τις ελλείψεις, θα είναι πάντα διαχωρισμένα και δεν θα εμφανίζεται σημείο τομής σε κανένα βήμα της διαδικασίας αποφυγής της σύγκρουσης. Μία γραφική ερμηνεία του παραπάνω αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.19, όπου και τα δύο πλοία βρίσκονται στην πλησιέστερη απόσταση στο χρονικό βήμα 81sec., ωστόσο είναι ακόμη διαχωρισμένα.



Σχήμα 3.19 Τα πλοία ως ελλείψεις και ερμηνεία ενός περάσματος χωρίς επαφή [Montewka et al. \(2011b\)](#).

Αυτή η εργασία αποτελεί μία νέα μέθοδο για τον ορισμό της ζώνης σύγκρουσης για συναντήσεις πλοίου με πλοίο. Η παράμετρος που αποκαλείται MDTC είναι ένα δεδομένο εισόδου για το μοντέλο που υπολογίζει την πιθανότητα σύγκρουσης πλοίου με πλοίο. Λαμβάνει υπόψη τη δυναμική του πλοίου, πρότυπες κυκλοφοριακές συνθήκες και εμμέσως τις ανθρώπινες ενέργειες (πρότυπες διαδικασίες ελιγμών)

Στην πορεία της ανάλυσης που παρουσιάστηκε σε αυτή τη μελέτη αποκτήθηκαν τρεις διαφορετικοί πίνακες που αντιπροσωπεύουν τρεις τύπους ζωνών σύγκρουσης. Η στατιστική ανάλυση δείχνει ότι η διάσταση μίας ζώνης σύγκρουσης εξαρτάται κυρίως στην πρότυπη διαδικασία ελιγμών. Στην περίπτωση που και τα δύο πλοία εκτελούν ενέργειες αποφυγής της σύγκρουσης, ένας πίνακας περιγράφει όλους τους τύπους των πλοίων που αναλύονται. Ωστόσο στην περίπτωση όπου μόνο ένα πλοίο εκτελεί ενέργειες αποφυγής της σύγκρουσης, αποκτήθηκαν δύο πίνακες, όπου ο ένας λαμβάνει υπόψη τα δεξαμενόπλοια και ο άλλος τους υπόλοιπους τύπους πλοίων.

Το πείραμα που οδηγεί στον πίνακα εκτίμησης της MDTC βασίζεται σε ένα μοντέλο επίπεδης κίνησης του πλοίου και οι υποθέσεις αφορούν βαθύ νερό, έλλειψη εξωτερικών δυνάμεων και υδρομηχανικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πλοίων. Ωστόσο το μέγεθος των σκαφών που λαμβάνονται υπόψη επιτρέπει την δήλωση ότι οι επικρατούσες καταστάσεις θάλασσας στη Βαλτική Θάλασσα και ιδιαίτερα στον Κόλπο της Φινλανδίας, δεν επιδρούν σημαντικά στα αποτελέσματα.

Με την περιγραφή του μοντέλου MDTC γίνεται εμφανής ο γεωμετρικός χαρακτήρας της προσέγγισης που υιοθετήθηκε και κατ' επέκταση η κατάταξη του στα γεωμετρικά μοντέλα, σύμφωνα με τη διάκριση που γίνεται στο Κεφάλαιο 3.

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή)

## 4. Ανάπτυξη του Μοντέλου Σύγκρουσης

### 4.1. Θεωρία

#### 4.1.1. Βασικές έννοιες και κριτήρια που συναντώνται σε άλλα μοντέλα σύγκρουσης

Μία επικρατούσα προσέγγιση ανάμεσα στους ερευνητές (Montewka et al., 2010) για την πιθανότητα σύγκρουσης, βασίζεται στην ιδέα που προτάθηκε από τους Fujii et al., (1970) και MacDuff (1974) σύμφωνα με την οποία το πλήθος των συγκρούσεων, κατά την μελετώμενη χρονική περίοδο, εκτιμάται από τον τύπο:

$$N_{\text{Coll}} = N_A \cdot P_C \quad (4.1)$$

όπου  $N_A$  ορίζεται το πλήθος των ανά ζεύγος συναντήσεων πλοίων οι οποίες οδηγούν σε σύγκρουση και  $P_C$  ορίζεται η πιθανότητα αποτυχίας αποφυγής της σύγκρουσης όταν τα πλοία βρίσκονται σε πορεία σύγκρουσης, γνωστή ως πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας (causation probability). Κατά την ίδια προσέγγιση υποτίθεται ότι μία σύγκρουση συμβαίνει όταν δύο πλοία φτάνουν σε μία μεταξύ τους απόσταση ίση με  $D_{ij}$ , η οποία ορίζεται ως «διάμετρος σύγκρουσης» (collision diameter).

Κατά τον Pedersen (1995) ορίζεται η  $D_{ij}$  ως κρίσιμη απόσταση σε ένα συμβάν συνάντησης πλοίων. Αυτή συσχετίζεται με το μήκος και το πλάτος των πλοίων και επιπλέον γίνεται η διάκριση ανάμεσα σε συγκρούσεις όπου οι τροχιές των πλοίων είναι διασταυρούμενες (crossing), που συμβαίνουν κατά την προσπέραση (overtaking) και μετωπικά (head-on). Το μοντέλο του Pedersen έχει ενσωματωθεί σε πλήθος άλλων μελετών (Otto et al., 2002; COWI, 2008; Kujala et al., 2009; Klemola et al., 2009).

Σύμφωνα με τους Fowler and Sorgard (2000) ορίζεται ως συμβάν κρίσιμης συνάντησης όταν δύο πλοία φτάνουν σε μία μεταξύ τους απόσταση όχι μεγαλύτερη από 0.5 Nm. Αυτή η απόσταση αναφοράς είναι ανεξάρτητη από τη γωνία συνάντησης.

Στην εργασία των Montewka et al., (2010) η ελάχιστη απόσταση σύγκρουσης (minimum distance to collision - MDTC) ορίζεται ως η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε δύο πλοία που βρίσκονται σε πορεία σύγκρουσης, η οποία τους επιτρέπει να εκτελέσουν αποτελεσματικούς ελιγμούς αποφυγής της σύγκρουσης. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την τιμή MDTC είναι η ελικτικότητα των πλοίων, η γωνία διασταυρώσεως και ο σχετικός άξονας μεταξύ των δύο πλοίων. Στο μοντέλο γίνεται ακόμη η διάκριση ανάμεσα σε tankers, container ships, passenger ships και πλοία Ro-Ro.

#### 4.1.2. Βασικές έννοιες μέσω των οποίων γίνεται αντιληπτό το μοντέλο

Στις προσπάθειες εκτίμησης του ρίσκου (risk assessment) που αφορούν την ασφάλεια των θαλασσιών μεταφορών, το ρίσκο συχνά ορίζεται ως συνδυασμός της πιθανότητας και των συνεπειών (Goerlandt and Kujala, 2011; Zhang et al., 2013):

$$Risk = P \cdot C \quad (4.2)$$

όπου P ορίζεται η πιθανότητα εμφάνισης του ανεπιθύμητου γεγονότος και C ορίζεται η δριμύτητα των συνεπειών. Μία λεπτομερέστερη αντίληψη σχετική με το ρίσκο και τη σύνδεση μεταξύ πιθανότητας και συνεπειών παρέχεται στην εργασία των Montewka et al., (2014b). Το μοντέλο που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι προσανατολισμένο στην εκτίμηση της πιθανότητας.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές ιδέες που ενσωματώνονται στο μοντέλο. Αρχικά η θαλάσσια κυκλοφορία προσομοιώνεται στοχαστικά εντός της περιοχής ενδιαφέροντος. Κατά τη διάρκεια κάθε κλάσματος προσομοιωμένου χρόνου το συνολικό πλήθος των παραχθέντων από τον αλγόριθμο, πλοίων ελέγχονται ανά ζεύγος, με τρόπο που ελέγχονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί σύμφωνα με την Εξίσωση (4.3), ούτως ώστε να καθοριστεί το πλήθος των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης (collision candidates). Κατόπιν εφαρμόζεται κατάλληλος παράγοντας αιτιώδους συνάφειας (causation factor) και αποκτάται η πιθανότητα σύγκρουσης.

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (4.3)$$

Όπου:

$\binom{n}{k}$  : Συνδυασμοί των  $n$  στοιχείων του συνόλου A ανά  $k$

$n$  : το πλήθος των πλοίων

$k$  : 2

Το κριτήριο σύμφωνα με το οποίο ανιχνεύεται μία σύγκρουση εξαρτάται από δύο παράγοντες: i) από την ύπαρξη σημείου τομής των τροχιών των πλοίων εντός της εκάστοτε περιοχής ελέγχου και ii) από τη χρονική στιγμή άφιξης του κάθε πλοίου στο σημείο τομής. Εννοιολογικά είναι παρεμφερές με το κριτήριο του μισού ναυτικού μιλίου (0.5Nm criterion) των Fowler and Sorgard (2000) και με το κριτήριο της «διαμέτρου σύγκρουσης» (collision diameter) του Pedersen (1995).

Σύμφωνα με το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, το άθροισμα και -επομένως- η μέση τιμή, μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων παρατηρήσεων, ακολουθεί κατά προσέγγιση κανονική κατανομή, ανεξαρτήτως από την κατανομή που ακολουθούν οι παρατηρήσεις. Έστω  $X_1, X_2, \dots, X_n$  ανεξάρτητες και ισόνομες μεταβλητές (ακολουθούν την ίδια κατανομή) με μέση τιμή  $\mu = E(X_i)$  και διακύμανση  $\sigma^2$ . Τότε, καθώς αυξάνει το  $n$ , το άθροισμα  $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$  προσεγγίζει την κανονική κατανομή (Billingsley, 1995).

$$P[N \in A] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_A e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (4.4)$$

Όλες οι τυχαίες μεταβλητές του μοντέλου, οι οποίες αποτελούν τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου, ακολουθούν διάφορες γνωστές κατανομές. Άρα, μετά από «μεγάλο» αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου, εξασφαλίζεται η σύγκλιση των δεδομένων εξόδου σε μία μέση τιμή. Συνεπώς εφαρμόζεται η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo και με πολλαπλές επαναλήψεις επιχειρείται μία «συχνοτική» (frequentist) προσέγγιση της πιθανότητας σύγκρουσης.

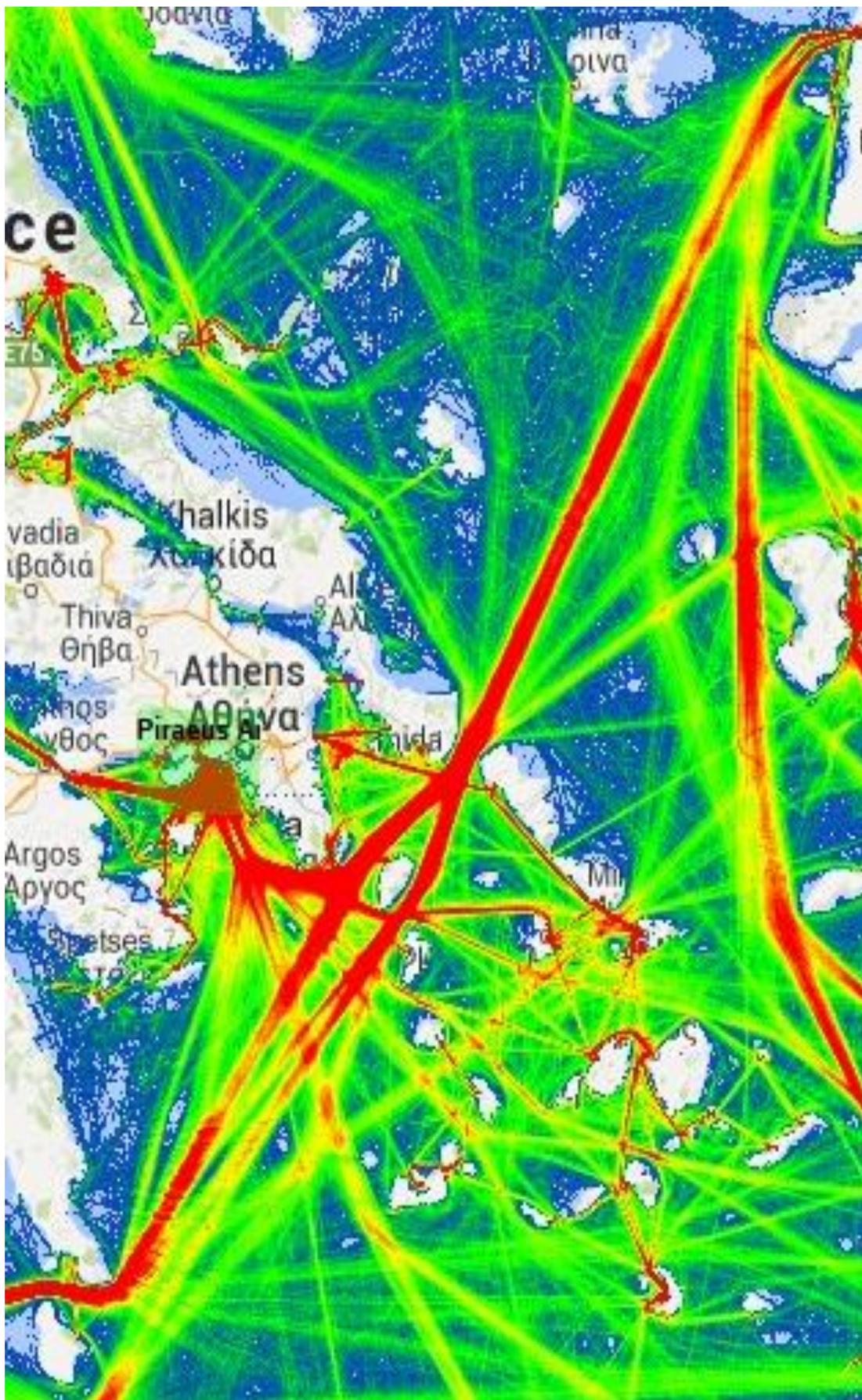
## 4.2. Η υπό μελέτη περιοχή

Η υπό μελέτη περιοχή είναι η θαλάσσια διαδρομή που συνδέει το Στενό των Δαρδανελλίων, το οποίο εντοπίζεται προσεγγιστικά στις συντεταγμένες 40° 1'9.14"N 26° 9'57.90"E, με το Στενό της Ελαφονήσου (η θαλάσσια περιοχή ανάμεσα στην Ελαφονήσο και τα Κύθηρα), το οποίο εντοπίζεται προσεγγιστικά στις συντεταγμένες 36°25'9.12"N 22°58'15.15"E.

