



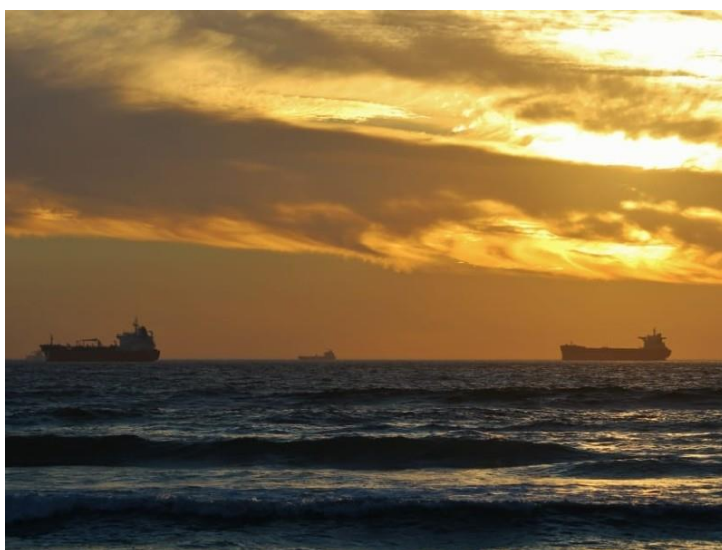
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΠΟΦΥΓΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ
ΑΝΟΣΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ



Παπαδόπουλος Γιώργος

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

Αθήνα, Ιούνιος 2022

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική ολοκληρώνει τα χρόνια των σπουδών μου στη Σχολή Ναυπηγών και Μηχανικών Ναυπηγών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ήταν, αναμφίβολα, ένα σπουδαίο ακαδημαϊκό ταξίδι, όπου απέκτησα μεγάλες γνώσεις σε πολλαπλά πεδία μηχανικής και διεύρυνα τους επιστημονικούς και ακαδημαϊκούς μου ορίζοντες.

Μια μεγάλη ευκαιρία μου παρουσιάστηκε μέσω της ανάθεσης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας. Η εμβάθυνση στους γενετικούς αλγόριθμους και γενικότερα στους εξελικτικούς αλγόριθμους ήταν δύο τομείς με τους οποίους δεν είχα την ευκαιρία να εργαστώ. Είναι πολύ σημαντικό για τον καθένα να προκαλεί καθημερινά τον εαυτό του, να εργάζεται παρά τις καθημερινές δυσκολίες και να προσπαθεί για πρόοδο με μέθοδο ανεξαιρέτως των εξωτερικών παραγόντων. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας χρονιάς, είχα την ευκαιρία να αναπτύξω αρκετές δεξιότητες τόσο στο πεδίο του προγραμματισμού όσο και στην ανάλυση δεδομένων, οι οποίες είμαι βέβαιος ότι θα αποτελέσουν πολύτιμο πλεονέκτημα για την καριέρα μου στον τομέα της μηχανικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της Διπλωματικής μου εργασίας, κ. Νικόλαο Π. Βεντίκο και τον κ. Κωσταντίνο Λούζη που μου παρείχαν συμβουλές και καθοδήγηση σε κάθε φάση αυτού του έργου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Βεντίκο που μου έδωσε την ευκαιρία να δουλέψω σε ένα τόσο ενδιαφέρον έργο και του εύχομαι ότι καλύτερο στην ακαδημαϊκή του σταδιοδρομία.

Τέλος, ευχαριστώ ειλικρινά τον αδερφό μου και τους στενούς μου ανθρώπους, την οικογένεια και τους φίλους μου για την συμβολή τους όχι μόνο τους τελευταίους χρόνους αλλά καθόλη της διάρκεια της εξέλιξης μου. Τελευταίο και πιο σημαντικό, το ταξίδι αυτό δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την υποστήριξη, την ενθάρρυνση και την υπομονή της μητέρας μου, που μου έμαθε να επιμένω και να καταφέρνω τους στόχους μου. Αυτή η διατριβή είναι αφιερωμένη σε όλους εσάς. Σας ευχαριστώ!

Πίνακας Περιεχομένων

Κατάλογος Πινάκων	1
Κατάλογος Σχημάτων	2
Κατάλογος Εικόνων	3
Ακρωνύμια/Συντομογραφίες	4
Περίληψη	5
Abstract	6
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	7
1.1 Γενικό Πλαίσιο.....	7
1.2 Μεθοδολογία	11
1.3 Περίγραμμα της Εργασίας.....	12
Κεφάλαιο 2	14
2.1 Αλγόριθμοι Path Planning	14
2.2 COLREGs	22
2.3 Ship Domain	24
Κεφάλαιο 3	26
3.1 Βιολογικό ανοσοποιητικό σύστημα	26
3.2 Υπολογιστικές πτυχές του ανοσοποιητικού συστήματος	30
3.3 Τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα	31
3.4 Αλγόριθμοι AIS	34
Κεφάλαιο 4	42
4.1 Παραδοχές Εφαρμογής	42
4.2 Περιγραφή Κώδικα	43
4.4 Αποτελέσματα Κώδικα	56
Κεφάλαιο 5	74
5.1 Συμπεράσματα και Προτάσεις	74
Παράρτημα.....	77
Βιβλιογραφία	79

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Agent	45
Πίνακας 2: Παράμετροι μοντέλου κίνησης	46
Πίνακας 3: Παράμετροι Ρίσκου	50
Πίνακας 4: Πίνακας βαρών συνάρτησης ρίσκου (Shaobo et al., 2020).....	50
Πίνακας 5: Βάρη των παραμέτρων υπολογισμού της τιμής ρίσκου.....	50
Πίνακας 6: Βάρη συνάρτησης κόστους	56
Πίνακας 7: Παράμετροι αλγόριθμου CLONALG	56
Πίνακας 8: Δεδομένα χάρτη και πλοίου.....	57
Πίνακας 9: Θέσεις στατικών αντικειμένων	57
Πίνακας 10: Υποδειγματικά Σημεία διέλευσης	59

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διαίρεση προβλήματος ασφαλούς πλοήγησης	11
Σχήμα 2: Μεθοδολογία μοντέλου	12
Σχήμα 3: Περίγραμμα της Διπλωματικής εργασίας.....	13
Σχήμα 4: Ψευδοκώδικας της μεθόδου APF (Naeem et al., 2016)	15
Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Dijkstra (Chib et al., 2016).....	16
Σχήμα 6: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου RRT (Xia et al., 2020).....	17
Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου A* (Zidane, 2018).....	18
Σχήμα 8: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ACO (Saeidi et al., 2022)	19
Σχήμα 9: Ψευδοκώδικας του βασικού αλγορίθμου PSO (Zeng, 2016).....	20
Σχήμα 10: Ψευδοκώδικας του βασικού Γενετικού αλγορίθμου (Lamini et al., 2018).....	21
Σχήμα 11: Διάγραμμα ροής του COLAV.....	43
Σχήμα 12: Global και Local Path planning	44