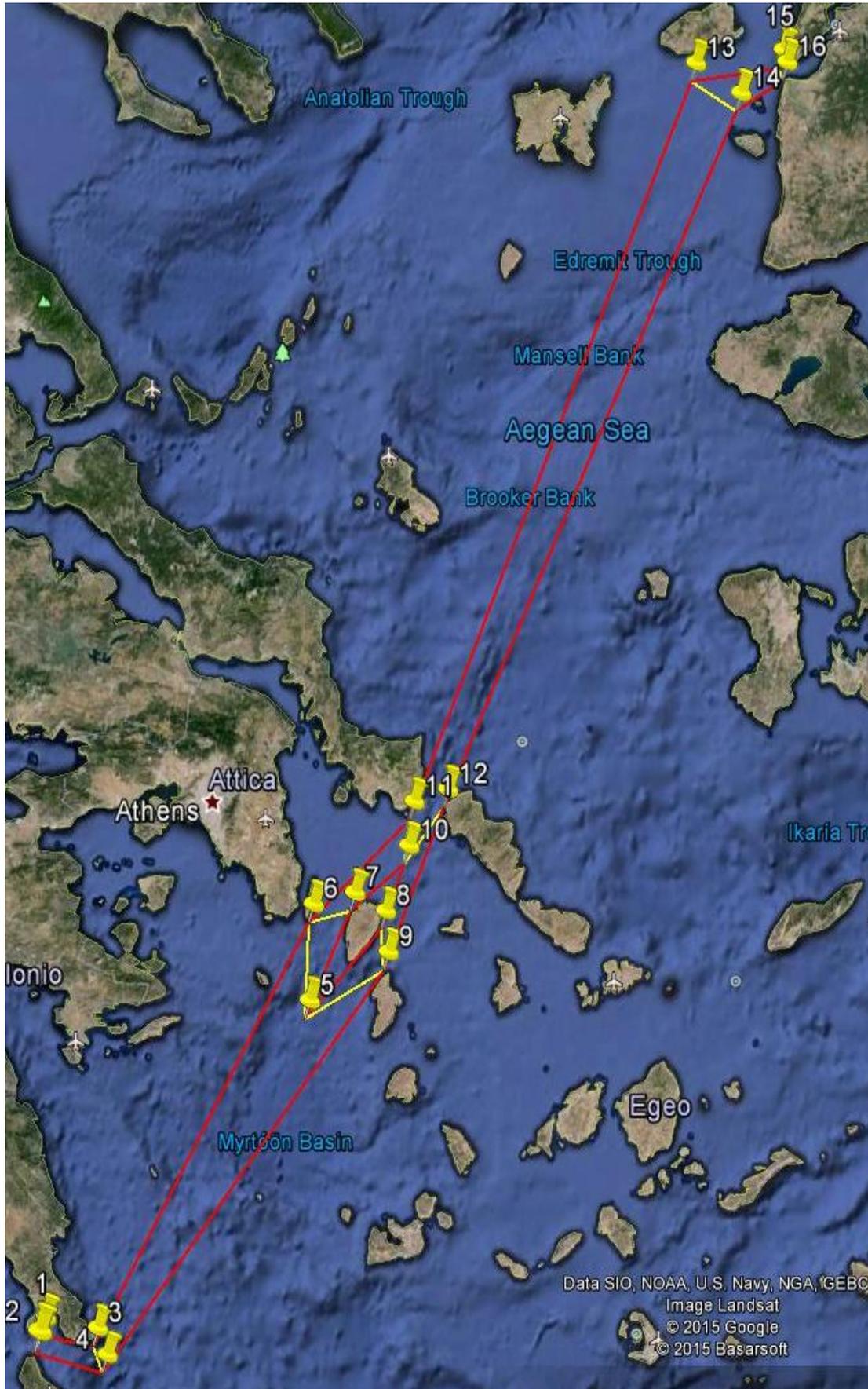
### 4.2.1. Κατασκευή του σχεδίου των διαδρομών

Ο καθορισμός των γεωγραφικών συνόρων της διαδρομής βασίστηκε στον χάρτη πυκνότητας κυκλοφορίας (traffic density map), ο οποίος αποκτήθηκε από την ιστοσελίδα MarineTraffic και απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.

Με χρήση του Google Earth αποκτήθηκαν οι συντεταγμένες του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού (16 σημεία) των συνοριακών σημείων για τον καθορισμό της διαδρομής, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2. Αρχικά τα σημεία από το Google Earth αποκτήθηκαν στο παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς – WGS84 (World Geodetic System 1984), το οποίο είναι γεωκεντρικό με επιφάνεια αναφοράς το ελλειψοειδές της γης. Στην προοπτική απλοποίησης των μετέπειτα εργασιών διεξήχθη η προβολή των συντεταγμένων από το WGS84 στο Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 – ΕΓΣΑ87 (Hellenic Geodetic Reference System 1987 or Greek Geodetic Reference System 1987 – GGRS87). Το ΕΓΣΑ87 είναι ένα μη γεωκεντρικό σύστημα αναφοράς το οποίο ορίζεται επαρκώς από τις συντεταγμένες του γεωδαιτικού σταθμού-κλειδί στο Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου (Dionysos Satellite Observatory) κοντά στην Αθήνα (Delikaroglou, 2008). Η προβολή των συντεταγμένων από το WGS84 στο ΕΓΣΑ87 είναι ανάλογο του μετασχηματισμού συντεταγμένων από πολικές σε καρτεσιανές.



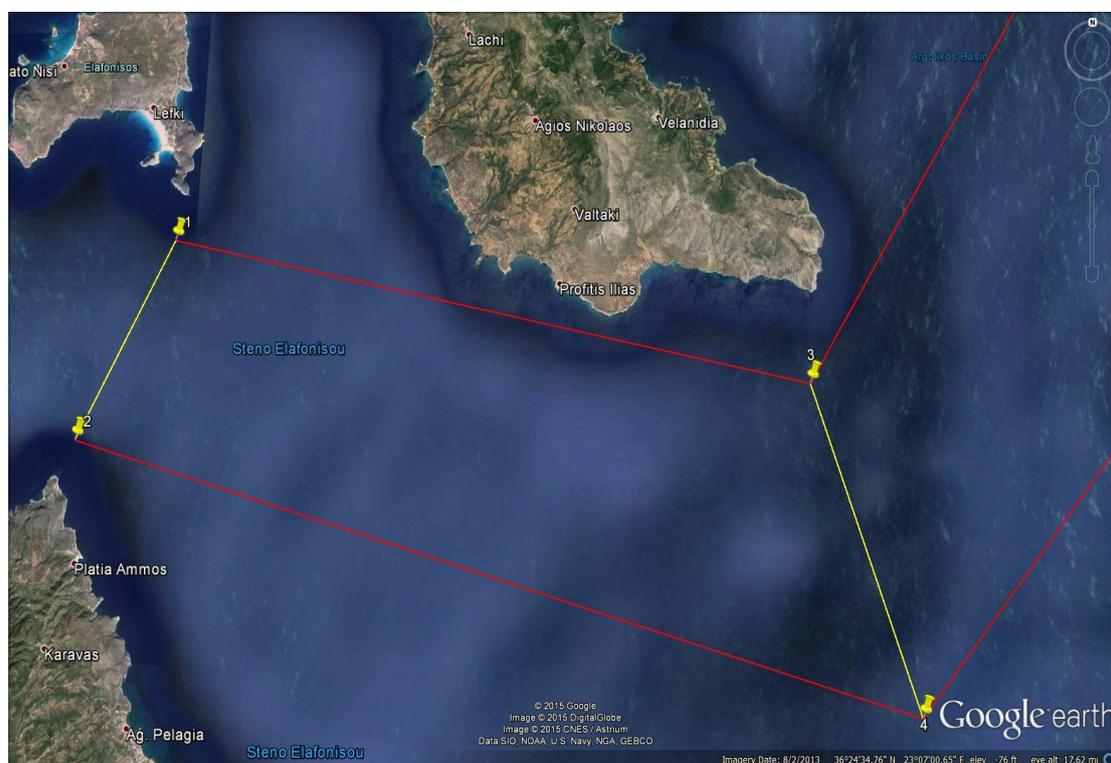
Σχήμα 4.1 Χάρτης Πυκνότητας Κυκλοφορίας (Traffic Density Map).



Σχήμα 4.2 Προσέγγιση της διαδρομής μέσω συντεταγμένων.

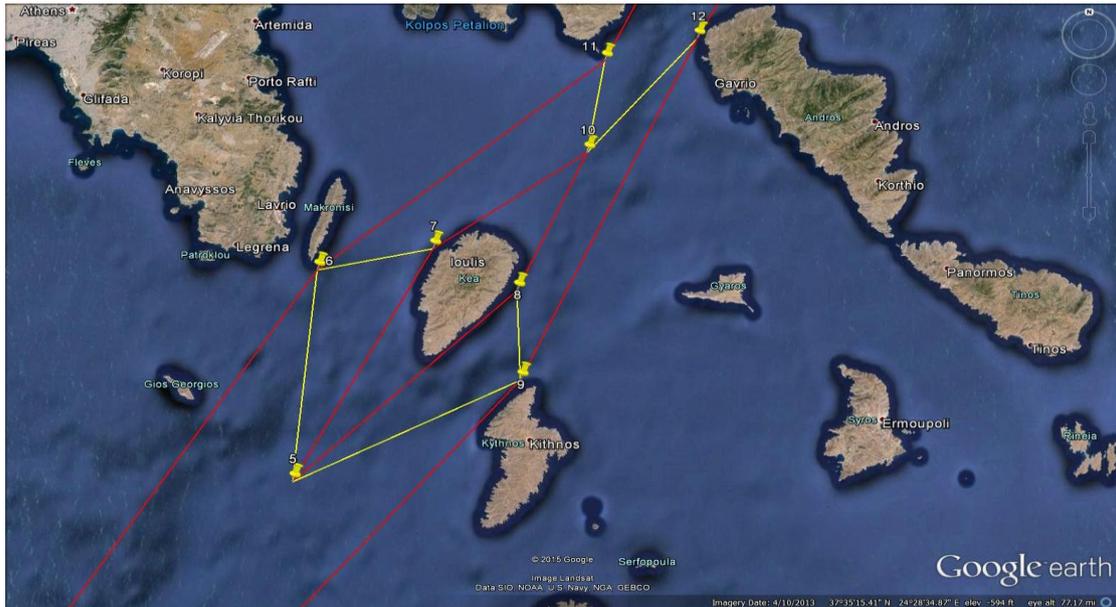
Αναφορικά με την απώλεια ακρίβειας λόγω της προβολής, εξετάστηκε η ενδεικτική μέτρηση του ανατολικού συνόρου της διαδρομής (το οποίο ορίζεται από τα σημεία 2, 4, 9, 12, 14, 16) στο Σχήμα 4.2. Η τιμή που λήφθηκε από το Google Earth είναι 512584m και η τιμή που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τα προβεβλημένα στο ΕΓΣΑ87 σημεία είναι 512460m. Η μέγιστη προκύπτουσα απώλεια ακρίβειας είναι κατά προσέγγιση 0.024% η οποία, εντός του σκοπού της παρούσας μελέτης, θεωρείται αμελητέα.

Μετά την απόκτηση των συνοριακών σημείων ορίζονται οι κόμβοι μέσω των οποίων διέρχεται κάθε πλοίο κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, μέχρι την άφιξη του στον προορισμό. Το ευθύγραμμο τμήμα που ορίζει τον κάθε κόμβο, διαιρείται σε διαστήματα μήκους 100m έκαστο. Κατόπιν αποκτούνται και αποθηκεύονται τα σημεία στα άκρα του κάθε διαστήματος. Αυτά αποτελούν το πλήθος των σημείων διέλευσης του κάθε κόμβου. Οι συνοριακοί κόμβοι (κόμβος 1\_2 και κόμβος 15\_16) ονομάζονται πύλες – πύλη 1\_2 και πύλη 15\_16.



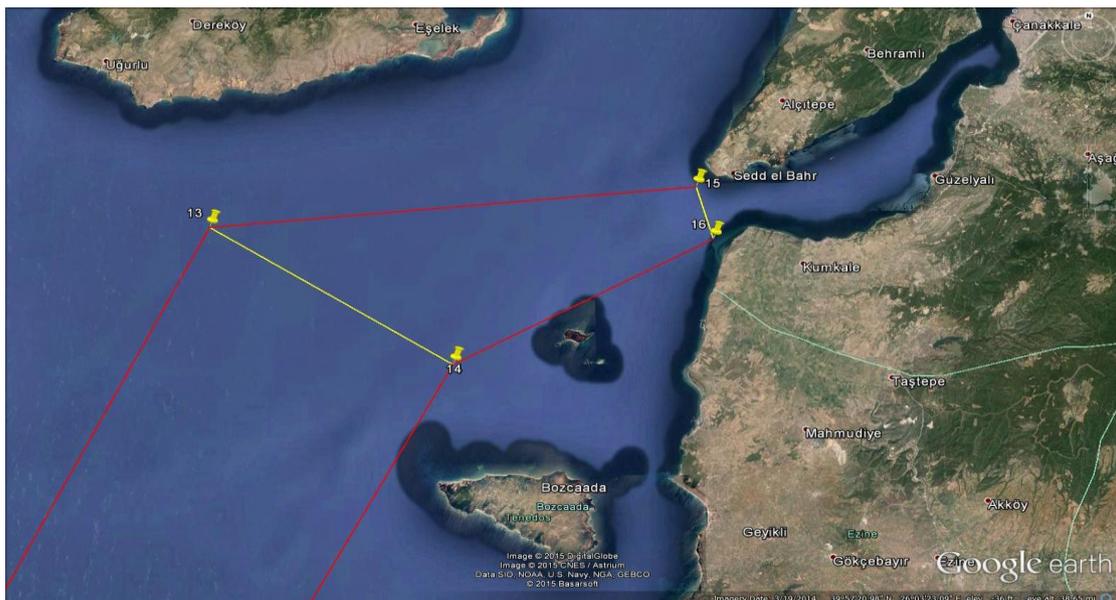
Σχήμα 4.3 Απεικόνιση της πύλης 1\_2 και του κόμβου 3\_4.