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Απεικόνιση του αυτόνομου σκάφους εμπορευματοκιβωτίων μηδενικών εκπομπών <i>Yara Birkeland</i> . (<i>Yara International ASA</i>).....	8
Εικόνα 2: Κατανομή ναυτικών ατυχημάτων για το 2019 (<i>EMSA, 2020</i>).....	10
Εικόνα 3: Χάρτης ελκτικής και απωστικής δύναμης <i>APF</i> (<i>Naeem et al., 2016</i>).....	15
Εικόνα 4: Απεικόνιση του αλγόριθμου <i>Dijkstra</i> (<i>Rehman, 2019</i>).....	16
Εικόνα 5: Απεικόνιση εξερεύνησης τυχαίου δέντρου.....	17
Εικόνα 6: Απεικόνιση κόμβων νευρωνικών δικτύων και παραμέτρων βάρους (<i>Caban et al., 2018</i>)	21
Εικόνα 7: Σύστημα Διαχωρισμού της Κυκλοφορίας (<i>Traffic Separation Scheme</i>) στο Στενό της Μεσσήνης στην Ιταλία (<i>Cucinotta et al., 2017</i>).....	23
Εικόνα 8: Σωστός και λανθασμένος τρόπος διέλευσης μέσα από μία κυκλοφοριακή λωρίδα σύμφωνα με τους <i>CORLEGs</i> (<i>Serrat, 2012</i>).....	23
Εικόνα 9: Απαιτούμενοι ελιγμοί αποφυγής σύγκρουσης σε κάθε περίπτωση συνάντησης κατά <i>COLREGs</i> (<i>Kufoalor et al., 2019</i>).	24
Εικόνα 10: Πολλαπλά στρώματα του ανοσοποιητικού συστήματος (<i>Malim et al., 2011</i>).....	26
Εικόνα 11: Απόκριση των αντιγόνων του Βιολογικού Ανοσοποιητικού Συστήματος. (<i>Gong et al., 2009</i>).....	30
Εικόνα 12: Η σταδιακή προσέγγιση για τη δόμηση <i>AIS</i> λύσεων (<i>de Castro et al., 2002</i>).....	32
Εικόνα 13: Αλγόριθμος <i>DCA</i> (<i>Greensmith et al. 2005</i>).....	33
Εικόνα 14: Παρουσία παρατόπου και ιδιοτόπου στο αντίσωμα.....	34
Εικόνα 15: Γενικός αλγόριθμος ανοσιακού δικτύου (<i>Timmis et al. 2008</i>).	35
Εικόνα 16: Στάδιο επιλογής.....	36
Εικόνα 17: Στάδιο παρακολούθησης.....	36
Εικόνα 18: Γενικός αλγόριθμος αρνητικής επιλογής (<i>Forrest et al., 1994</i>).....	37
Εικόνα 19: Επιλογή κλώνων.....	38
Εικόνα 20: Γενική προσέγγιση του αλγορίθμου κλωνικής επιλογής βασισμένη στον <i>CLONALG</i> (<i>de Castro et al., 2002</i>).....	39
Εικόνα 21: Αρχή της Θεωρίας κινδύνου (<i>Aickelin et al., 2008</i>).....	40
Εικόνα 22: Στρατηγική Αποφυγής Σύγκρουσης <i>Danger Model</i> (<i>Xu, 2014</i>).....	41
Εικόνα 23: Στιγμιότυπο <i>Ship Domain</i> σε τυχαία στιγμή.....	46
Εικόνα 24: Κατάσταση υπολογισμού παραμέτρων κατά την αποφυγή σύγκρουσης, (<i>Shaobo et al., 2020</i>).....	47
Εικόνα 25: Μεθοδολογία λήψης αποφάσεων αποφυγής σύγκρουσης.....	51
Εικόνα 26: Αρχή του αλγορίθμου.....	57
Εικόνα 27: Κώνοι σύγκρουσης (<i>Collision Cones</i>).....	58
Εικόνα 28: Χάρτης, Διαδρομής, Εμπόδια, Κώνοι Σύγκρουσης σε τυχαίο σημείο.....	58
Εικόνα 29: Τελική Τροχιά Πλοίου.....	58
Εικόνα 30: Συνάρτηση κόστους κατά την 1η επανάληψη (<i>HEAD ON</i>).....	60
Εικόνα 31: Διατήρηση πορείας για οικονομία (<i>HEAD ON</i>).....	60
Εικόνα 32: Τιμή ρίσκου συναρτήσσει των επαναλήψεων.....	61
Εικόνα 33: Πορεία πλοίου <i>Head-On</i>	61
Εικόνα 34: Πορεία πλοίου <i>Cross-right</i>	61
Εικόνα 35: Πορεία πλοίου <i>Cross-left</i>	62
Εικόνα 36: Πορεία πλοίου <i>Overtake</i>	62
Εικόνα 37: Συνάρτηση <i>Ackley</i>	70
Εικόνα 38: Συνάρτηση <i>Griewank</i>	70
Εικόνα 39: Συνάρτηση <i>Ackley</i> και αντισώματα.....	71
Εικόνα 40: Τιμή ελαχίστου συνάρτησης <i>Ackley</i> ανά επανάληψη.....	71
Εικόνα 41: Συνάρτηση <i>Griewank</i> και αντισώματα.....	72
Εικόνα 42: Τιμή ελαχίστου συνάρτησης <i>Griewank</i> ανά επανάληψη.....	72

Ακρωνύμια/Συντομογραφίες

A*	A-Star
Ab	Antibody
ACO	Ant Colony Optimization
Ag	Antigen
AIS	Artificial Immune System
AIS	Automatic Identification System
ANN	Artificial Neural Network
APF	Artificial Potential Fields
ASV	Autonomous Surface Vehicle
BIS	Biological Immune System
CLONALG	Clone Algorithm
COLREGs	Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea
CPU	Central Processing Unit
DICC	Discretization Inputs with Collision Check
EA	Evolutionary Algorithms
EMSA	European Maritime Safety Agency
GA	Genetic Algorithm
GPU	Graphics Processing Unit
ICARIS	International Conference on Artificial Immune Systems
IMO	International Maritime Organization
LCM	Lane Curvature Method
MPC	Model Predictive Control
MUNIN	Marine Unmanned Navigation through Intelligence in Networks
NM	Nautical Miles
OS	Own Ship
PSO	Particle Swarm Optimization
RAM	Random Access Memory
RRT	Rapidly exploring Random Tree
SI	Swarm Intelligence
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
TBA	Trajectory Base Algorithm
TS	Target Ship
USV	Unmanned Surface Vehicle
VO	Velocity Obstacle

Περίληψη

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών έχει ωθήσει τον κλάδο της ναυτιλίας στην ανάπτυξη αυτοματισμών και συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων, με σκοπό τον χειρισμό και την διαρκή επίβλεψη του των πλοίων (AIS, GPS), σε πραγματικό χρόνο από κάθε σημείο του πλανήτη, μειώνοντας μεγάλο μέρος του ρίσκου. Οι συγκρούσεις αποτελούν έναν από τους πιο συνήθεις τύπους ναυτικών ατυχημάτων, ελλοχεύοντας σημαντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη ζωή, το περιβάλλον αλλά και το οικονομικό όφελος. Η ανάπτυξη συστημάτων με σκοπό την αποφυγή σύγκρουσης πλοίων, φαίνεται να μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στο περιορισμό αξιοσημείωτου αριθμού ναυτικών ατυχημάτων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος αποφυγής σύγκρουσης ενός υποθετικά αυτόνομου που βασίζεται στο μεθοδολογικό πλαίσιο των Τεχνητών Ανοσοποιητικών Συστημάτων. Ως πρωταρχικός σκοπός θεωρήθηκε η ανάπτυξη ενός τέτοιου αλγορίθμου και σε συνέχεια η αξιολόγηση του μέσω σεναρίων πιθανών συγκρούσεων, τόσο ως προς την ασφάλεια, όσο και ως προς τον χρόνο εκτέλεσης του και την εύρεση της πιο οικονομικής πορείας.

Ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε, χρησιμοποιεί υποθετικά αντισώματα, τα οποία παράγονται μετά από την αναγνώριση ενός κινδύνου. Ως αντιγόνο, θεωρείται μια συνάρτηση “γενικευμένου” κόστους που καλούμαστε να ελαχιστοποιήσουμε με σκοπό να εξαλείψουμε το κίνδυνο.

Στην εφαρμογή, σε πρώτο πλαίσιο εξετάζεται ο σχεδιασμός της πορείας του πλοίου σε έναν δεδομένο χάρτη με συνυπολογισμό των στατικών εμποδίων της περιοχής. Η εκτέλεση αυτής της αποστολής υλοποιείται με χρήση του αλγορίθμου *Velocity Obstacle*, ενός αλγορίθμου που πραγματοποιεί αναζήτηση της βέλτιστης διαδρομής μέσω της μηχανικής της κίνησης.

Σε επόμενο στάδιο εξετάζεται η διατήρηση της πορείας που χάραξε ο αλγόριθμος, ανιχνεύοντας καθόλη τη διάρκεια της κίνησης τον κίνδυνο σύγκρουσης. Σε περίπτωση που ανιχνευθεί κίνδυνος σύγκρουσης, ενεργοποιείται ο αλγόριθμος του ανοσοποιητικού συστήματος (CLONALG), ο οποίος είναι αποκλειστικά υπεύθυνος για την αποφυγή της σύγκρουσης. Ο CLONALG θεωρεί ως αντιγόνο μια συνάρτηση “γενικευμένου” κόστους που καλείται να ελαχιστοποιήσει με σκοπό να παράγει τα βέλτιστα αντισώματα, τα οποία αντικατοπτρίζονται ως γωνίες μεταβολής της κατεύθυνσης για αποφυγή της σύγκρουσης. Ελέγχθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι προσέγγισης που περιγράφονται στους COLREGs ώστε να υπάρχει πληρότητα της εφαρμογής.

Ο αλγόριθμος του ανοσοποιητικού συστήματος φαίνεται να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την αποφυγή σύγκρουσης και απόσταση μεγαλύτερη της ελάχιστης να διατηρείται. Ο χρόνος εκτέλεσης και εύρεσης της βέλτιστης τιμής είναι κοντά στα 6 δευτερόλεπτα για κάθε σημείο διέλευσης. Παρόλο που ο αλγόριθμος δεν έχει σχεδιαστεί για να συμμορφώνεται με τους COLREGs, τελικά προκύπτει η συμμόρφωση του με αυτούς σε ορισμένες καταστάσεις προσέγγισης.

Λέξεις Κλειδιά:

Τεχνητό Ανοσοποιητικό Σύστημα, Χάραξη τροχιάς, *Velocity Obstacle*, COLREGs, Αποφυγή σύγκρουσης, Βελτιστοποίηση, Τομέας πλοίου, Ρίσκο σύγκρουσης

Abstract

The continuous development of technologies has pushed the shipping industry to develop automation and decision support systems, in order to handle and continuously monitor ships (AIS, GPS), in real time from any point on the planet, reducing much of the risk. Collisions are one of the most common types of maritime accidents, entailing significant risks to human life, the environment and economic benefit. The development of systems to avoid ship collisions seems to be able to help significantly in reducing a significant number of maritime accidents.

In this thesis, a hypothetically autonomous collision avoidance algorithm based on the methodological framework of Artificial Immune Systems was developed. The primary goal was to develop such an algorithm and then to evaluate it through possible conflict scenarios, both in terms of security, as well as in terms of its execution time and finding the most economical path.

The algorithm created uses hypothetical antibodies, which are generated after a risk is identified. As an antigen, it is considered a “generalized” cost function that we are required to minimize in order to eliminate risk.

In the application, in the first frame, the planning of the ship's course on a given map is considered, considering the static obstacles of the area. The execution of this mission is implemented using the Velocity Obstacle algorithm, an algorithm that searches for the optimal path through motion mechanics.

In the next stage, the preservation of the path drawn by the algorithm is examined, detecting the risk of collision throughout the movement. In case a risk of collision is detected, the immune system algorithm (CLONALG) is activated, which is solely responsible for avoiding the collision. CLONALG considers an antigen a “generalized” cost function that it is asked to be minimized in order to produce optimal antibodies, which are reflected as collision avoidance angles. Four different types of approach described in the COLREGs were tested for completeness of application.

The immune system algorithm seems to give satisfactory results for collision avoidance and a distance greater than the minimum to be maintained. The time to run and find the optimal value is close to 6 seconds for each waypoint. Although the algorithm is not designed to conform to the COLREGs, it eventually conforms to them in some approximation situations.

Keywords:

Artificial Immune System, Path planning, Velocity Obstacle, COLREGs, Collision avoidance, Optimization, Collision risk, Ship domain

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Αυτό το κεφάλαιο περιγράφει το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Ο κύριος στόχος της παρούσας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου με στόχο τη προσομοίωση αποφυγής σύγκρουσης αυτόνομων πλοίων σε θεωρητικά σενάρια, και η εξέταση της συμμόρφωσης τους σύμφωνα με τους Διεθνείς Κανονισμούς Αποφυγής Συγκρούσεων στη Θάλασσα (COLREGs), εφαρμόζοντας τη θεωρία του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος.

1.1 Γενικό Πλαίσιο

Τις τελευταίες δεκαετίες οι έρευνες για δημιουργία αυτόνομων πλοίων έχουν αυξηθεί σημαντικά. Αυτόνομο πλοίο θεωρείται ένα θαλάσσιο σκάφος που ελέγχεται με χρήση της τεχνητή νοημοσύνη (AI). Αυτά τα σκάφη μπορούν δυνητικά να είναι μη επανδρωμένα και να λειτουργούν αυτόνομα. Τα αυτόνομα πλοία χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό αισθητήρων για να δώσουν στη τεχνητή νοημοσύνη του πλοίου μια πιο ακριβή εικόνα. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν το RADAR, το Lidar, τις κάμερες υψηλής ευκρίνειας, τη θερμική απεικόνιση και το σόναρ. Τα πλοία μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα αυτονομίας από πλήρως επανδρωμένα σε μερικώς χειριζόμενα, τηλεχειριζόμενα, μερικώς αυτόνομα και πλήρως αυτόνομα μη επανδρωμένα. Εφαρμογές τους αρχίζουν να εμφανίζονται στη ναυτιλία με το ανάλογο πλαίσιο να δομείται.

Με κίνητρο το ενδεχόμενο μειωμένο κόστος και την αυξημένη ασφάλεια, η ναυτιλιακή βιομηχανία κινείται γρήγορα προς τις αυτόνομες δραστηριότητες. Μετά από πρωτοποριακές προόδους στην αυτοκινητοβιομηχανία, η αγορά των αυτόνομων πλοίων αναμένεται να αναπτυχθεί με έναν γρήγορο ρυθμό στο προσεχές μέλλον. Η ζήτηση σε μέγεθος όγκου αναμένεται να αυξηθεί κατά 26,7% για την περίοδο 2024-2035 και να αποδώσει έσοδα μεγέθους 3,48 δισεκατομμυρίων δολαρίων έως το 2035 (Global Autonomous Ship and Ocean Surface Robot Market, 2018). Ως εκ τούτου, αναμένεται μια αυξημένη ζήτηση για ανάπτυξη τεχνολογίας αυτόνομων συστημάτων στη ναυτιλιακή βιομηχανία και πιο συγκεκριμένα στη πλοήγηση και λειτουργία των πλοίων. Επομένως, ο κλάδος καλείται να παράγει συστήματα που θα αυξήσουν την αυτονομία στη θάλασσα και θα βελτιώσουν την καθοδήγηση, την πλοήγηση και τον έλεγχο. Παρατηρώντας τις τάσεις και έχοντας ως κύριο γνώμονα την ομαλή και ασφαλή πλοήγηση, συνεχώς αναπτύσσονται τεχνολογίες με βάση τον απομακρυσμένο έλεγχο και σχεδιάζονται συστήματα όπου η ιδέα για ένα πλήρες αυτόνομο πλοίο φαντάζει πιο κοντά από ποτέ.

Οι εταιρίες *Rolls-Royce*[®] και *Wilhelmsen-Kongsberg*[®] συνεργάζονται με σκοπό την υλοποίηση ενός έργου με βάση τα αυτόνομα πλοία και κύρια στρατηγική τους είναι η ανάπτυξη υποδομών χερσαίων κέντρων παρακολούθησης τους, με προηγμένες λύσεις ανεφοδιασμού αποσκοπώντας στην παροχή εντελώς αυτόνομων θαλάσσιων επιχειρήσεων. Το 2018, με συλλογική προσπάθεια της *Rolls-Royce* και της Φινλανδικής εταιρείας *Finferries*, παρουσιάστηκε με επιτυχία το πρώτο πλήρως αυτόνομο πλοίο στον κόσμο. Η επίδειξη διεξήχθη στη διαδρομή *Parainen-Nauno* στο αρχιπέλαγος νότια της πόλης *Turku* της Φινλανδίας. Το *Falco* είναι ένα οχηματαγωγό 53,8 μέτρων που τέθηκε σε υπηρεσία αρχικά από τη *Finferries* το 1993. Στο παρθενικό αυτόνομο ταξίδι του, το οχηματαγωγό *Falco* προσκάλεσε 80 επισκέπτες και πραγματοποίησε ταξίδι υπό πλήρως αυτόνομο έλεγχο χρησιμοποιώντας τις τεχνολογίες *Rolls-Royce Ship Intelligence* (*Rolls-Royce*, 2018). Η *Promare*, ένας οργανισμός θαλάσσιας έρευνας και εξερεύνησης που εδρεύει στις ΗΠΑ, έχει προγραμματίσει το 2021 να αναθέσει σε ένα πλοίο χωρίς πλήρωμα που θα ελέγχεται από έναν κυβερνήτη τεχνητής νοημοσύνης της *IBM* να διασχίσει τον Ατλαντικό Ωκεανό. Το *Mayflower Autonomous Ship*

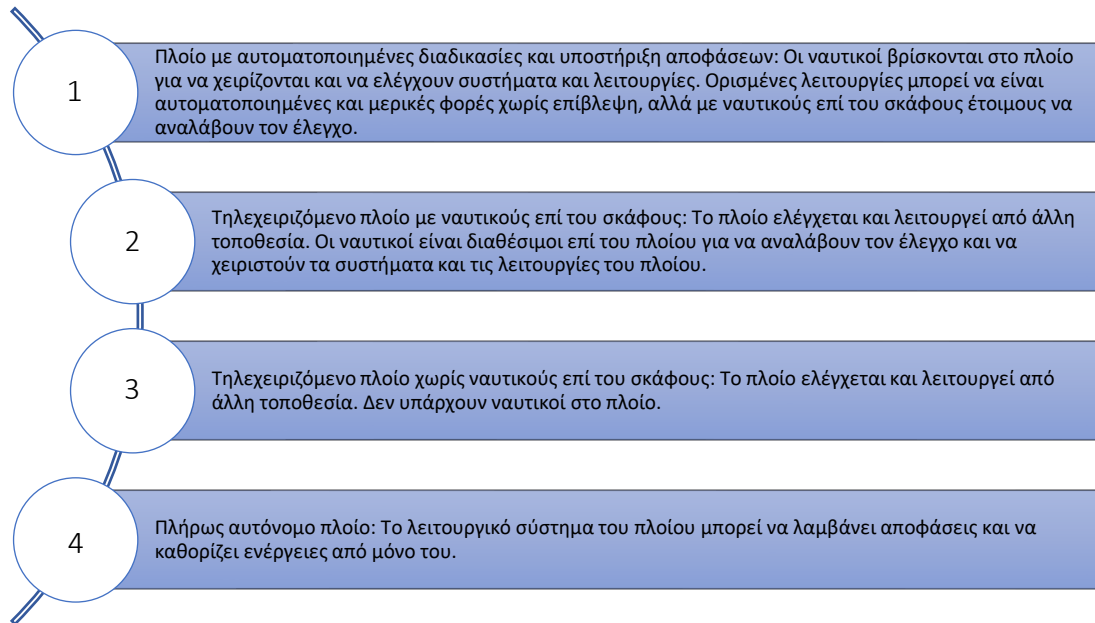
(MAS), που προωθείται κυρίως από ηλιακή ενέργεια, θα κάνει το ίδιο ταξίδι με το αρχικό Mayflower πριν από 400 χρόνια. Το πλοίο θα εισέλθει στα βαθιά νερά του ωκεανού σε αυτό το υπερατλαντικό ταξίδι, όπου η συνδεσιμότητα με δορυφόρους ή σύννεφα δεν θα είναι διαθέσιμη. Επομένως, όλη η επεξεργασία δεδομένων που απαιτείται για τη λειτουργία και τη βοήθεια ναυσιπλοΐας πρέπει να είναι διαθέσιμη στο ίδιο το πλοίο (Paul Sawers, 2020). Από το 2017, η νορβηγική εταιρεία Yara International και η Kongsberg εργάζονται για να θέσουν σε λειτουργία ένα ηλεκτρικό, αυτόνομο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Το Yara Birkeland Autonomous Ship Project (Εικόνα 1) θα ενεργεί σε τρία λιμάνια και θα καλύπτει 12 ναυτικά μίλια στη νότια Νορβηγία (Bratic et al., 2019).