Κάθε πλοίο που φτάνει στις πύλες επιλέγει με τυχαίο τρόπο, μέσω ομοιόμορφης κατανομής, ένα σημείο διέλευσης από την αντίστοιχη πύλη και στη συνέχεια, με την ίδια διαδικασία, ένα σημείο διέλευσης από τον κάθε κόμβο. Η σύζευξη των ευθυγράμμων τμημάτων μεταξύ όλων των τυχαία επιλεγμένων σημείων διέλευσης αποτελεί την ακριβή τροχιά του κάθε πλοίου.



Σχήμα 4.4 Απεικόνιση των κόμβων 5\_6, 6\_7, 10\_11, 5\_9, 8\_9, 10\_12.

Για παράδειγμα όταν ένα πλοίο φτάνει στην πύλη 1\_2 επιλέγει τυχαία ένα σημείο διέλευσης από αυτή και στη συνέχεια ένα σημείο διέλευσης από τον κόμβο 3\_4. Κατόπιν επιλέγεται τυχαία, μέσω μίας διωνυμικής κατανομής με ισοπίθανα ενδεχόμενα, ο τρόπος με τον οποίο διεξάγεται η παράκαμψη της Κέας. Κατά συνέπεια επιλέγονται τα αντίστοιχα σημεία διέλευσης είτε από τους κόμβους 5\_6, 6\_7, και 10\_11 είτε από τους κόμβους 5\_9, 8\_9 και 10\_12. Τελικά ένα τυχαίο σημείο διέλευσης επιλέγεται από τον κόμβο 13\_14 και ένα από την πύλη 15\_16. Η αντίστοιχη διαδικασία διενεργείται για κάθε πλοίο που φτάνει, με αντίθετη κατεύθυνση, στην πύλη 15\_16.



Σχήμα 4.5 Απεικόνιση του κόμβου 13\_14 και της πύλης 15\_16.

Η διαδρομή κατασκευάστηκε με τρόπο ώστε τα πλοία να ταξιδεύουν σε ευθείες τροχιές ανάμεσα στους κόμβους. Κάθε πλοίο θεωρείται ότι ταξιδεύει με μία σταθερή ταχύτητα η οποία του αποδίδεται σύμφωνα με τον τύπο του, κατά την άφιξη του στην εκάστοτε πύλη της διαδρομής. Όλα τα μεταβατικά φαινόμενα σε κάθε σημείο διέλευσης αγνοούνται και τα πλοία θεωρείται ότι στρίβουν ακαριαία. Τα πλοία δεν αναλαμβάνουν καμία ενέργεια αποφυγής της σύγκρουσης σύμφωνα με την έννοια της «τυφλής πλοήγησης» (blind navigation). Οι μετεωρολογικές συνθήκες και η κατάσταση της θάλασσας δεν λαμβάνονται υπόψη.

### 4.3. Εκτίμηση του όγκου της κυκλοφορίας

Το πλήθος των πλοίων που φτάνουν σε κάθε πύλη της διαδρομής, κατά τη διάρκεια του ελάχιστου χρόνου προσομοίωσης, προσεγγίζεται με μία ομογενή διαδικασία Poisson. Η διαδικασία Poisson είναι μία στοχαστική διαδικασία η οποία μετράει τον αριθμό των αφίξεων και καταγράφει τις χρονικές στιγμές στις οποίες αυτές εμφανίζονται, εντός δεδομένου χρονικού διαστήματος. Ο χρόνος μεταξύ κάθε ζεύγους διαδοχικών αφίξεων ακολουθεί μία εκθετική κατανομή με παράμετρο  $\lambda$  και κάθε χρονικό μεσοδιάστημα ανάμεσα στις αφίξεις υποτίθεται ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα χρονικά μεσοδιαστήματα. Μία ομογενής διαδικασία Poisson μετράει αφίξεις που εμφανίζονται με σταθερό ρυθμό, έχει χαρακτηριστική παράμετρο του ρυθμού  $\lambda$  έτσι ώστε το πλήθος των αφίξεων στο χρονικό διάστημα  $(t, t+\tau]$  ακολουθεί μια κατανομή Poisson με σχετική παράμετρο  $\lambda\tau$ , όπως περιγράφεται από την Εξίσωση (4.5):

$$P[N(t+\tau) - N(t) = k] = \frac{e^{-\lambda\tau} (\lambda\tau)^k}{k!}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (4.5)$$

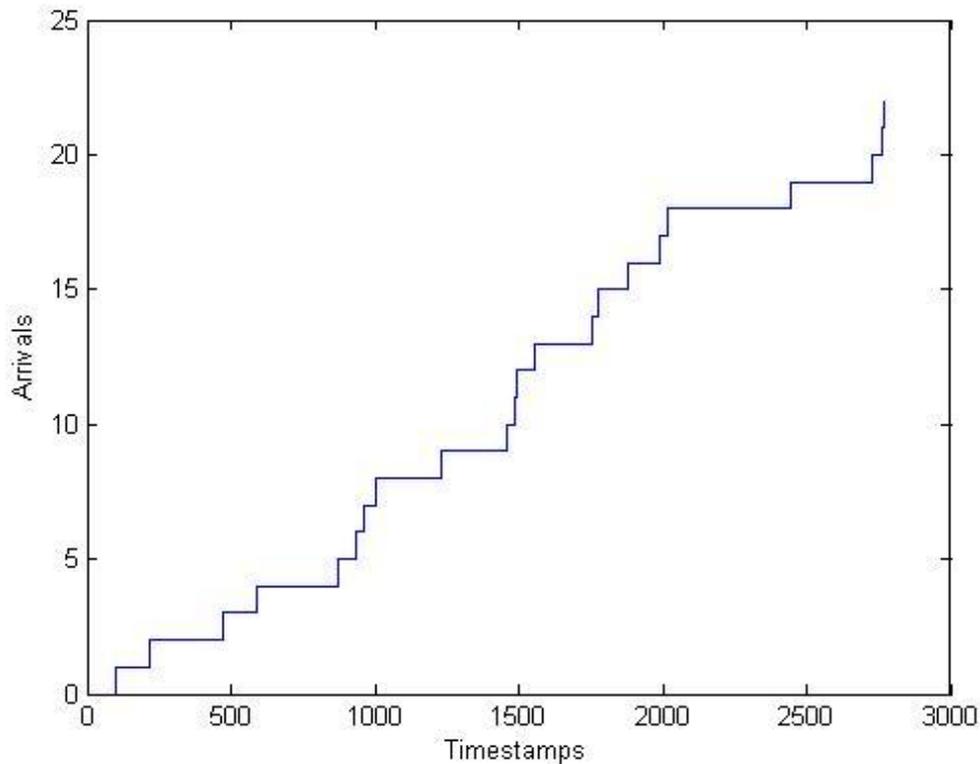
Όπου:

$N(t+\tau) - N(t) = k$  : το πλήθος των αφίξεων στο χρονικό διάστημα  $(t, t+\tau]$ .

$\lambda$  : το αναμενόμενο πλήθος αφίξεων ανά μονάδα χρόνου.

Χαρακτηριστική παράμετρος της διαδικασίας Poisson είναι η παράμετρος  $\lambda$  η οποία εκφράζει το αναμενόμενο πλήθος αφίξεων ανά μονάδα χρόνου. Μολονότι η ομογενής διαδικασία Poisson εφαρμόζεται σε πληθώρα μοντέλων (Pedersen, 1995; Gucma, 2003; Przywarty, 2008; Montewka et al., 2010), στη μελέτη των Goerlandt and Kujala (2011) συμπεραίνεται ότι δεν αποτελεί μία ικανοποιητικά ρεαλιστική μέθοδο προσέγγισης του όγκου της κυκλοφορίας. Οι συγγραφείς αντιμετωπίζουν αυτή την ανεπάρκεια εφαρμόζοντας μία διαδικασία «λέπτυνσης» (thinning process) της παραμέτρου  $\lambda$ , ώστε να προκύψει μία μη ομογενής διαδικασία Poisson όπου η παράμετρος  $\lambda$  είναι συνάρτηση του χρόνου. Στη παρούσα διπλωματική εργασία η ανεπάρκεια αυτή αντιμετωπίζεται εναλλακτικά. Αντί να εφαρμοστεί διαδικασία «λέπτυνσης» της παραμέτρου  $\lambda$ , αυτή εκτιμάται με στοχαστικό τρόπο για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, η οποία διεξάγεται ανά ελάχιστο χρονικό διάστημα προσομοίωσης. Η διαδικασία περιγράφεται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 μία δειγματική διαδρομή (sample path) η οποία

προέκυψε από την εφαρμογή ομογενούς διαδικασίας Poisson, για χρόνο προσομοίωσης 2768min με τυχαία παραχθέν  $\lambda=0.0108$  arrivals/min σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω. Στον άξονα x (χρόνος σε λεπτά) αποτυπώνονται οι χρονικές στιγμές των αφίξεων και στον άξονα y αποτυπώνεται ο αριθμός των αφίξεων.



Σχήμα 4.6 Δειγματική διαδρομή (sample path) ομογενούς διαδικασίας Poisson με  $\lambda=0.0108$  arrivals/min, για χρονικό διάστημα  $(t, t+\tau]=2768$ min.

Το ελάχιστο χρονικό διάστημα προσομοίωσης ταυτίζεται με το χρονικό διάστημα που απαιτείται από το βραδύτερο πλοίο, από τις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων, για την διάνυση της απόστασης μεταξύ της πύλης 1\_2 και της πύλης 15\_16. Υπολογίστηκε η τιμή 2768min, κατά συνέπεια ο απαιτούμενος αριθμός των επαναλήψεων για την προσομοίωση της χρονικής περιόδου ενός έτους είναι 190 (συγκεκριμένα προσομοίωση χρονικής περιόδου ενός έτους και 5.35 ωρών).

Αξιοποιήθηκε ο χάρτης πραγματικού χρόνου της ιστοσελίδας MarineTraffic για την καταγραφή παρατηρήσεων αναφορικά με: α) τον συνολικό αριθμό των πλοίων που εντοπίστηκαν εντός των συνόρων τη διαδρομής, β) την κατεύθυνση των πλοίων αυτών (βορειοανατολική / νοτιοδυτική) και γ) την βασική διάκριση τους με βάση τον τύπο, η οποία σύμφωνα με το MarineTraffic γίνεται σε “Tanker”, “Cargo” και “Passenger”. Ουσιαστικά η διάκριση γίνεται ανάμεσα σε πλοία που μεταφέρουν υγρό φορτίο, ξηρό φορτίο και επιβάτες. Καταγράφηκε ιστορικό 20 ημερών σε τυχαίες στιγμές εντός της ημέρας.

Στο μοντέλο ενσωματώνονται 8 βάσεις δεδομένων με τις υπηρεσιακές ταχύτητες των πλοίων, οι οποίες αποκτήθηκαν από το IHS Sea-web, σύμφωνα με τον τύπο πλοίου: Tanker (5276 πλοία), Gas Carrier (1463 πλοία), Bulk Carrier (9371 πλοία), Containership (4869 πλοία), General Cargo (8404 πλοία), Reefer (678 πλοία), Ro-Ro Cargo (1526 πλοία) και Cruise Ship (320 πλοία). Από αυτές προέκυψαν οι αντίστοιχες κατανομές ταχυτήτων ανά τύπο πλοίου.

Οπότε, εάν η καταγεγραμμένη παρατήρηση υποδεικνύει “Tanker” προκύπτει η πολυωνυμική κατανομή (συγκεκριμένα διωνυμική) για τον ακριβή τύπο πλοίου, με πιθανότητα για το κάθε ενδεχόμενο (τύπο πλοίου) που δίνεται από τις εξισώσεις (4.6), (4.7):

$$P_{\text{Tanker}} = 0.7829 \quad (4.6)$$

$$P_{\text{GasCarrier}} = 0.2171 \quad (4.7)$$

Εάν η παρατήρηση υποδεικνύει “Cargo” προκύπτει η πολυωνυμική κατανομή για τον ακριβή τύπο πλοίου, με πιθανότητα για το κάθε ενδεχόμενο που δίνεται από τις εξισώσεις (4.8), (4.9), (4.10), (4.11), (4.12):

$$P_{\text{BulkCarrier}} = 0.3771 \quad (4.8)$$

$$P_{\text{Containership}} = 0.1959 \quad (4.9)$$

$$P_{\text{GeneralCargo}} = 0.3382 \quad (4.10)$$

$$P_{\text{Reefer}} = 0.0273 \quad (4.11)$$

$$P_{\text{RoRoCargo}} = 0.0615 \quad (4.12)$$

Εάν η παρατήρηση υποδεικνύει “Passenger” είναι βέβαιο ενδεχόμενο ότι ο ακριβής τύπος πλοίου είναι Cruise Ship καθώς δεν υπάρχει ακτοπλοϊκή γραμμή εντός της διαδρομής. Οπότε:

$$P_{\text{CruiseShip}} = 1 \quad (4.13)$$

Αρχικά, με βάση τις καταγεγραμμένες παρατηρήσεις, εξάγονται δύο κατανομές Poisson (σημείωση: να μην συγχέονται με τις τελικές διαδικασίες Poisson μέσω των οποίων προκύπτει ο όγκος της κυκλοφορίας): μία για το πλήθος των πλοίων με βορειοανατολική κατεύθυνση και μία για το πλήθος των πλοίων με νοτιοδυτική κατεύθυνση. Επιπλέον εξάγονται δύο τριωνυμικές κατανομές αναφορικά με την διάκριση των πλοίων σε “Tanker”, “Cargo” και “Passenger”, για κάθε κατεύθυνση.