Εικόνα 1: Απεικόνιση του αυτόνομου σκάφους εμπορευματοκιβωτίων μηδενικών εκπομπών Yara Birkeland. (Yara International ASA)

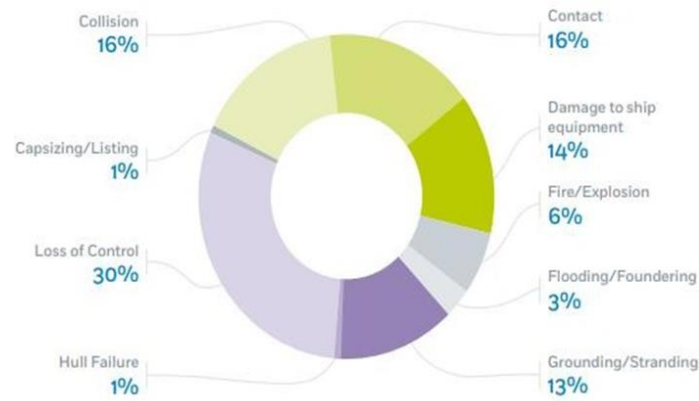
Τις τελευταίες δεκαετίες η τεχνολογία της αυτονομίας προχωρά και εξελίσσεται ταχύτερα από τη διεθνή νομοθεσία που κινείται αλλά με σημαντικά ηπιότερους ρυθμούς. Οι προκλήσεις είναι η εύρεση ενός νέου μηχανισμού για την συνύπαρξη του κέρδους, της αποτελεσματικής ρύθμισης της ασφάλειας στη θάλασσα και της περιβαλλοντικής ασφάλειας.

Ενώ ο IMO έχει πολύ δρόμο να διανύσει για να δημιουργήσει κανόνες για τη χρήση μη επανδρωμένων αυτόνομων πλοίων φορτίου στην ανοιχτή θάλασσα, έχει δημιουργήσει κατευθυντήριες γραμμές για τις περιοχές δοκιμής καθώς και έναν ορισμό τεσσάρων σταδίων της αυτονομίας (Eason, 2021).



Η νομοθεσία πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να συμπεριλαμβάνει τη μεγάλη ποικιλία κινδύνων αυτής της βιομηχανίας, να υποστηρίζει την καινοτομία που αποσκοπεί στην ασφάλεια και στην επιχειρηματική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Lemon, 2018).

Με τον όρο σύγκρουση (collision) εννοείται η πρόσκρουση μεταξύ δύο πλοίων, ανεξαρτήτως του εάν αυτά βρίσκονται εν πλω ή ακυροβολημένα (IMO, 2008). Οι συγκρούσεις, ως ένας από τους βασικότερους τύπους ατυχημάτων στη ναυτιλία, αποτελούσαν ανέκαθεν απειλή για την ασφάλεια των θαλάσσιων μεταφορών, την τοπική και παγκόσμια οικονομία αλλά και την κοινωνία, λόγω των δυσβάσταχτων συνεπειών που μπορούν να επιφέρουν (Chen et al., 2019). Σύμφωνα με τα στοιχεία της EMSA (2020), μάλιστα, αποτέλεσαν την αιτία για το 16% των ναυτικών ατυχημάτων που έλαβαν χώρα κατά το 2019, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Κατά το παρελθόν, πολλές στατιστικές μελέτες σε διαφορετικές θαλάσσιες περιοχές ανά τον κόσμο κατέδειξαν τη σημαντική συμβολή των συγκρούσεων στον συνολικό αριθμό των ναυτικών ατυχημάτων. Οι Eliorouliou et al. (2016), αναλύοντας δεδομένα της βάσης IHS Sea-web για τη χρονική περίοδο 2000-2012, συμπέραναν ότι η σύγκρουση αποτέλεσε ένα από τα ατυχήματα με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης ιδιαίτερα σε πλοία που επιχειρούσαν συχνότερα σε θαλάσσιους χώρους με μεγάλο συνωστισμό, όπως RoRo, Car Carriers και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Containerships), τη στιγμή που τα LNG ήταν εκείνα που ενεπλάκησαν στα λιγότερα περιστατικά.

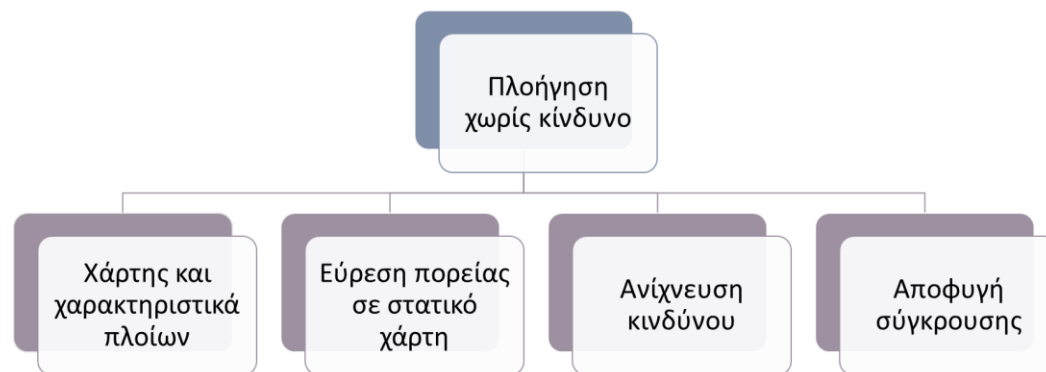


Εικόνα 2: Κατανομή ναυτικών ατυχημάτων για το 2019 (EMSA, 2020)

Συνολικά από τα 4104 συμβάντα ατυχημάτων που αναλύθηκαν κατά τις έρευνες του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Ναυτικής Ασφάλειας για το 2019 (EMSA, 2019), το 65,8% αποδόθηκε σε ανθρώπινα λανθασμένες ενέργειες. Τα στατιστικά δείχνουν επίσης ότι το 41,7% όλων των ατυχημάτων σημειώθηκε σε λιμενικές περιοχές, ακολουθούμενο από 27,4% στις παράκτιες περιοχές (χωρική θάλασσα). Αυτοί οι αριθμοί δείχνουν αυξημένο κίνδυνο σύγκρουσης κατά την πλοήγηση σε συνωστισμό με πολλά στατικά και δυναμικά εμπόδια. Μια μελέτη του Tzannatos (2010), η οποία εξέτασε τα θαλάσσια ατυχήματα των ελληνικών πλοίων κατά τις περιόδους προ-ISM (Διεθνής Κώδικας Διαχείρισης Ασφάλειας) και μετά-ISM, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι συγκρούσεις και οι προσαράξεις στα ελληνικά πλοία συνδέονται στενά με τον πλοίαρχο. Ο Macrae (2009) εξέτασε 30 αναφορές θαλάσσιων ατυχημάτων που κατατέθηκαν στο Australian Transport Safety Bureau (ATSB) και βρήκε ότι τα λάθη που σχετίζονται με τον άνθρωπο και το ανθρώπινο δυναμικό ήταν τα αίτια των συγκρούσεων και των προσαράξεων. Η μελέτη αποκάλυψε ότι, γενικά, οι προσαράξεις προκλήθηκαν από σφάλματα σχεδίου πλεύσης, αστοχία καθορισμού θέσης ή έλλειψη επικοινωνίας μεταξύ της ομάδας της γέφυρας, ενώ οι συγκρούσεις προκλήθηκαν από σφάλματα στον προσδιορισμό της ταχύτητας ή ακόμη και ανίχνευση της παρουσίας ενός άλλου πλοίου και λάθη στα σχέδια πρόληψης συγκρούσεων. Οι Antoa και Soares (2006) προσδιόρισαν τα αίτια των συγκρούσεων και προσαράξεων στα πλοία Ro-Pax χρησιμοποιώντας την επίσημη μεθοδολογία αξιολόγησης ασφάλειας του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) και απέδειξαν τη σημασία των αρχικών συμβάντων στην πρόκληση ατυχημάτων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ανάλυσης δένδρων σφαλμάτων (FTA). Η μελέτη τους κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η αποτυχία αποτελεσματικής χρήσης των βοηθημάτων πλοήγησης, οι αστοχίες στους ελιγμούς και τα σφάλματα του συστήματος ήταν συνήθεις παράγοντες πίσω από τις συγκρούσεις, ενώ οι αστοχίες του ραντάρ, του κινητήρα και του πηδαλίου και η ανεπαρκής επιτήρηση ήταν οι συνήθεις παράγοντες πίσω από τις προσαράξεις. Το προαναφερθέν υψηλό ποσοστό των ατυχημάτων ναυσιπλοΐας και του ποσοστού ανθρώπινων λαθών θεωρείται ότι μπορεί να μειωθεί με την εισαγωγή της αυτονομίας στη ναυσιπλοΐα (Jiri de Vos et al., 2021). Επιπλέον, αυτόνομα σκάφη είναι κατάλληλα για αποστολές σε επικίνδυνα θαλάσσια περιβάλλοντα. Από την άλλη πλευρά, η αυξημένη αυτονομία συνδέεται επίσης με αρκετές σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη λειτουργία σε ανοιχτά, παράκτια και συνωστισμένα νερά, την κατανάλωση ενέργειας, τις περιβαλλοντικές διακυμάνσεις, τις απαιτήσεις του προσωπικού και με τα ζητήματα εθνικής ασφάλειας. Η ανάγκη για την αποφυγή συγκρούσεων και δημιουργία πλοίων ικανών να μειώσουν τα επίπεδα κινδύνου είναι ένα αντικείμενο μελέτης και ενδιαφέροντος.

Η πιθανολογική ανάλυση και μελέτη ρίσκου των θαλασσιών συγκρούσεων έχει οδηγήσει σε μια προσπάθεια δημιουργίας «έξυπνων» αλγορίθμων οι οποίοι δύνανται, με την βοήθεια επιπρόσθετων μεσών ναυσιπλοΐας (AIS, Lidar, κάμερες, φώτα ναυσιπλοΐας), να παρέχουν επαρκή εφόδια στην πορεία και τη συμπεριφορά του πλοίου. Ως κύρια βάση, οι αλγόριθμοι πρέπει να τηρούν συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Αναγκαία είναι η διαθεσιμότητα δεδομένων πλοήγησης που ανταποκρίνονται στην πραγματική κατάσταση στη θάλασσα, η συμμόρφωση των πλοίων σύμφωνα με τους διεθνείς κανονισμούς σύγκρουσης (COLREGs), ο εντοπισμός και ο συνυπολογισμός στη διαμόρφωση της πορείας τόσο δυναμικών όσο και στατικών αντικείμενων, η ασφαλής απόσταση από αυτά, ο ορισμός της βέλτιστης πορείας μεταξύ της στιγμιαίας θέσης του πλοίου με τον τελικό προορισμό και τέλος να συνυπολογίζεται και η κατάσταση του καιρού (Lazarowska, 2019). Δεδομένων αυτών των προϋποθέσεων η αποφυγή σύγκρουσης διασπάται στη διαδικασία επίλυσης τριών μικρότερων προβλημάτων (Σχήμα 1).

Σε αρχικό στάδιο εφαρμόζεται ο σχεδιασμός της πορείας του πλοίου σύμφωνα με τα δεδομένα του χώρου στον οποίον κινείται, σε δεύτερο στάδιο γίνεται ανίχνευση πιθανών συγκρούσεων καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του πλοίου και τέλος εφόσον υπάρχει ρίσκο σύγκρουσης, η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος σύμφωνα με τους κανονισμούς (Huang et al., 2020).



Σχήμα 1: Διαίρεση προβλήματος ασφαλούς πλοήγησης

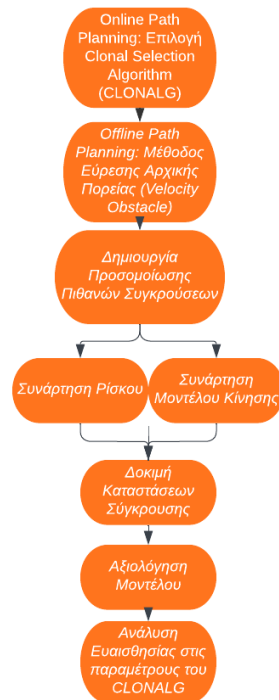
Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ποικίλες εφαρμογές αλγορίθμων ικανών να επιτύχουν τον στόχο της αφαλούς χάραξης πορείας, της αποφυγής σύγκρουσης και της πλοήγησης. Παραδείγματα εφαρμογών της μεθοδολογίας έχουν χρησιμοποιηθεί για την αυτόνομη πλοήγηση ενός ρομπότ ικανού να φέρει εις πέρας απλούς στόχους (Ozcelik et al., 2011), την προσομοίωση πλοήγησης ενός αεροσκάφους *Boeing747* με σκοπό να διατηρεί την κατάσταση πτήσης του εν παρουσία ανωμαλιών της ροής του ανέμου και των παραμέτρων πτήσης (Karr et al., 2005), την δημιουργία ενός δικτύου ρομπότ υπεύθυνο για τη συλλογή σκουπιδιών με επικοινωνία μεταξύ τους ώστε να βελτιστοποιείται στο σύστημα (Michelan et al., 2002) και την ασφαλή πλοήγηση με πραγματικά δεδομένα πλεύσης του πλοίου *Horizont II* με χρήση ενός υβριδικού αλγορίθμου (Lazarowska, 2019).

1.2 Μεθοδολογία

Σύμφωνα με τον προκαθορισμένο στόχο της εργασίας, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του αλγορίθμου αποτελείται από τα επόμενα βήματα (Σχήμα 2):

- Επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου ανοσοποιητικού συστήματος
- Υλοποίηση του κώδικα για την προσομοίωση της σύγκρουσης.
- Δοκιμή καταστάσεων σύγκρουσης

- Αξιολόγηση λειτουργίας του μοντέλου
- Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων



Σχήμα 2: Μεθοδολογία μοντέλου

Η σημαντική προσθήκη της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία ενός υβριδικού αλγόριθμου που χρησιμοποιεί τις μεθόδους του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος για το Online Path Planning, σε συνδυασμό με τον αλγόριθμο Velocity Obstacle (VO) για το Offline Path Planning (Douthwaite et al., 2019) κομμάτι της πλοήγησης του πλοίου μας και θα αναλυθεί παρακάτω.

1.3 Περίγραμμα της Εργασίας

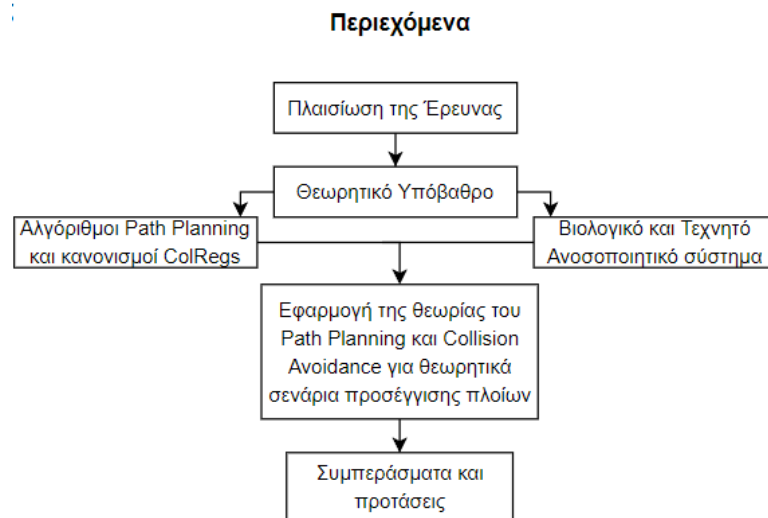
Η δομή της παρούσας Διπλωματικής εργασίας φαίνεται στο Σχήμα 3.

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται μια εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση και αναλύεται μια σειρά από αλγορίθμους Path Planning και εφαρμογών αποφυγής σύγκρουσης στη Βιβλιογραφία. Επιπροσθέτως, αναφέρονται οι κανονισμοί για την ασφαλή πλοήγηση στη Θάλασσα.