Σε κάθε επανάληψη ο αλγόριθμος παράγει μία τυχαία τιμή για κάθε μεταβλητή, σύμφωνα με τις προκύπτουσες κατανομές, με την εξής ακολουθία: α) το πλήθος των παρατηρημένων πλοίων εντός της διαδρομής, β) το πλήθος των πλοίων που κατηγοριοποιούνται ως “Tanker”, “Cargo”, “Passenger”, γ) το πλήθος των

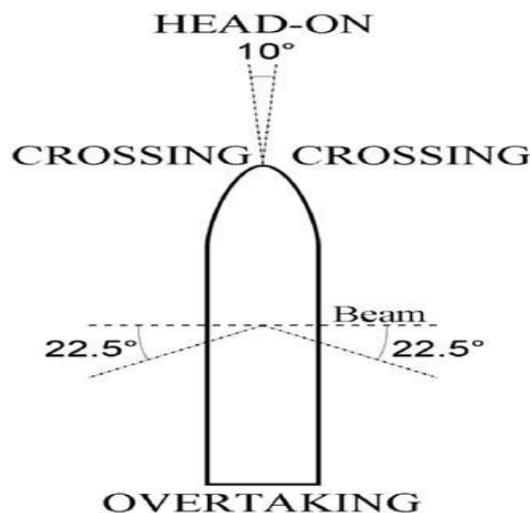
πλοίων που κατηγοριοποιούνται ως Tankers, Gas Carriers, Bulk Carriers, Container Ships, General Cargo, RoRo Cargo, Reefers και Cruise Ships, δ) την ταχύτητα του κάθε πλοίου σύμφωνα με τον ακριβή του τύπο. Αυτή η διαδικασία εκτελείται ξεχωριστά για τα πλοία με βορειοανατολική και νοτιοδυτική κατεύθυνση.

Με τις παραχθείσες τιμές, για κάθε επανάληψη, υπολογίζεται μία μέση ταχύτητα και ακολούθως ο μέσος απαιτούμενος χρόνος για την διάνυση όλης της διαδρομής. Στη συνέχεια γίνεται η υπόθεση ότι κάθε πλοίο ταξιδεύει με αυτή τη μέση ταχύτητα και ότι όλα τα πλοία ισαπέχουν κατά το μήκος της διαδρομής. Διαιρώντας τον απαιτούμενο χρόνο ταξιδιού με το πλήθος των χρονικών μεσοδιαστημάτων ανάμεσα στα παρατηρημένα πλοία (τα οποία είναι συνεπώς ίσα καθώς τα πλοία θεωρούνται ισαπέχοντα) και στη συνέχεια διαιρώντας τον ελάχιστο χρόνο προσομοίωσης (2768min) με το αποκτηθέν πλήθος, γίνεται μία εκτίμηση για το αναμενόμενο πλήθος αφίξεων κατά τη διάρκεια του ελάχιστου χρόνου προσομοίωσης. Αυτή η εκτίμηση γίνεται ξεχωριστά για τα πλοία με διαφορετικές κατευθύνσεις.

Συνδυάζοντας με αυτό τον τρόπο όλες τις προκύπτουσες κατανομές, προκύπτει μία τιμή για το  $\lambda$  για κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, για κάθε πύλη. Με το αντίστοιχο  $\lambda$  διεξάγεται η αντίστοιχη ομογενής διαδικασία Poisson. Προκύπτει έτσι το πλήθος των αφίξεων σε κάθε πύλη και η χρονική στιγμή της κάθε άφιξης. Κατόπιν αποδίδεται σε κάθε πλοίο μία ταχύτητα πλεύσης, σύμφωνα με τον ακριβή του τύπο, από την αντίστοιχη κατανομή ταχυτήτων.

#### 4.4. Ανίχνευση των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης (collision candidates)

Στο επόμενο βήμα του αλγορίθμου ελέγχονται ανά ζεύγος οι τροχιές των πλοίων ως προς την τομή τους. Γίνεται η διάκριση ανάμεσα σε συναντήσεις οι οποίες λαμβάνουν χώρα μετωπικά (Head-on), υπό διασταύρωση (Crossing) και κατά την προσπέραση (Overtaking) σύμφωνα με τους COLREG (IMO, 2002), και όπως αναπαριστάται γραφικά στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7 Τύποι συνάντησης σύμφωνα με τους COLREG (IMO, 2002).

Κάθε φορά που εντοπίζεται από τον αλγόριθμο η ύπαρξη σημείου τομής, υπολογίζονται οι ακριβείς συντεταγμένες αυτού και ελέγχεται από τον αλγόριθμο εάν αυτές βρίσκονται εντός των συνόρων της εκάστοτε περιοχής ελέγχου. Στην περίπτωση που βρεθούν εντός συνόρων, υπολογίζεται η ακριβής χρονική στιγμή κατά την οποία φτάνει το κάθε πλοίο στο σημείο τομής. Εάν τα πλοία, τα οποία πλέουν στις τεμνόμενες τροχιές, υπολογιστεί ότι φτάνουν στο σημείο τομής εντός ενός χρονικού «παραθύρου» 60 δευτερολέπτων, τότε θεωρούνται ως υποψήφια για σύγκρουση. Θεωρώντας μία μέση ταχύτητα 15 κόμβων (η οποία είναι μία τυπική τιμή με βάση τυχαίους υπολογισμούς που διεξάγονται σε προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου), αυτό το χρονικό παράθυρο μεταφράζεται σε μία απόσταση περίπου 463 μέτρων. Κατόπιν υπολογίζεται η γωνία σύγκρουσης και αποθηκεύεται ο τύπος των συγκρουόμενων πλοίων. Αυτό το βήμα εκτελείται σε τρία στάδια, α) για τα πλοία με βορειοανατολική κατεύθυνση, β) για τα πλοία με νοτιοδυτική κατεύθυνση, γ) για τα πλοία με βορειοανατολική και νοτιοδυτική κατεύθυνση. Στο τέλος του αλγορίθμου, εφαρμόζεται η τεχνική προσομοίωσης Monte Carlo για την καλύτερη προσέγγιση των πραγματικών τιμών και οι απαιτούμενες μεταβλητές αποθηκεύονται συγκεντρωτικά σε ξεχωριστό πίνακα.

#### 4.5. Πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας (causation probability)

Η πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας μπορεί να εκτιμηθεί με δύο τρόπους, με την προσέγγιση κατά σενάριο και με την προσέγγιση κατά σύνθεση (Kujala et al., 2009). Στην προσέγγιση κατά σενάριο η εκτίμηση της πιθανότητας διεξάγεται με βάση ιστορικά δεδομένα ατυχημάτων. 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. Στην προσέγγιση κατά σύνθεση, σε συγκεκριμένες ανεπιθύμητες/λανθάνουσες καταστάσεις αποδίδεται μία πιθανότητα εμφάνισης. Εάν αυτές εμφανιστούν κατά τη διάρκεια μίας κρίσιμης περίπτωσης τότε δυνητικά μπορούν να προκαλέσουν ατύχημα. Η πιθανότητα αυτών των ανεπιθύμητων/λανθανουσών καταστάσεων εκτιμάται με την εφαρμογή είτε δικτύων πίστης (Bayesian Belief networks) είτε δενδροειδών διαγραμμάτων ανάλυσης σφάλματος (fault trees) όπως, για παράδειγμα, στην εργασία των Martins and Maturana (2013).

Ο παράγοντας αιτιώδους συνάφειας (causation factor) εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο το κάθε μοντέλο γίνεται αντιληπτό. Κάποιες εκτιμήσεις για τον παράγοντα αιτιώδους συνάφειας απευθύνονται σε πιο εξειδικευμένες ανάγκες όπως, για παράδειγμα, η μελέτη των Montewka et al. (2011a) όπου γίνεται μία εκτίμηση του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας για εφαρμογή σε ένα μοντέλο MDTC.

Προς το παρόν, μετά από εκτεταμένη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, δεν έχει γίνει γνωστή κάποια εργασία η οποία να επεξεργάζεται τις ιδιαιτερότητες της εξεταζόμενης περιοχής και η οποία να παρέχει κάποια τιμή για την πιθανότητα αιτιώδους συνάφειας, σχετική με τα ατυχήματα σύγκρουσης. Συνεπώς διεξήχθη

επισκόπηση των τιμών του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας που εφαρμόζονται στη βιβλιογραφία, ώστε να εφαρμοστούν οι κατάλληλες τιμές στις υποψηφιότητες σύγκρουσης που αποκτήθηκαν από το αναπτυχθέν μοντέλο.

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή)

## 5. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Ο αλγόριθμος γράφτηκε σε Matlab. Η μέση τιμή των υποψηφιοτήτων σύγκρουσης αποκτήθηκε μετά από 100 επαναλήψεις του αλγορίθμου, κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε χρόνο προσομοίωσης ενός έτους. Το 95% διάστημα εμπιστοσύνης για τη μέση τιμή υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$\bar{X}_{(n)} \pm z_{95\%} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}} \quad (5.1)$$

όπου  $\bar{X}_{(n)}$  ο δειγματικός μέσος μετά από  $n$  επαναλήψεις,  $z_{95\%}$  το άνω – του 95% διαστήματος – κρίσιμο σημείο μίας τυχαίας μεταβλητής από μία κανονική κατανομή,  $S_{(n)}^2$  η διακύμανση μετά από  $n$  επαναλήψεις,  $n$  το πλήθος των επαναλήψεων.

Οι τιμές των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1. Οι τιμές των παραγόντων της αιτιώδους συνάφειας (causation factors) που εφαρμόστηκαν στις τιμές των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 και στον Πίνακα 5.3. Μετά την εφαρμογή των αντίστοιχων παραγόντων, ο αναμενόμενος αριθμός ατυχημάτων ανά έτος παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.4 και στον Πίνακα 5.5. Για λόγους σύγκρισης ο αναμενόμενος αριθμός ατυχημάτων ανά έτος, μετά από εφαρμογή διαφόρων παραγόντων που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.6.

Για την καλύτερη εκτίμηση του κριτηρίου σύγκρουσης, εκτελέστηκε άλλη μία ομάδα 100 επαναλήψεων όπου το χρονικό «παράθυρο» επεκτάθηκε στα 120 δευτερόλεπτα, γεγονός που μεταφράζεται σε μία απόσταση πλησιέστερη στο κριτήριο του μισού ναυτικού μιλίου (0.5Nm criterion) των [Fowler and Sorgard \(2000\)](#). Τα δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7 και ο αντίστοιχος αριθμός των αναμενόμενων συγκρούσεων ανά έτος παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.8 και στον Πίνακα 5.9.

Εξερευνώντας την συμπεριφορά του μοντέλου, εκτελέστηκαν ακόμη δύο ομάδες 100 επαναλήψεων έκαστη. Στη πρώτη ομάδα επαναλήψεων το κριτήριο διατηρείται στα 60 δευτερόλεπτα και εφαρμόζεται μία τεχνητή αύξηση 10% στον όγκο της κυκλοφορίας. Τα δεδομένα εξόδου που αποκτήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.10 και οι αντίστοιχες αναμενόμενες συγκρούσεις ανά έτος στον Πίνακα 5.11 και στον Πίνακα 5.12. Στη δεύτερη περίπτωση το κριτήριο διευρύνεται στα 120 δευτερόλεπτα και επίσης εφαρμόζεται μία τεχνητή αύξηση 10% στον όγκο της κυκλοφορίας. Τα δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.13 και οι αντίστοιχες αναμενόμενες συγκρούσεις ανά έτος στον Πίνακα 5.14 και στον Πίνακα 5.15.

Μολονότι η εξαγωγή συμπερασμάτων για την εγκυρότητα του μοντέλου (όπως και άλλων αντίστοιχων μοντέλων) εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα λόγω του πολύ περιορισμένου αριθμού εμφάνισης αυτών των συμβάντων ([Goerlandt and](#)

Kujala, 2011), επιχειρείται μία σύγκριση με τα διαθέσιμα δεδομένα από τη βιβλιογραφία.

Ο Andritsopoulos (2011) διεξήγαγε μία στατιστική ανάλυση των ναυτικών ατυχημάτων στο Αιγαίο Πέλαγος βασισμένη σε ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1999-2009. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου των 11 ετών βρέθηκαν 21 ατυχήματα, στην ξεχωριστά εξεταζόμενη Ζώνη 2 (η Ζώνη 2: Δαρδανέλλια – Αδριατική, ταυτίζεται με την υπό μελέτη περιοχή του παρόντος μοντέλου), 6% των οποίων είναι ατυχήματα σύγκρουσης. Οπότε για τα ατυχήματα σύγκρουσης, η ισοδύναμη συχνότητα εμφάνισης είναι 0,1145 συγκρούσεις ανά έτος.