Στο Κεφάλαιο 3, διεξάγεται μια εκτενής ανάλυση της λειτουργίας του βιολογικού ανοσοποιητικού συστήματος, του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος και της διασύνδεσης τους. Τέλος, αναφέρονται πρόσφατες μοντελοποιήσεις βάσει αυτού πάνω σε προβλήματα βελτιστοποίησης, αναγνώρισης προτύπων, εντοπισμό σφαλμάτων, κ.α.

Στο Κεφάλαιο 4, αναλύεται η μεθοδολογία και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η στρατηγική που ακολουθείται για την αποφυγή της σύγκρουσης. Ακόμη, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά την εκτέλεση του κώδικα. Τέλος, αναλύεται η συμπεριφορά του αλγορίθμου σε σχέση με τους COLREGs και παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας για τις παραμέτρους του αλγορίθμου του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 5, συνοψίζονται τα χρήσιμα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις του μοντέλου και της προσομοίωσης για μελλοντική έρευνα.



Σχήμα 3: Περίγραμμα της Διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 2

2.1 Αλγόριθμοι Path Planning

Το παρών κεφάλαιο αναφέρεται στους αλγόριθμους και τις μεθόδους Path Planning και τους κανονισμούς COLREGs.

Αλγόριθμοι ικανοί να διαμορφώνουν και να αλλάζουν την πορεία καθ' όλη τη διάρκεια κίνησης του πλοίου διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο πρόβλημα. Διαφορετικοί αλγόριθμοι έχουν απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα. Ήδη από το 1957, ο Dubins (1957) παρουσίασε τους πρώτους αλγορίθμους ικανούς να δημιουργήσουν τροχιές ικανές να ενώνουν δύο σημεία (αρχής και στόχου). Από εκείνη τη στιγμή έχουν δημιουργηθεί πολλές διαφορετικές υπολογιστικές μέθοδοι.

Ως κύριοι άξονες, θεωρούνται η αποφυγή των εμποδίων (είτε στατικών, είτε δυναμικών), η οικονομία και η ικανότητα του πλοίου να ακολουθεί τις πορείες που ορίζει ο αλγόριθμος. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση στους αλγορίθμους που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία είναι η διαφοροποίηση τους σε αλγορίθμους υπολογισμού ολόκληρης της τροχιάς (Global Path Planning) και αλγορίθμους υπολογισμού είτε τμημάτων, είτε σημείων τοπικής τροχιάς (Local Path Planning)(Chen et al., 2020; Marin-Plaza et al., 2018). Οι αλγόριθμοι Global Path Planning εστιάζουν στη δημιουργία τροχιάς μεταξύ του σημείου έναρξης και του σημείου στόχου για ένα γνωστό περιβάλλον με γνωστές παραμέτρους και πληροφορίες (π.χ. κατάσταση καιρού, γεωγραφικά δεδομένα)(Chen et al., 2020; Lyu et al., 2021). Οι αλγόριθμοι Local Path Planning εστιάζουν σε καταστάσεις μεγαλύτερης ακρίβειας όπου υπάρχει πληθώρα κινδύνου, όπως σε λιμάνια ή παράκτιες περιοχές.

Στη πρόσφατη βιβλιογραφία της αυτόνομης πλοήγησης πλοίων υπάρχει πληθώρα διαφορετικών προσεγγίσεων στο πρόβλημα που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν (Statheros et al., 2008; Lazarowska, 2019) ως εξής:

- a. Ντετερμινιστικές
- b. Ευρετικές/Στοχαστικές
- c. Υβριδικές (Ventikos et al., 2021; Statheros et al., 2008; Lazarowska., 2019)

Ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι

Οι ντετερμινιστικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν τη λύση μαθηματικών μοντέλων. Ένας ντετερμινιστικός αλγόριθμος είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος καθορίζεται καθαρά από τις εισόδους του, όπου δεν υπάρχει τυχαίο στοιχείο στο μοντέλο. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι θα έχουν πάντοτε το ίδιο αποτέλεσμα δεδομένων των ίδιων εισόδων.

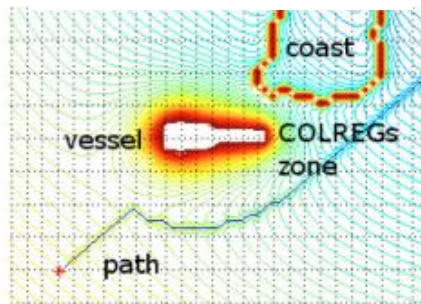
Η μέθοδος Artificial Potential Field (APF) (Σχήμα 4) βασίζεται στη κλασική θεωρία της μηχανικής, δημιουργώντας μια σχέση μεταξύ του κινητού και του αθροίσματος των δυνάμεων που εφαρμόζονται σε αυτό. Ειδικότερα, ένα φορτισμένο σωματίδιο που κινείται σε ένα δυναμικό πεδίο και η τροχιά του διαμορφώνεται ανάλογα με τη ελκτική δύναμη που του ασκείται από τον αντίθετα φορτισμένο στόχο, ταυτόχρονα με την απωστική που του ασκείται από τα όμοια φορτισμένα εμπόδια και τα όρια κίνησης (Εικόνα 3) (Naeem et al., 2016). Η μέθοδος φαίνεται να υστερεί σε πραγματικές καταστάσεις καθώς και να έχει χαμηλή απόδοση σε στενά περάσματα και δυναμικά περιβάλλοντα, ενώ φαίνεται να κολλάει σε τοπικά ελάχιστα αποτυγχάνοντας να βρίσκει πάντα τη βέλτιστη πορεία.

```

1: read start and goal coordinates
2: read  $K_{att}$  and  $K_{repul}$  ▶ Attractive and repulsive gains
3: try
4: read  $L$  and  $K_{obs}$  ▶ Array of any known obstacles and
  their corresponding gain constant
5: catch error
6: display 'No stationary obstacles exist'
7: set identifier for set case no obstacles
8: end
9: initialise occupancy grid of all geographical map features
10: determine boundary nodes ▶ e.g. coastline
11: set occupancy = 1 for boundary nodes
12: procedure Create Artificial Potential Field
13:   ▶ Decision Maker determines COLREGs rule and
  inserts virtual objects
14:   call Encounter
15:   for all nodes do
16:     Calculate distance from node to goal
17:     Calculate distances to each geographical boundary
  node
18:   end for
19:   for all nodes do
20:     if case no obstacles then
21:       Calculate potential field value
22:     else
23:       Calculate distance to any stationary obstacle
24:       Calculate potential field value
25:     end if
26:   end for
27:   for all nodes do
28:     set limit on potential field magnitude
29:   end for
30:   initialise starting node and set to current
31:   SEEK
32:   get global path from start to goal by steepest descent of
  gradient
33: end procedure
34: procedure SEEK
35:   while current node  $\neq$  goal node do
36:     if elapsed time > set limit then
37:       exit
38:       display 'No solution found to goal'
39:     else
40:       get neighbouring node with least potential
  value
41:       add node coordinates to path
42:     end if
43:   end while
44: end procedure

```

Σχήμα 4: Ψευδοκώδικας της μεθόδου APF (Naeem et al., 2016)

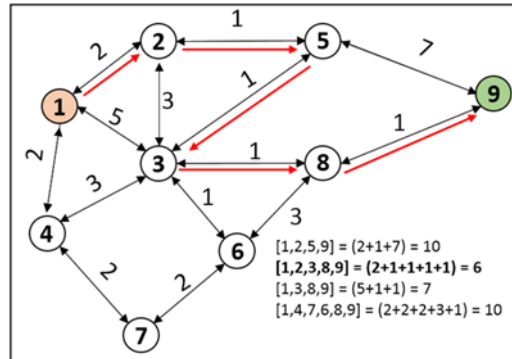


Εικόνα 3: Χάρτης ελκτικής και απωστικής δύναμης APF (Naeem et al., 2016)

Η μέθοδος Model Predictive Control (MPC) δημιουργεί τροχιές του πλοίου μέσω ενός γραμμικού μαθηματικού μοντέλου (Naukowe et al., 2014). Σε πρόσφατη μοντελοποίηση της μεθόδου στο τομέα των αυτοκινήτων, ο σκοπός της ήταν να παρακολουθεί την προγραμματισμένη τροχιά και να αποφεύγει τη σύγκρουση σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, διατηρώντας την πορεία του αυτόνομου αυτοκινήτου όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην αρχική τροχιά, ρυθμίζοντας ταυτόχρονα τη θέση και τη ταχύτητα του, σε συνδυασμό με τη μέθοδο του APF που προαναφέρθηκε (Jie et al., 2016).

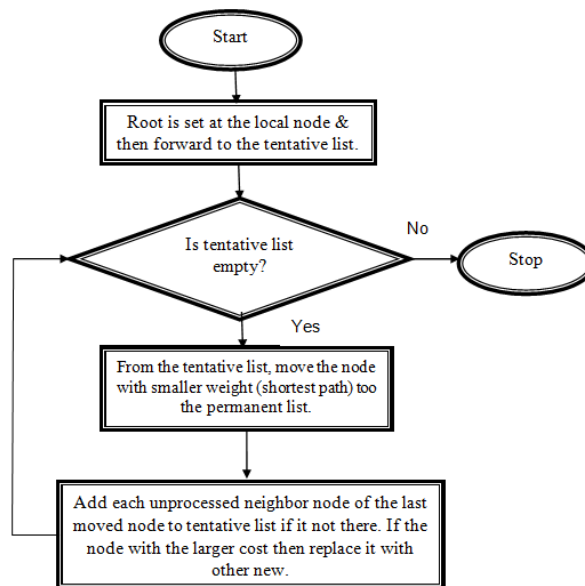
Ευρετικοί/Στοχαστικοί Αλγόριθμοι

Με τη σειρά τους οι ευρετικοί αλγόριθμοι (Mac et al., 2018) υπολογίζουν πορείες ικανές να φέρουν εις πέρας τον στόχο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι είναι και οι βέλτιστες, χρησιμοποιώντας μια τυχαία λύση ως αρχική και επεξεργάζοντάς την μετέπειτα.



Εικόνα 4: Απεικόνιση του αλγόριθμου Dijkstra (Rehman, 2019)

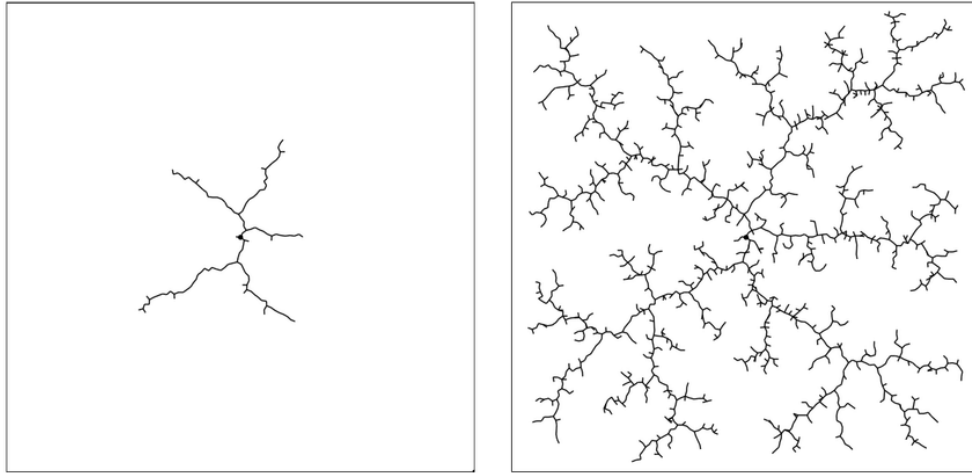
Το 1959, ο E. W. Dijkstra πρότεινε τον αλγόριθμο *Dijkstra*, έναν κλασικό αλγόριθμο, για εύρεση μιας σύντομης διαδρομής. Ο αλγόριθμος είναι ικανός να βρει τις ελάχιστες αποστάσεις υπολογίζοντας τις τοπικές αποστάσεις μεταξύ κόμβων. Η ελάχιστη απόσταση μπορεί να έχει πολλαπλού νοήματος φύση, όπως αυτή του χρόνου και του κόστους. Ο αλγόριθμος είναι απλός και εύκολος στην υλοποίηση του και έχει χρησιμοποιηθεί στο τομέα της βελτιστοποίησης δικτύων, στα logistics, στις μεταφορές, και στην ηλεκτρονική (Zhang et al., 2014). Γενικά, θεωρείται αργός αλγόριθμος, διότι πρέπει να ενώσει όλους τους κόμβους και να υπολογίσει τις αποστάσεις των κόμβων (Εικόνα 4; Σχήμα 5) (Rehman et al., 2019).



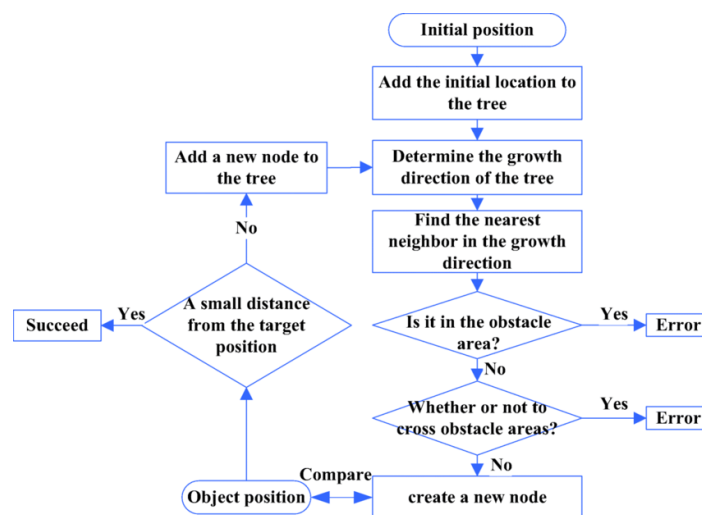
Σχήμα 5: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Dijkstra (Chib et al., 2016)

Η εξερεύνηση τυχαίων δέντρων (RRT) (Εικόνα 5) φτιάχνει ένα δέντρο “ριζωμένο” σε έναν κόμβο εκκίνησης (LaValle et al., 1998; Kuffner et al., 2000). Τα RRT (Rapidly exploring Random Trees) έχουν σχεδιαστεί για να εξερευνούν αποτελεσματικά μονοπάτια σε ένα δισδιάστατο

χώρο. Ένα RRT επιλέγει πρώτα ένα σημείο στόχου και μετά προσπαθεί να προσθέσει ένα άκρο από τον πλησιέστερο κόμβο του δέντρου εκκίνησης στο δέντρο προς το σημείο στόχου (Σχήμα 6). Χρησιμοποιούνται συχνά για προγραμματισμό κίνησης ρομπότ, ειδικά για προβλήματα μεγάλων διαστάσεων με εμπόδια. Η παραλλαγή RRT* παρουσιάστηκε από τους S. Karaman και E. Frazzoli (Karaman et al., 2011).



Εικόνα 5: Απεικόνιση εξερεύνησης τυχαίου δέντρου



Σχήμα 6: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου RRT (Xia et al., 2020)

Με τη σειρά του, ο αλγόριθμος A* προτάθηκε από τους Hart, Nilsson και Raphael το 1967 (Hart et al., 1967) και χρησιμοποιείται ευρέως σε προβλήματα που σχετίζονται με την εύρεση μονοπατιών. Ο αλγόριθμος είναι ικανός να βρει μια ορθότερη πορεία από τον αλγόριθμο *Dijkstra* λόγω συνυπολογισμού της απόστασης του αρχικού σημείου από το σημείο στόχου. Ως αποτέλεσμα, το πρόβλημα γίνεται ακόμα μεγαλύτερο σε χάρτη που αλλάζει διαρκώς (Sabri et al., 2018). Η διαδικασία γίνεται με τη χρήση της συνάρτησης εκτίμησης κόστους.

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

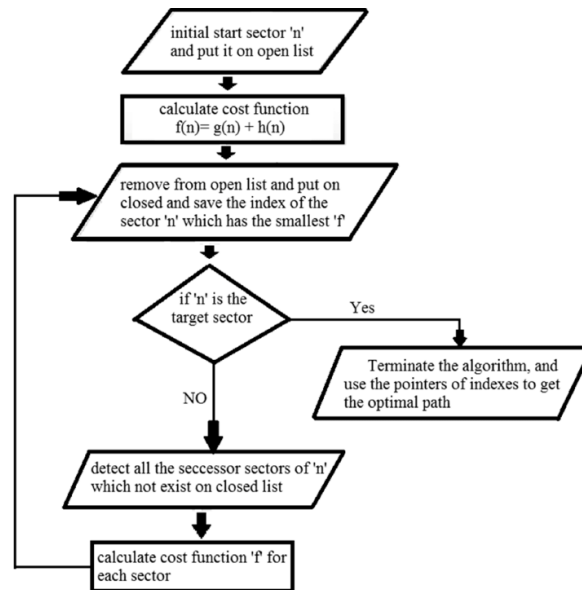
Όπου:

n, οι κόμβοι του συστήματος

$g(n)$, το κόστος διαδρομής από το σημείο αρχής μέχρι το κόμβο n

$h(n)$ το κόστος διαδρομής από τον παρών κόμβο μέχρι το σημείο στόχου.