Με βάση την εκτίμηση του αναπτυχθέντος μοντέλου, με το κριτήριο των 60 δευτερολέπτων και εφαρμογή του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας του Pedersen (1995), η προκύπτουσα τιμή είναι  $0,0531 \pm 2,32E-03$  αναμενόμενες συγκρούσεις ανά έτος. Με εφαρμογή του παράγοντα αιτιώδους συνάφειας των Goerlandt and Kujala (2011), η προκύπτουσα τιμή είναι  $0,235 \pm 7,85E-03$  αναμενόμενες συγκρούσεις ανά έτος. Αν λάβουμε υπόψη των μέσο όρο προκύπτει η τιμή  $0,14405 \pm 5,085E-03$  για τις αναμενόμενες συγκρούσεις ανά έτος.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι οι αλληλεπιδράσεις του όγκου της κυκλοφορίας από άλλες διαδρομές με την υπό μελέτη διαδρομή δεν λαμβάνονται υπόψη από το μοντέλο. Συνεπώς το γνωστικό μας υπόβαθρο σχετικά με τις πραγματικές συγκρούσεις που βρέθηκαν εντός της διαδρομής δεν είναι πλήρες. Αυτό συνεπάγεται ότι ένα εμπλεκόμενο πλοίο σε μία καταγεγραμμένη σύγκρουση θα μπορούσε να έχει προέλθει από άλλη διαδρομή, γεγονός το οποίο ελαττώνει ελαφρώς τον αναμενόμενο αριθμό των συγκρούσεων με βάση το ιστορικό. Μολαταύτα τα αποτελέσματα του μοντέλου εμφανίζουν ιδιαίτερα ικανοποιητική σύγκλιση με τον καταγεγραμμένο αριθμό των συγκρούσεων.

Αναφορικά με άλλα μοντέλα, μία καθολική σύγκριση δεν θα μπορούσε να είναι ρεαλιστική καθώς επεξεργάζονται διαφορετικές ποιοτικά και ποσοτικά παραμέτρους, οι σημαντικότερες από τις οποίες σχετίζονται με ιδιαίτερα τοπικά χαρακτηριστικά και με τον όγκο της κυκλοφορίας. Ωστόσο, τουλάχιστον από την άποψη της τάξης μεγέθους των κύριων μεταβλητών, εμφανίζεται μία λογική συμφωνία με τη μελέτη των Goerlandt and Kujala (2011).

Οι υπερβολικά χαμηλές τιμές των διασταυρούμενων συναντήσεων (crossing encounters) που εντοπίζονται από το μοντέλο, οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο έχει κατασκευαστεί η διαδρομή. Αυτή αποτελείται κυρίως από μακρές ευθείες υπό-διαδρομές. Το φαινόμενο δεν είναι εξίσου κυρίαρχο κοντά στην περιοχή της Κέας, όπου εμφανίζονται οι διασταυρούμενες συναντήσεις καθώς οι γωνίες μεταξύ αυτών των υπό-διαδρομών μπορούν να είναι περισσότερο αμβλείες. Επιπλέον οι πολύ χαμηλές τιμές των επιβατηγών πλοίων που καθορίστηκαν ως υποψήφια για σύγκρουση, οφείλονται στο γεγονός ότι δεν υφίστανται ακτοπλοϊκές γραμμές επιβατηγών πλοίων εντός της διαδρομής ελέγχου. Τα επιβατηγά πλοία που λήφθηκαν υπόψη είναι αποκλειστικά cruise ships, τα οποία αποτελούν ένα μικρό κλάσμα του συνολικού όγκου της κυκλοφορίας. Οι υπόλοιπες παράμετροι φαίνεται να ακολουθούν την γενικότερη τάση που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία (Goerlandt and Kujala, 2011).

**Πίνακας 5.1** Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 60 δευτερολέπτων.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
949,65	7,7	0,39	941,56	369,57	570,47	9,61
$\pm 42,533$	$\pm 0,1717$	$\pm 0,0067$	$\pm 41,2723$	$\pm 12,1563$	$\pm 20,9518$	$\pm 0,222$

**Πίνακας 5.2** Παράγοντες αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον [Pedersen \(1995\)](#).

	Head-on	Crossing	Overtaking
Causation Factor	1,01E-05	2,56E-04	5,62E-05

**Πίνακας 5.3** Παράγοντες αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους [Goerlandt and Kujala \(2011\)](#).

Situation	P <sub>c</sub> for Crossing Encounter	P <sub>c</sub> for Head-on and Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	5,60E-04	5,60E-04
At least one Passenger involved, good visibility	6,83E-05	4,90E-05
At least one Passenger involved, poor visibility	4,64E-04	4,90E-05
All other ships	1,30E-04	4,90E-05

**Πίνακας 5.4** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον [Pedersen \(1995\)](#).

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	7,78E-05	9,98E-05	5,29E-02	5,31E-02
	$\pm 1,73E-06$	$\pm 1,73E-06$	$\pm 2,32E-03$	$\pm 2,32E-03$

**Πίνακας 5.5** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους [Goerlandt and Kujala \(2011\)](#).

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	1,68E-03	8,50E-05	2,05E-01
	$\pm 5,52E-05$	$\pm 2,80E-06$	$\pm 6,75E-03$
At least one Passenger involved, good visibility	1,33E-06	2,70E-07	4,67E-04
	$\pm 8,82E-08$	$\pm 6,23E-09$	$\pm 1,08E-05$
At least one Passenger involved, poor visibility	1,33E-06	1,83E-06	4,67E-04
	$\pm 8,82E-08$	$\pm 4,23E-08$	$\pm 1,08E-05$
All other ships	2,27E-04	3,05E-05	2,77E-02
	$\pm 8,32E-06$	$\pm 1,12E-06$	$\pm 1,02E-03$
Total number of accidents	2,35E-01		
	$\pm 7,85E-03$		

**Πίνακας 5.6** Σύγκριση των αποκτηθέντων αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν μετά από εφαρμογή των παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με COWI (2008) και τους Friis-Hansen and Simonsen (2002).

	COWI	GRACAT
Causation Factor	3,00E-04	9,00E-05
Total number of accidents	2,85E-01	8,55E-02
	$\pm 1,28E-02$	$\pm 3,83E-03$

**Πίνακας 5.7** Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 120 δευτερολέπτων.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
1881,52	7,7	0,78	1873,04	732,4	1129,91	19,21
$\pm 108,874$	$\pm 0,1717$	$\pm 0,01345$	$\pm 106,657$	$\pm 28,4356$	$\pm 50,443$	$\pm 0,4879$

**Πίνακας 5.8** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995), επί των τιμών του Πίνακα 5.7.

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	7,78E-05	2,00E-04	1,05E-01	1,06E-01
	$\pm 1,73E-06$	$\pm 3,45E-06$	$\pm 5,99E-03$	$\pm 6,00E-03$

**Πίνακας 5.9** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011), επί των τιμών του Πίνακα 5.7.

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	1,68E-03	1,70E-04	4,08E-01
	$\pm 6,52E-05$	$\pm 6,60E-06$	$\pm 1,59E-02$
At least one Passenger involved, good visibility	9,94E-07	5,44E-07	9,37E-04
	$\pm 9,79E-08$	$\pm 1,38E-08$	$\pm 2,38E-05$
At least one Passenger involved, poor visibility	9,94E-07	3,70E-06	9,37E-04
	$\pm 9,79E-08$	$\pm 9,39E-08$	$\pm 2,38E-05$
All other ships	2,27E-04	6,09E-05	5,51E-02
	$\pm 1,01E-05$	$\pm 2,72E-06$	$\pm 2,46E-03$
Total number of accidents		4,66E-01	
		$\pm 1,84E-02$	

**Πίνακας 5.10** Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 60 δευτερολέπτων και τεχνητή αύξηση του όγκου της κυκλοφορίας κατά 10%.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
1151,6	9,92	0,45	1141,23	451,72	688,01	11,87
$\pm 49,189$	$\pm 0,2219$	$\pm 0,0065$	$\pm 47,863$	$\pm 15,1048$	$\pm 22,451$	$\pm 0,2259$

**Πίνακας 5.11** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995), επί των τιμών του Πίνακα 5.10.

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	1,00E-04	1,15E-04	6,41E-02	6,44E-02
	$\pm 2,24E-06$	$\pm 1,68E-06$	$\pm 2,69E-03$	$\pm 2,69E-03$

**Πίνακας 5.12** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011), επί των τιμών του Πίνακα 5.10.

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	2,18E-03	9,88E-05	2,51E-01
	$\pm 7,29E-05$	$\pm 3,31E-06$	$\pm 8,38E-03$
At least one Passenger involved, good visibility	1,42E-06	3,17E-07	5,76E-04
	$\pm 9,54E-08$	$\pm 6,03E-09$	$\pm 1,10E-05$
At least one Passenger involved, poor visibility	1,42E-06	2,15E-06	5,76E-04
	$\pm 9,54E-08$	$\pm 4,10E-08$	$\pm 1,10E-05$
All other ships	2,90E-04	3,50E-05	3,34E-02
	$\pm 9,48E-06$	$\pm 1,14E-06$	$\pm 1,09E-03$
Total number of accidents	2,87E-01		
	$\pm 9,57E-03$		

**Πίνακας 5.13** Δεδομένα εξόδου του αλγορίθμου μετά από 100 επαναλήψεις, με κρίσιμο χρονικό παράθυρο 120 δευτερολέπτων και τεχνητή αύξηση του όγκου της κυκλοφορίας κατά 10%.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
2296,07	10,43	0,76	2284,88	898,58	1374,8	22,68
$\pm 138,235$	$\pm 0,2077$	$\pm 0,01607$	$\pm 137,900$	$\pm 42,592$	$\pm 5,314$	$\pm 0,444$

**Πίνακας 5.14** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τον Pedersen (1995), επί των τιμών του Πίνακα 5.13.

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	1,05E-04	1,95E-04	1,28E-01	1,29E-01
	$\pm 2,10E-06$	$\pm 4,12E-06$	$\pm 7,75E-03$	$\pm 7,76E-03$

**Πίνακας 5.15** Αναμενόμενος αριθμός συγκρούσεων ανά έτος, με εφαρμογή παραγόντων αιτιώδους συνάφειας σύμφωνα με τους Goerlandt and Kujala (2011), επί των τιμών του Πίνακα 5.13.

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	2,29E-03	1,67E-04	5,01E-01
	$\pm 1,08E-04$	$\pm 7,89E-06$	$\pm 2,37E-02$
At least one Passenger involved, good visibility	1,05E-06	5,13E-07	1,11E-03
	$\pm 9,90E-08$	$\pm 1,01E-08$	$\pm 2,17E-05$
At least one Passenger involved, poor visibility	1,05E-06	3,48E-06	1,11E-03
	$\pm 9,90E-08$	$\pm 6,83E-08$	$\pm 2,17E-05$
All other ships	3,06E-04	5,92E-05	6,70E-02
	$\pm 1,23E-05$	$\pm 2,38E-06$	$\pm 2,70E-03$
Total number of accidents	5,72E-01		
	$\pm 2,66E-02$		

## Συμπεράσματα

---

Το μοντέλο παρέχει, σύμφωνα με τα ιστορικά δεδομένα, ιδιαίτερος ικανοποιητικά αποτελέσματα, παρά την αναπόφευκτη θεώρηση μίας σειράς υποθέσεων. Προκύπτει η ανάγκη της περαιτέρω βελτίωσης της επεξεργασίας των δεδομένων εξόδου του αλγορίθμου, επικεντρώνοντας κυρίως στην καταλληλότητα των παραγόντων αιτιώδους συνάφειας που εφαρμόστηκαν. Ακόμη προτείνεται εμβάθυνση στη μελέτη του κριτηρίου σύγκρουσης που θεωρήθηκε, το οποίο έχει δυναμικό χαρακτήρα, ώστε να διασφαλιστεί κατά το δυνατό η ρεαλιστικότερη προσέγγιση του μοντέλου. Η ευελιξία του αλγορίθμου καθιστά δυνατή την εφαρμογή βελτιώσεων ως προς το κριτήριο σύγκρουσης αλλά και άλλων μεταβλητών. Επιπλέον οι τεχνητές μεταβολές που εφαρμόστηκαν στις μεταβλητές του αλγορίθμου και οι αντίστοιχες μεταβολές που προκλήθηκαν στα δεδομένα εξόδου, υποδεικνύουν μία λογική συμπεριφορά του αλγορίθμου.

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)

## Βιβλιογραφία

- Aarsaether K.G., Moan T. (2009). Estimating navigation patterns from AIS. *Journal of Navigation*; 62(4): 587–607.
- af Geijerstam K, Svensson H. (2008). Ship collision risk - an identification and evaluation of important factors in collisions with offshore installations. Tech. Rep.; Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University; Lund.
- Ali MS. (2011). Risk analysis of supply vessel operations. Master's thesis; Norwegian University of Science and Technology; Trondheim.
- 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.
- Billingsley P., (1995). Probability and Measure, Willey Series, pp. 357 – 370.
- Brissaud F., Barros A., Bérenguer C., Charpentier D., (2011). Failure rate evaluation with influencing factors. *Reliability Engineering and System Safety*; 96(2): 299–313.
- Brown A.J. (2002). Collision scenarios and probabilistic collision damage. *Marine Structures*, 15, 335–364.
- Chin H.C., Debnath A.K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, 47, pp. 1410–1416.
- COWI (2008). Risk Analysis of Sea Traffic in the Area Around Bornholm. Kongens Lyngby, Denmark: COWI A/S, Report No.: P-65775–002, January 25, 2008.
- Dai L., Ehlers S., Rausand M., Utne I.B. (2013). Risk of collision between service vessels and offshore wind turbines. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 109 (0), pp. 18–31. doi: 10.1016/j.res.2012.07.008
- Delikaroglou D. (2008). The Hellenic Positioning System (HEPOS) and its foreseeable implications on the Spatial Data Infrastructure in Greece. *Tech. Chron. Sci. J. TCG I* (1-2): 95–103.
- Eggen A., Heggset J., Gjerde O., Valland A., Nonås L. (2008). Deep sea offshore wind turbine technology. operation and maintenance - state of the art study (restricted report). Tech. Rep.; SINTEF; Trondheim, Norway.
- Fowler TG., Sorgrad E. (2000). Modeling ship transportation risk. *Risk Analysis*, 20(2): 225–44.
- Friis-Hansen A. (2000) Bayesian networks as a decision support tool in marine applications. Ph.D. thesis; Technical University of Denmark, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering; Lyngby, Denmark.
- Friis-Hansen P., Simonsen B.C. (2002). GRACAT: Software for grounding and collision risk analysis. *Marine Structures*, 15 (4-5), pp. 383-401. doi: 10.1016/S0951-8339(02)00009-6
- Fujii Y., Yamanouchi H., Mizuki N. (1970). On the fundamentals of marine traffic control. Part 1: probabilities of collision and evasive actions. *Electronic Navigation Research Institute Papers*, 2:1–16.
- Fujii Y., Tanaka K. (1971). Traffic Capacity. *Journal of Navigation*, 24, pp 543-552. doi:10.1017/S0373463300022384.
- Fujii Y., Shiobara R., (1971). The analysis of traffic accidents. *Journal of Navigation*; 24(4):534–43.
- Garrick B.J. (1999). Risk assessment methodologies applicable to marine systems. *Mar Safety Counc Proc: Coast Guard J Safety Sea*, 56 (3), pp. 50–52.

- Goerlandt F., Kujala P. (2011). Traffic simulation based ship collision probability modeling. *Reliability Engineering and System Safety*, 96 (1), pp. 91–107. doi:10.1016/j.res.2010.09.003
- Goerlandt F., Stahlberg K., Kujala, P. (2012). Influence of impact scenario models on collision risk analysis. *Ocean Engineering*, 47, pp. 74-87. doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.03.006
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.09.010>
- Goodwin, E. M. (1975). A statistical study of ship domains. *The Journal of Navigation*, 28, 329–341.
- Graveson A. (2004). AIS - an inexact science. *Journal of Navigation*; 57(3): 339–43.
- Gucma L. (2003). Models of ship’s traffic flow for the safety of marine engineering structures evaluation. In: Beford T, van Gelder, PHAJM, editors. *Proceedings of the ESREL*. Lisse: Swets & Zeitlinger. pp. 713–8.
- Hänninen M., Kujala P. (2010). The Effects of Causation Probability on the Ship Collision Statistics in the Gulf of Finland. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 4, No. 1, pp. 79-84.
- 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.
- Haugen S., Seljelid J., Sklet S., Vinnem J.E., Aven T., (2007). Operational risk analysis - total analysis of physical and non-physical barriers. Tech. Rep.; Prevector; Bryne.
- IMO (2001). Guidelines for the onboard operational use of shipborne Automatic Identification Systems (AIS). Resolution A.917(22), 2001.
- IMO (2002). COLREG: Convention On The International Regulations For Preventing Collisions At Sea 1972, as amended, 2002.
- IMO (2003). Guidelines for the installation of a shipborne Automatic Identification Systems (AIS). IMO SN/Circ.227.
- IMO (2007a). Formal safety assessment – Consolidated text of the guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ. 1023-MEPC/Circ.392).
- IMO (2007b). Formal Safety Assessment FSA—Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers. London: International Maritime Organization, Document No.: MSC83/INF.3, July 3.
- IMO (2009). SOLAS consolidated edition. International Convention for the Safety of Life at Sea 1974, as amended, 2009.
- IMO (2013). Revised Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-Making Process. (MSC- MEPC.2/Circ.12). 8 July 2013.
- Jagerman D., Altiok T., (2003). Vessel arrival process and queueing in marine ports handling bulk materials. *Queueing Systems*; 45(3):223–43.
- Karahalios H. (2014). The contribution of risk management in ship management: the case of ship collision. *Saf. Sci.*, 63, pp. 104–114.
- Kjaerulff U.B., Madsen A.L. (2008). *Bayesian Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis*. Berlin: Springer.
- Klemola E, Kuronen J, Kalli J, Arola T, Hänninen M, Lehtikainen A, et al. (2009). A cross-disciplinary approach to minimizing risks of maritime transport in the Gulf of Finland. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 2(4):343–63.
- Kristiansen S. (2005). *Maritime transportation. Safety management and risk analysis*. Elsevier; 2005.

- 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. doi:10.1016/j.res.2009.02.028
- Lewis E.V., editor (1989). *Principles of naval architecture*. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers; 1989.
- Li S., Meng Q., Qu X. (2012). An overview of maritime waterway quantitative risk assessment models. *Risk Analysis*, 32, pp. 496–512.
- Li B., Pang F.W. (2013). An approach of vessel collision risk assessment based on the D–S evidence theory. *Ocean Engineering*, 74, pp.16-21.
- Liwang H., Ringsberg J.W., Norsell M. (2013). Quantitative risk analysis: ship security analysis for effective risk control options. *Safety Sci.*, 58, pp. 98–112.
- MacDuff T. (1974). The probability of vessel collisions. *Ocean Industry*. 144-148.
- Martins M.R., Maturana M.C. (2013). Application of Bayesian belief networks to the human reliability analysis of an oil tanker operation focusing on collision accidents. *Reliability Engineering & System Safety*, 110, pp. 89–109.
- Matusiak J. (2007). On certain types of ship responses disclosed by the two-stage approach to ship dynamics. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 7(4), 151–166.
- Mokhtari AH., Wall A., Brooks P., Wang J. (2007). Automatic Identification System (AIS): data reliability and human error implications. *Journal of Navigation*; 60(3):373–89.
- Montewka J., Hinz T., Kujala P., Matusiak J. (2010). Probability modeling of vessel collisions. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(5):573–89.
- Montewka J., Goerlandt F., Lammi H., Kujala P. (2011a). A Method for Assessing a Causation Factor for a Geometrical MDTC Model for Ship-Ship Collision Probability Estimation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 5, No. 3, pp. 365-373.
- Montewka J., Nishizaki C., Goerlandt F., Kujala P. (2011b). A New Definition of a Collision Zone For a Geometrical Model For Ship-Ship Collision Probability Estimation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 5, No. 4, pp. 497-504.
- Montewka J., Goerlandt F., Kujala, P. (2012). Determination of collision criteria and causation factors appropriate to a model for estimating the probability of maritime accidents. *Ocean Engineering*, 40, pp. 50-61. doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.12.006
- Montewka J., Ehlers S., Goerlandt F., Hinz T., Tabri K., Kujala P. (2014a). A framework for risk assessment for maritime transportation systems – a case study for open sea collisions involving ropax vessels. *Reliability Engineering & System Safety*, 124, pp. 142–157.
- Montewka J., Goerlandt F., Kujala P. (2014b). On a systematic perspective on risk for formal safety assessment (FSA). *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 127, pp. 77–85
- Mou J.M., van der Tak C., Ligteringen H. (2010). Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering*, 37, pp. 483–490.
- Norris A. (2007). AIS implementation - success or failure. *Journal of Navigation*; 60(1):1–10.
- 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.
- Pan, J., Jiang, Q., Hu, J., Shao, Z. (2012). An AIS data visualization model for assessing maritime traffic situation and its applications. *Procedia Engineering*, 29, pp. 365-369. doi: 10.1016/j.proeng.2011.12.724
- 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 (3), pp. 241–262. doi:10.1016/j.marstruc.2010.05.001
- Pettersson H., Hammarklint T., Schrader D. (2010, October). Wave climate in the baltic sea 2008. HELCOM Indicator Fact Sheets 2009. Online.
- Pietrzykowski Z., Uriasz J. (2009). The Ship Domain – A Criterion of Navigational Safety Assessment in an Open Sea Area. *Journal of Navigation*, 62, pp 93-108. doi:10.1017/S0373463308005018.
- 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.
- Qu X., Meng Q., Suyi L. (2011). Ship collision risk assessment for the Singapore Strait. *Accid. Anal. Prev.*, 43, pp. 2030–2036. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.022>
- Raamet A., Soomere T., Zaitseva-Parnaste I. (2010). Variations in extreme wave heights and wave directions in the north-eastern baltic sea. In Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Tallinn, pp. 182–192. Estonian Academy of Sciences: Estonian Academy of Sciences. Available online at: [www.eap.ee/proceedings](http://www.eap.ee/proceedings).
- Rausand M. (2011). Risk assessment: Theory, methods and applications. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Rausand M. (2012). Reliability data sources. Retrieved March 15, 2012. URL: <http://www.ntnu.edu/ross/info/data>.
- RenewableUK (2010). Guidelines for onshore and offshore wind farms: Health & safety in the wind energy industry sector. 2010.
- Saydam D., Frangopol D.M. (2013). Performance assessment of damaged ship hulls. *Ocean Engineering*, 68, pp. 65–76.
- 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2013.06.006>
- Spouge J. (1999). A guide to quantitative risk assessment for offshore installations. DNV Technica; 1999.
- Szlapczynski R. (2006). A Unified Measure Of Collision Risk Derived From The Concept Of A Ship Domain. *The Journal of Navigation*, 59, 477–490. doi:10.1017/S0373463306003833
- Talavera A., Aguasca R., Galván B., Cacereno, A. (2013). Application of Dempster-Shafer theory for the quantification and propagation of the uncertainty caused by the use of AIS data. *Reliability Engineering and System Safety*, 111, pp. 95-105. doi: 10.1016/j.ress.2012.10.007
- Vinnem J.E. (2007). Offshore risk assessment: Principles, modelling and applications of QRA studies; chap. 10 Collision risk modelling. London: Springer, pp. 353–97.
- Vinnem J., Seljelid J., Haugen S., Sklet S., Aven T., (2009). Generalized methodology for operational risk analysis of offshore installations. *Journal of Risk and Reliability*; 223: 87–97.
- Wang N., Meng X., Xu Q., Wang Z. (2009). A Unified Analytical Framework for Ship Domains. *Journal of Navigation*, 62, pp 643-655. doi:10.1017/S0373463309990178.
- Wang N. (2010). An Intelligent Spatial Collision Risk Based on the Quaternion Ship Domain. *The Journal of Navigation*, 63, 733–749. doi:10.1017/S0373463310000202
- Wang Y., Zhang J., Chen X., Chu X., Yan X. (2013). A spatial-temporal forensic analysis for inland-water ship collisions using AIS data. *Safety Science*, 57, pp. 187–202.

- Wang J.S., Li M.C., Liu Y.X., Zhang H.X., Zou W., Cheng L. (2014). Safety assessment of shipping routes in the South China Sea based on the fuzzy analytic hierarchy process. *Safety Science*, 62, pp. 46–57.
- Weng J., Meng Q., Qu X. (2012). Vessel Collision Frequency Estimation in the Singapore Strait. *Journal of Navigation*, 65, pp 207-221. doi:10.1017/S0373463311000683.
- Ylitalo J., (2010). Modeling marine accident frequency, Master's thesis. Espoo, Finland: Aalto University School of Science and Technology.
- 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 Maritime Engineering*, Vol. 156, Part A1, pp. 61-80.
- Zhang D., Yan X. P., Yang Z. L., Wall A. D., Wang J. (2013). Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River. *Rel. Eng. & Sys. Safety* 118: 93-105.
- Zhu X., Xu H., Lin J. (2001). Domain and Its Model Based on Neural Networks. *The Journal of Navigation*, 54, pp 97-103.
- Zitrou A., Bedfords T., Walls L., (2007). An influence diagram extension of the unified partial method for common cause failures. *Quality Technology and Quantitative Management*; 4(4): 111–28.

(Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα κενή)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Avoiding Collisions, Enhancing Marine Safety – A Simplified Model for the Aegean Sea

Nikolaos P. Ventikos, Dimitrios K. Rakas

*Maritime Risk Group*, Laboratory for Maritime Transport,  
School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens

[niven@mail.ntua.gr](mailto:niven@mail.ntua.gr), [dimitrisrakas@hotmail.com](mailto:dimitrisrakas@hotmail.com)

#### **ABSTRACT**

Ship collision is a hazardous event (casualty) within the chain of maritime transport, which may lead to human losses, adverse economic consequences, and environmental damages; hence, it can cause significant impact to the local societies and related activities. A major factor of a risk analysis concerning ship collisions refers to the possibility of these collisions to occur. The purpose of this study is to assess the probability of ship-to-ship collision in the area of interest; namely the Aegean Sea. The basic concept of the developed model is to (statistically) simulate the traffic flow in the area of interest and determine the collision candidates; this will be implemented through a pilot study in a segment of the Aegean Sea. The input of this effort is based on values which are extracted from statistical analysis of the international fleet in combination with the study of maps depicting the traffic flow of the studied area; hence it does not employ detailed AIS data. The obtained results are presented and their accordance with the trend of actual incidents is discussed in depth. The paper concludes will interesting insights of the aforementioned tasks.

**Keywords:** marine safety; collision; modeling; maritime traffic; traffic simulation; Aegean Sea

#### 1. Introduction

The Aegean seaways are of great importance for international maritime transport constituting a major link between the Black Sea and the rest of the Mediterranean. The northeast boundary of the Aegean Sea is the gate to the Dardanelles Strait, the southeast boundary is a main passage for ships heading to the Suez Canal and the southwest boundary is the main passage to the European ports.

Collisions hold a significant proportion of the total number of accidents in multiple areas of interest (Kujala et al., 2009; Mou et al., 2010; Zhang et al., 2013). Regarding collision accidents an analogue stands for the studied area within this work (Andritsopoulos, 2011).

Risk is the combination of the frequency and the severity of the consequence (IMO, 2007a). There are different perspectives on this more general definition of risk, many of which are reviewed in the work of Goerlandt

and Kujala (2014). In this study a model is constructed for the estimation of ship collision probability by predicting the number of the collision candidates. The results obtained could be utilized as part of the input in an integrated risk analysis, a graphical paradigm of such an analysis is shown in Fig. 1.

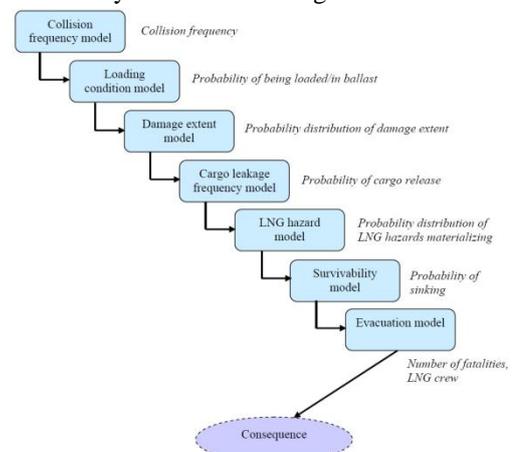


Fig. 1. Risk model for collision of LNG carrier (IMO, 2007b).

After a brief literature review, the basic concepts through which the model is perceived are described and the obtained results are presented and discussed.

## 2. Literature review

A prevalent approach amongst researchers (Montewka et al., 2010) to collision probability is based on the concept introduced by Fujii et al. (1970) and MacDuff (1974) where the number of collisions over the studied time period is estimated by the formula:

$$N_{\text{Coll}} = N_A \cdot P_C \quad (1)$$

where  $N_A$  is the number of pairwise ship encounters resulting to a collision and  $P_C$  is the probability of failing to avoid collision when on a collision course, known as causation probability. In Fujii's approach it is assumed that a collision occurs when two ships reach at a distance  $D_{ij}$ , defined as "collision diameter".

Pedersen (1995) defines  $D_{ij}$  as the critical distance in the event of a ship encounter. It correlates with the ships' length and width; he also distinguishes between crossing, overtaking and head-on collisions. Many studies have incorporated Pedersen's model (Otto et al., 2002; COWI, 2008; Kujala et al., 2009; Klemola et al., 2009).

Fowler and Sorgard (2000) define as a critical encounter event when two ships reach at a distance not greater than 0.5 Nm from each other. This reference distance is independent from the crossing angle.

In the work of Montewka et al. (2010) the minimum distance to collision (MDTC) is defined as the minimum distance between two vessels in collision course that allows them to perform efficient anti-collision manoeuvres. The main factors relevant to determine the MDTC value are the vessels' manoeuvrability, the angle of intersection and the relative bearing from one vessel to the other. In the model the distinguishing between tankers, container ships, passenger ships and Ro-Ro vessels is made.

## 3. Theory

In risk assessment efforts regarding maritime safety, risk is often defined as the combination of probability and consequences (Goerlandt and Kujala, 2011; Zhang et al., 2013):

$$Risk = P \cdot C \quad (2)$$

where P is the probability of occurrence and C is the severity of the consequences. A more thorough perspective on risk and the link between probability and consequence is given in the work of Montewka et al. (2014). The model developed in this study is oriented in the estimation of probability.

Subsequently the basic concepts incorporated in the model are described. Traffic is stochastically simulated in the area of interest. During a fragment of simulated time, the total generated number of ships is compared in a pairwise manner in order to determine the number of the collision candidates. A causation factor is applied and the probability of collision is obtained.

The criterion according to which a collision is detected is relevant to two factors: i) whether the ships' trajectories intersect, ii) the time of arrival at the intersection point. Conceptually it is similar to the 0.5Nm criterion (Fowler and Sorgard, 2000).

According to the central limit theorem (Billingsley, 1995), and since the model's random input variables follow multiple known distributions, after a "large" number of replications of the experiment, the convergence to a mean output value is ensured. Consequently Monte Carlo simulation is performed. Thus by multiple repetitions a frequentist approach to probability is attempted.

## 4. Traffic-Simulation Collision Model

### 4.1. The Studied Area

The studied area is the sea route connecting the Dardanelles Strait located at approximately 40° 1'9.14"N 26° 9'57.90"E with the Elafonisos Strait (the sea area between Elafonisos and Kythira) located at approximately 36°25'9.12"N 22°58'15.15"E.

### 4.2. Construction of the route plan

The definition of the route's geographical boundaries is based on the traffic density map obtained from MarineTraffic as depicted in Fig. 2.



Fig. 2. Traffic Density Map

Utilizing Google Earth the coordinates of the minimum required number of boundary points (16 points) are acquired as depicted in Fig.3. Originally the points from Google Earth are obtained in the World Geodetic System (WGS84). In perspective of the simplification of the later work, the transformation of the coordinates from WGS84 to the Hellenic Geodetic Reference System 1987 (or Greek Geodetic Reference System 1987 – GGRS87) is conducted. GGRS87 is a non-geocentric datum that is effectively defined by the coordinates of the key geodetic station at the Dionysos Satellite Observatory near Athens (Delikaroglou, 2008). Essentially the transformation is the equivalent of the projection to the Cartesian system of reference.

In respect to the accuracy loss due to the transformation the indicative measurement of the east boundary of the route (defined by the points 2, 4, 9, 12, 14, 16) in Fig. 3. is considered. The value obtained from Google Earth is 512584m and the value computed using the points projected on GGRS87 is 512460m. The maximum accuracy loss that derives is approximately 0.024% which, within the scope of this study, is considered insignificant.

After the boundary waypoints are obtained, the nodes which each ship passes

through in order to reach her destination are defined. Each space interval of each node is divided in equal space intervals of 100m length.

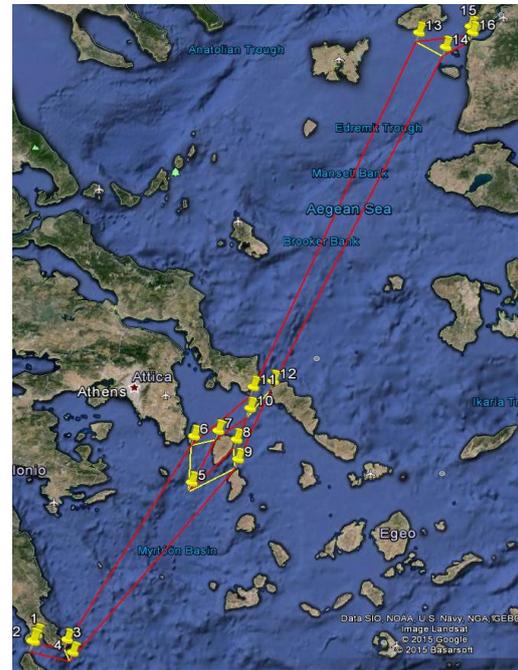


Fig. 3. Density map approximation by coordinates

The points at the end of each 100m-long interval are then obtained and constitute the total number of waypoints in each node. Every ship that arrives at the extreme nodes (named gates – gate1\_2 and gate15\_16) chooses randomly from a uniform distribution one waypoint from the respective node (gate) and subsequently with the same procedure one waypoint from each node. The straight lines connecting all the randomly selected waypoints constitute the ship's exact path.

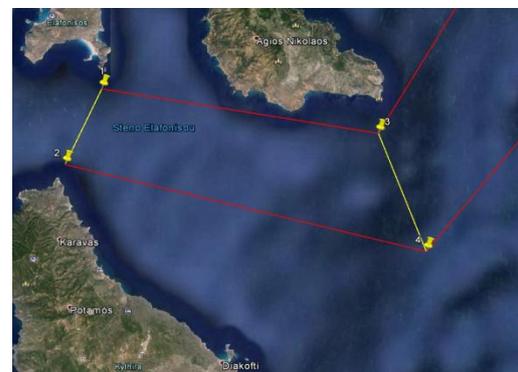


Fig. 4. Visualization of gate1\_2 and node3\_4



Fig. 5. Visualization of node5\_6, node5\_9, node6\_7, node8\_9, node10\_11 and node10\_12

For example when a ship arrives at gate1\_2 randomly chooses one waypoint from gate1\_2, then one from node3\_4, then from a binomial distribution with equal probabilities for each outcome chooses how the detour of Kea Island is conducted. Thus waypoints are chosen either from node5\_6, node6\_7 and node10\_11 or from node5\_9, node8\_9 and node10\_12. Finally one waypoint from node13\_14 and gate15\_16 is chosen.



Fig. 6. Visualization of node13\_14 and gate15\_16

The route is constructed in a way that ships travel in straight lines between the nodes. Each ship is considered to travel with a constant speed which is attributed to her upon arrival at either gate of the route, according to her type. All transient phenomena at each waypoint are ignored and the ships are considered to turn instantly. The ships take no evasive actions according to the concept of blind navigation. Meteorological conditions are not taken into account.

#### 4.3. Traffic volume estimation

The number of ships arriving at each gate during the minimum simulation time is approximated by a homogenous Poisson process. Characteristic of the process is the expected number of arrivals per unit time,  $\lambda$ . Although other models (Pedersen, 1995; Gucma, 2003; Przywarty, 2008; Montewka et al., 2010) implement it, in the work of

Goerlandt and Kujala (2011) it is found to be an inadequate method of estimation. This inadequacy is addressed by this study not by using a thinning process for  $\lambda$  but by evaluating  $\lambda$  in a stochastic manner for each iteration of the algorithm, as described below.

The minimum simulation time is the time needed by the slowest ship, from the available ship speed databases, to travel from gate to gate. It is calculated to be 2768 minutes thus the number of iterations required to simulate the period of one year is 190 (specifically the time period of one year and 5.35 hours).

The live map from MarineTraffic has been utilized in order to make observations regarding a) the total number of ships detected within the boundaries of the route, b) their direction (northward or southward) and c) their basic type-classification which according to MarineTraffic is “Tanker”, “Cargo” and “Passenger”. Essentially the discrimination made is between ships that carry liquid cargo, dry cargo and passengers. A record of 20 days at random moments in each day has been kept.

There are 8 ship speed databases, obtained from IHS Sea-web, integrated in the model according to ship type: Tanker (5276 ships), Gas Carrier (1463 ships), Bulk Carrier (9371 ships), Containership (4869 ships), General Cargo (8404 ships), Reefer (678 ships), Ro-Ro Cargo (1526 ships) and Cruise Ship (320 ships). The respective speed distributions are extracted.

Thus if the observation indicates “Tanker” the multinomial distribution (specifically binomial) for the exact ship type is derived, with probability of each outcome (ship type):

$$P_{\text{Tanker}} = 0.7829 \quad (3)$$

$$P_{\text{GasCarrier}} = 0.2171 \quad (4)$$

If the observation indicates “Cargo” the multinomial distribution for the exact ship type is derived, with probability of each outcome:

$$P_{\text{BulkCarrier}} = 0.3771 \quad (5)$$

$$P_{\text{Containership}} = 0.1959 \quad (6)$$

$$P_{\text{GeneralCargo}} = 0.3382 \quad (7)$$

$$P_{\text{Reefer}} = 0.0273 \quad (8)$$

$$P_{\text{RoRoCargo}} = 0.0615 \quad (9)$$

If the observation indicates “Passenger” it is certain that the exact ship

type is Cruise Ship since there is no active passenger line in the route. Hence:

$$P_{\text{CruiseShip}} = 1 \quad (10)$$

Initially, based on these observations, two Poisson distributions are extracted: one for the number of ships with northward direction and one for the number of ships with southward direction. Furthermore two trinomial distributions are extracted regarding the discrimination of ships to “Tanker”, “Cargo” and “Passenger”, for each direction.

In each iteration the algorithm generates a random value, according to the extracted distributions, in the following sequence: a) the number of ships observed within the route, b) the number of ships that classify as “Tanker”, “Cargo”, “Passenger”, c) the number of ships that classify as Tankers, Gas Carriers, Bulk Carriers, Container Ships, General Cargo, RoRo Cargo, Reefers and Cruise Ships, d) the speed of each ship according to her exact type. This procedure is performed separately for the northward and southward direction.

In this way a mean speed is calculated and accordingly the mean time required for each ship to travel through the entire route. The assumption is made that all ships travel with this speed and they are equidistant along the route’s length. Dividing the required traveling time with the number of time intervals between the observed ships (which are subsequently equal since the ships are considered equidistant) and then the minimum simulation time with the quotient acquired we estimate the total number of ships arriving during the period of the minimum simulation time. This estimation is also performed separately for each direction.

Integrating all the extracted distributions, a new value for  $\lambda$  is obtained for each iteration and a number of ships is generated by a homogenous Poisson process. Each ship is then attributed a traveling speed according to her exact type from the respective ship speed distribution.

#### 4.4. Collision candidate detection

In the next step the algorithm detects with a pairwise evaluation which of the ships’ trajectories intersect. It distinguishes between Head-on, Crossing and Overtaking encounters according to COLREG (IMO, 2002).

Whenever an intersection is detected the algorithm calculates the exact coordinates of the intersection point and checks whether

these coordinates lay within the geographical boundaries of the route. In case they are found within the boundaries then the exact time at which each ship arrives at the intersection point is calculated. If the ships following the intersecting trajectories are found to arrive at the intersection point within a time window of 60 seconds, then they are considered as collision candidates. Considering a mean speed of 15 knots it translates to a mean distance of about 463 meters. Afterwards the collision angle is calculated and the type of the colliding ships is stored. This step is executed in three stages, a) for the ships with northward direction, b) for the ships with southward direction and c) for the ships with both northward and southward direction. At the end of the algorithm, the Monte Carlo technique is applied and the required variables are cumulatively stored in a matrix.

#### 4.5. Causation Probability

Causation probability can be estimated in two ways, by the scenario approach and by synthesis approach (Kujala et al., 2009). In the scenario approach the probability estimation is based on historic accident data. According to Pedersen (1995) causation probability can be estimated from accident data collected at various locations and then transformed to the analyzed area. In synthesis approach specific error situations are attributed a probability to occur. If they occur during a critical situation they may cause an accident. Probability of error situations is estimated by application of Bayesian Belief networks or fault trees like, for example, in the study of Martins and Maturana (2013).

The causation factor is dependent on many variables, according to the way each model is perceived. Some estimations of the causation factor address to more specialized needs, for example, Montewka et al. (2011) assess a causation factor for application in a MDTC model.

So far no specific study, to the authors’ knowledge, elaborates the particularities of the studied area providing a value for the causation probability of collision. Consequently a review of the causation factor in literature has been conducted in order to apply the most appropriate causation factors to the collision candidates obtained from the model.

### 5. Results and Discussion

The algorithm is scripted in Matlab. The mean number of collision candidates per

year is obtained after 100 iterations of the algorithm. The 95%-confidence interval for the mean value is calculated by the equation:

$$\bar{X}_{(n)} \pm z_{95\%} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{n}} \quad (11)$$

where  $\bar{X}_{(n)}$  is the mean over  $n$  iterations,  $z_{95\%}$  is the upper 95% critical point for a random variable from a normal distribution,  $S_{(n)}^2$  is the variance over  $n$  iterations,  $n$  is the number of the iterations.

The output values of the algorithm are presented in Table 1. The values of the causation factors applied to the output of the algorithm are presented in Table 2 and Table 3. After the application of the respective causation factors, the expected number of accidents per year is presented in Table 4 and Table 5. For comparison reasons the expected number of accidents per year, with application of different causation factors found in literature, is presented in Table 6.

For better evaluation of the conflict criterion, another set of 100 iterations is performed where the time window is extended to 120 seconds, which translates to a distance closer to the 0.5NM criterion (Fowler and Sorgard, 2000). The output is presented in Table 7 and the respective results are presented in Table 8 and Table 9.

Exploring the model's behavior, two more sets, of 100 iterations each, are performed. In one occasion the criterion is kept to 60 seconds and an artificial increase of 10% to traffic volume is implemented. The results obtained are presented in Table 10, Table 11 and Table 12. In the other occasion the criterion is extended to 120 seconds and the 10% artificial increase to traffic volume is also implemented. The according results are presented in Table 13, Table 14 and Table 15.

Although drawing references about the validity of the model is highly uncertain due to the very limited number of such events (Goerlandt and Kujala, 2011), a comparison with available data from literature is attempted.

Andritsopoulos (2011) conducted a statistical analysis of maritime accidents in the Aegean Sea based on historical data over the period 1999-2009. During this 11-year period 21 accidents are found, in the separately examined zone 2 (Dardanelles-Adriatic), 6% of which are collision accidents. This is equivalent to 0.1145 collisions per year. Considering the mean value of the total number of the expected collisions per year

from Table 4 and Table 5, the value  $0.14405 \pm 5.085E-03$  is obtained. It should be noted here that the interactions between the traffic volume from other routes and the studied route are not taken into account by the proposed model. Thus our background knowledge regarding the actual collisions found in the route is incomplete. This means that a ship involved in a recorded collision might have originated from another route, a fact that slightly reduces the expected number of collisions. Nonetheless the obtained results show a satisfying convergence to the recorded number of collisions.

In respect to other models, a holistic comparison would be unrealistic since they elaborate different parameters most importantly regarding local characteristics and traffic volume. However, at least in view of the order of magnitude of major variables, a reasonable agreement is found with the work of Goerlandt and Kujala (2011).

The overwhelmingly low values of crossing encounters detected by the model, is due to the way the route has been constructed. It consists of mostly long straight paths; this fact is not equally predominant around Kea Island where the crossing encounters are found since angles between these paths can be wider. Furthermore regarding the very low values of passenger ships determined as collision candidates is due to the fact that there is no active passenger line in the route and the considered passenger ships are solely cruise ships, which are a minor proportion of the total traffic volume. The rest of the parameters seem to follow the general trend.

## 6. Conclusion

The model seems to provide reasonable output, according to the available historical data, besides the inevitable assumptions that have been made. The need for further improvement of the output elaboration arises, regarding most importantly the aspect of fitness of the causation factors applied. Further focus should also be made to the collision criterion by which the most realistic approach would be ensured.

**Table 1.** Output of the algorithm over 100 iterations, with critical time window 60 seconds.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
949,65	7,7	0,39	941,56	369,57	570,47	9,61
± 42,533	± 0,1717	± 0,0067	± 41.2723	± 12,1563	± 20,9518	± 0,222

**Table 2.** Causation factors applied by Pedersen (1995).

	Head-on	Crossing	Overtaking
Causation Factor	1,01E-05	2,56E-04	5,62E-05

**Table 3** Causation factors applied by Goerlandt and Kujala (2011).

Situation	P <sub>C</sub> for Crossing Encounter	P <sub>C</sub> for Head-on and Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	5,60E-04	5,60E-04
At least one Passenger involved, good visibility	6,83E-05	4,90E-05
At least one Passenger involved, poor visibility	4,64E-04	4,90E-05
All other ships	1,30E-04	4,90E-05

**Table 4** Expected number of collisions per year with application of causation factors by Pedersen (1995).

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	7,78E-05	9,98E-05	5,29E-02	5,31E-02
	± 1,73E-06	± 1,73E-06	± 2,32E-03	± 2,32E-03

**Table 5** Expected number of collisions per year with application of causation factors by Goerlandt and Kujala (2011).

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	1,68E-03	8,50E-05	2,05E-01
	± 5,52E-05	± 2,80E-06	± 6,75E-03
At least one Passenger involved, good visibility	1,33E-06	2,70E-07	4,67E-04
	± 8,82E-08	± 6,23E-09	± 1,08E-05
At least one Passenger involved, poor visibility	1,33E-06	1,83E-06	4,67E-04
	± 8,82E-08	± 4,23E-08	± 1,08E-05
All other ships	2,27E-04	3,05E-05	2,77E-02
	± 8,32E-06	± 1,12E-06	± 1,02E-03
Total number of accidents	2,35E-01		
	± 7,85E-03		

**Table 6** Comparison of the obtained results with the results obtained after application of causation factors found in COWI (2008) and Friis-Hansen and Simonsen (2002).

	COWI	GRACAT
Causation Factor	3,00E-04	9,00E-05
Total number of accidents	2,85E-01	8,55E-02
	± 1,28E-02	± 3,83E-03

**Table 7.** Output of the algorithm over 100 iterations, with critical time window 120 seconds.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
1881,52	7,7	0,78	1873,04	732,4	1129,91	19,21
± 108,874	± 0,1717	± 0,01345	± 106,657	± 28,4356	± 50,443	± 0,4879

**Table 8.** Expected number of collisions per year with application of causation factors by Pedersen (1995) on the values of Table 7.

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	7,78E-05	2,00E-04	1,05E-01	1,06E-01
	± 1,73E-06	± 3,45E-06	± 5,99E-03	± 6,00E-03

**Table 9.** Expected number of collisions per year with application of causation factors by Goerlandt and Kujala (2011) on the values of Table 7.

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	1,68E-03	1,70E-04	4,08E-01
	± 6,52E-05	± 6,60E-06	± 1,59E-02
At least one Passenger involved, good visibility	9,94E-07	5,44E-07	9,37E-04
	± 9,79E-08	± 1,38E-08	± 2,38E-05
At least one Passenger involved, poor visibility	9,94E-07	3,70E-06	9,37E-04
	± 9,79E-08	± 9,39E-08	± 2,38E-05
All other ships	2,27E-04	6,09E-05	5,51E-02
	± 1,01E-05	± 2,72E-06	± 2,46E-03
Total number of accidents		4,66E-01	
		± 1,84E-02	

**Table 10** Output of the algorithm over 100 iterations, with critical time window 60 seconds and an artificial increase of 10% implemented on traffic volume.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
1151,6	9,92	0,45	1141,23	451,72	688,01	11,87
± 49,189	± 0,2219	± 0,0065	± 47,863	± 15,1048	± 22,451	± 0,2259

**Table 11** Expected number of collisions per year with application of causation factors by Pedersen (1995) on the values of Table 10.

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	1,00E-04	1,15E-04	6,41E-02	6,44E-02
	± 2,24E-06	± 1,68E-06	± 2,69E-03	± 2,69E-03

**Table 12** Expected number of collisions per year with application of causation factors by [Goerlandt and Kujala \(2011\)](#) on the values of Table 10.

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	2,18E-03	9,88E-05	2,51E-01
	± 7,29E-05	± 3,31E-06	± 8,38E-03
At least one Passenger involved, good visibility	1,42E-06	3,17E-07	5,76E-04
	± 9,54E-08	± 6,03E-09	± 1,10E-05
At least one Passenger involved, poor visibility	1,42E-06	2,15E-06	5,76E-04
	± 9,54E-08	± 4,10E-08	± 1,10E-05
All other ships	2,90E-04	3,50E-05	3,34E-02
	± 9,48E-06	± 1,14E-06	± 1,09E-03
Total number of accidents	2,87E-01		
	± 9,57E-03		

**Table 13** Output of the algorithm over 100 iterations, with critical time window 120 seconds and an artificial increase of 10% implemented on traffic volume.

Number of collision candidates						
Total	Head-on	Crossing	Overtaking	At least one Tanker involved	At least one Cargo involved	At least one Passenger involved
2296,07	10,43	0,76	2284,88	898,58	1374,8	22,68
± 138,235	± 0,2077	± 0,01607	± 137,900	± 42,592	± 5,314	± 0,444

**Table 14** Expected number of collisions per year with application of causation factors by [Pedersen \(1995\)](#) on the values of Table 13.

	Head-on	Crossing	Overtaking	Total
Number of accidents	1,05E-04	1,95E-04	1,28E-01	1,29E-01
	± 2,10E-06	± 4,12E-06	± 7,75E-03	± 7,76E-03

**Table 15** Expected number of collisions per year with application of causation factors by [Goerlandt and Kujala \(2011\)](#) on the values of Table 13.

Situation	Number of accidents for Head-on Encounter	Number of accidents for Crossing Encounter	Number of accidents for Overtaking Encounter
At least one Tanker involved	2,29E-03	1,67E-04	5,01E-01
	± 1,08E-04	± 7,89E-06	± 2,37E-02
At least one Passenger involved, good visibility	1,05E-06	5,13E-07	1,11E-03
	± 9,90E-08	± 1,01E-08	± 2,17E-05
At least one Passenger involved, poor visibility	1,05E-06	3,48E-06	1,11E-03
	± 9,90E-08	± 6,83E-08	± 2,17E-05
All other ships	3,06E-04	5,92E-05	6,70E-02
	± 1,23E-05	± 2,38E-06	± 2,70E-03
Total number of accidents	5,72E-01		
	± 2,66E-02		

## References

- 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.
- Billingsley P., (1995). Probability and Measure, Willey Series, pp. 357 – 370.
- COWI (2008). Risk Analysis of Sea Traffic in the Area Around Bornholm. Kongens Lyngby, Denmark: COWI A/S, Report No.: P-65775-002, January 25, 2008.
- Delikaroglou D. (2008). The Hellenic Positioning System (HEPOS) and its foreseeable implications on the Spatial Data Infrastructure in Greece. Tech. Chron. Sci. J. TCG I (1-2): 95–103.
- Fowler TG., Sorgrad E. (2000). Modeling ship transportation risk. Risk Analysis, 20(2):225–44.
- Friis-Hansen P., Simonsen B.C. (2002) GRACAT: Software for grounding and collision risk analysis. Marine Structures, 15 (4-5), pp. 383-401. doi: 10.1016/S0951-8339(02)00009-6
- Fujii Y., Yamanouchi H., Mizuki N. (1970). On the fundamentals of marine traffic control. Part 1: probabilities of collision and evasive actions. Electronic Navigation Research Institute Papers, 2:1–16.
- Goerlandt F., Kujala P. (2011). Traffic simulation based ship collision probability modeling. Reliab. Eng. Syst. Saf., 96, pp. 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.
- Gucma L. (2003). Models of ship’s traffic flow for the safety of marine engineering structures evaluation. In: Beford T, van Gelder, PHAJM, editors. Proceedings of the ESREL. Lisse: Swets & Zeitlinger. pp. 713–8.
- IMO (2002). COLREG: Convention On The International Regulations For Preventing Collisions At Sea 1972, as amended, 2002.
- IMO (2007a). Formal safety assessment – Consolidated text of the guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC/Circ. 1023-MEPC/Circ.392).
- IMO (2007b). Formal Safety Assessment FSA—Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers. London: International Maritime Organization, Document No.: MSC83/INF.3, July 3.
- Klemola E, Kuronen J, Kalli J, Arola T, Hänninen M, Lehtikoinen A, et al. (2009). A cross-disciplinary approach to minimizing risks of maritime transport in the Gulf of Finland. World Review of Intermodal Transportation Research, 2(4):343–63.
- 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. doi:10.1016/j.res.2009.02.028
- MacDuff T. (1974). The probability of vessel collisions. Ocean Industry. 144-148.
- Martins M.R., Maturana M.C. (2013). Application of Bayesian belief networks to the human reliability analysis of an oil tanker operation focusing on collision accidents. Reliability Engineering & System Safety, 110, pp. 89–109.
- Montewka J., Hinz T., Kujala P., Matusiak J. (2010). Probability modeling of vessel collisions. Reliability Engineering and System Safety, 95(5):573–89.
- Montewka J., Goerlandt F., Lammi H., Kujala P. (2011). A Method for Assessing a Causation Factor for a Geometrical MDTC Model for Ship-Ship Collision Probability Estimation. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 5, No. 3, pp. 365-373.
- Montewka J., Goerlandt F., Kujala P. (2014). On a systematic perspective on risk for formal safety assessment (FSA). Reliab. Eng. Syst. Saf., 127, pp. 77–85.
- Mou J.M., Tak C., Ligteringen H. (2010). Study on Collision Avoidance in Busy Waterways by Using AIS Data. Ocean Engineering, 37, 483-490.
- Otto S., Pedersen PT., Samuelides M., Sames PC. (2002). Elements of risk analysis for collision and grounding of a RoRo passenger ferry. Marine Structures, 15(4–5):461–74.
- Pedersen PT. (1995). Collision and grounding mechanics. Danish Society of Naval Architects and Marine Engineers:125–57.
- 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.
- Zhang D., Yan X. P., Yang Z. L., Wall A. D., Wang J. (2013). Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River. Rel. Eng. & Sys. Safety 118: 93-105.