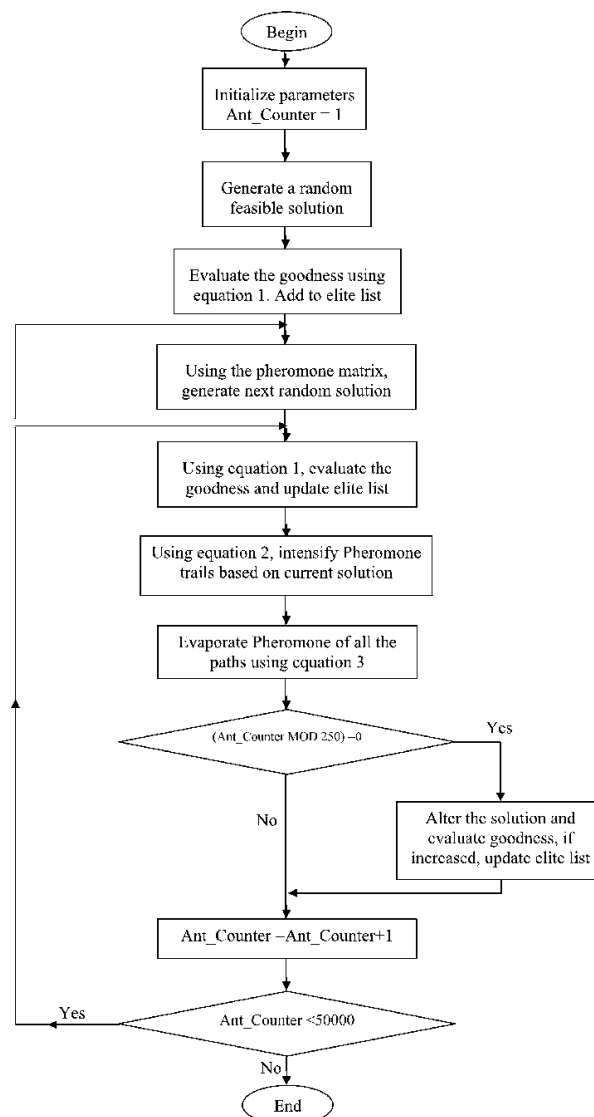
Ο αλγόριθμος λειτουργεί δημιουργώντας δύο λίστες, όπου, στη μία αποθηκεύονται τα σημεία που μπορεί να γίνει μετάβαση στο επόμενο βήμα ενώ στην άλλη τα σημεία όπου έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί (Σχήμα 7). Λόγω αυτού, ο αλγόριθμος A^* είναι γρηγορότερος από τον αλγόριθμο Dijkstra, καθώς ο Dijkstra συμπεριλαμβάνει στους υπολογισμούς του σημεία που έχει γίνει ήδη μετάβαση. Ως μειονέκτημα αυτών των αλγορίθμων είναι η μνήμη που χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί και ο ρυθμός που αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του χάρτη (Mocholi et al., 2010).



Σχήμα 7: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου A^* (Zidane, 2018)

Μια ακόμη μεγάλη κατηγορία ευρετικών αλγορίθμων έχει εμπνευσθεί από τον βιολογικό κόσμο. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (ACO), είναι ένας μετα-ευρετικός αλγόριθμος (Dorigo et al., 2006) και εστιάζει στη συμπεριφορά που ακολουθούν τα μυρμηγκία στον πραγματικό κόσμο, δημιουργώντας διόδους για την εύρεση τροφής. Θεωρείται ως ένα από τα πιο επιτυχημένα παραδείγματα ευφυών συστημάτων σμήνους και έχει εφαρμοστεί για την επίλυση πολλών διαφορετικών τύπων προβλημάτων, όπως η βελτιστοποίηση μη γραμμικών συστημάτων και η δρομολόγηση δικτύου στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Ο όρος μετα-ευρετικός προκύπτει λόγω του συνδυασμού επίλυσης στατικών και δυναμικών προβλημάτων. Σε πρώτο πλαίσιο τα προβλήματα που μπορούσε να λύσει ο αλγόριθμος ACO είχαν σταθερές τιμές κόστους και δεν άλλαζαν όσο λυνόταν το πρόβλημα. Κλασικό παράδειγμα τέτοιες εφαρμογές είναι το TSP, όπου οι τοποθεσίες των πόλεων τους και οι αποστάσεις μεταξύ των πόλεων δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αντίθετα, στα δυναμικά προβλήματα το κόστος αλλάζει. Έτσι, ο μετα-ευρετικός αλγόριθμος, καταγράφει αυτές τις διαφορές και παράγει αποτελέσματα βάσει και των δύο. Σε αυτή τη τεχνική, ένας αριθμός μυρμηγκιών φεύγει από τη φωλιά κινούμενο σε τυχαίες κατευθύνσεις και η αποφυγή εμποδίων γίνεται τυχαία. Στο τέλος, όταν βρεθεί η διαδρομή αυτή μαρκάρεται με φερομόνες, ώστε να την εντοπίσουν και τα υπόλοιπα μυρμηγκία (Σχήμα 8).

Ακόμη, πολύ σημαντικοί αλγόριθμοι, όχι μόνο για την χάραξη τροχιών αλλά κυρίως για την αποφυγή σύγκρουσης είναι οι αλγόριθμοι Velocity Obstacle (VO) (Shaobo et al., 2020; Fiorini et al., 1998). Οι αλγόριθμοι VO έχουν εφαρμοσθεί στο παρελθόν με σκοπό την αποφυγή σύγκρουσης σε τροχοφόρα ρομπότ (Wilkie et al., 2019), σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (Jenie et al., 2015), σε μη επανδρωμένα οχήματα επιπέδου (Kuwata et al., 2014) και σε προβλήματα ν-πιθανών συγκρούσεων (Van den Berg et al., 2011). Στο τομέα της ναυτιλίας γραμμικοί VO έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή σύγκρουσης στη θάλασσα (Huang et al., 2016; Kuwata et al., 2014; van Westrener and Ellerbroek, 2017). Ουσιαστικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει χώρους πιθανής σύγκρουσης μέσω των εφαπτομένων της ακτίνας του πλοίου και των ακτινών των λοιπών εμποδίων, που είναι ικανές να οδηγήσουν σε σύγκρουση κάποια στιγμή στο χρόνο. Έτσι, ως Velocity Obstacle, θεωρείται πρακτικά ένας κώνος σύγκρουσης που αν το ρομπότ μεταβεί σε αυτόν αυξάνεται η πιθανότητα της σύγκρουσης, ενώ αντίθετα αν συνεχίζει την πορεία εξωτερικά από τον χώρο αυτό, θα την αποφύγει (Fiorini et al., 1998).



Σχήμα 8: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ACO (Saeidi et al., 2022)

Οι αλγόριθμοι Particle Swarm Optimization (PSO) (Σχήμα 9), χρησιμοποιούν ομοίως την ιδέα του σμήνους, είτε αυτή μπορεί να παρομοιασθεί με ομάδες πουλιών, είτε με ομάδες ψαριών (Zeng et al., 2016). Τα συνολικά βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής (Zeng et al., 2016):

1. Ένας προκαθορισμένος αριθμός σωματιδίων δημιουργείται γύρω από την αρχική θέση του ρομπότ και εντός του εύρους ανίχνευσης του.
2. Κάθε σωματίδιο παίρνει νέα ταχύτητα και θέση με βάση τις συνεχώς ενημερωμένες εξισώσεις του PSO. Μία υποψήφια επόμενη θέση του ρομπότ καθορίζεται από τη θέση του καλύτερου σωματιδίου (δηλαδή αυτού που βρίσκεται πιο κοντά στον στόχο).
3. Εάν η τρέχουσα θέση του ρομπότ μπορεί να συνδεθεί απευθείας με το υποψήφιο καλύτερο σωματίδιο που λαμβάνεται στο Βήμα 2, τότε αυτό ορίζεται ως η επόμενη θέση του ρομπότ.
4. Εάν το υποψήφιο καλύτερο σωματίδιο βρίσκεται πέρα από ένα εμπόδιο (δηλαδή η γραμμή που συνδέει την καλύτερη θέση με τη θέση του ρομπότ με την τρέχουσα θέση τέμνει ένα εμπόδιο), σχηματίζεται ένας πιθανολογικός οδικός χάρτης και αναζητείται η συντομότερη διαδρομή. Ως αποτέλεσμα, η τρέχουσα θέση του ρομπότ συνδέεται έναν κόμβο που βρίσκεται πλησιέστερα στον στόχο μέσω του συντομότερου δρόμου.
5. Τα βήματα 2 έως 4 εκτελούνται έως ότου ο στόχος είναι εντός του εύρους ανίχνευσης του ρομπότ και μπορεί να προσεγγισθεί μέσω μιας ευθείας γραμμής.

```

Procedure Basic PSO
while maximum iterations or minimum error criteria is not attained do
  for each particle do
    Initialize particle
  end
  for each particle do
    Calculate the fitness value
    If the fitness value is better than the best fitness value in history (pbest)
      then Set current value as the new pbest
    end
  end
  for each particle do
    Find in the particle neighborhood the particle with the best fitness (gbest)
    Calculate particle velocity  $prvel^i_j$  according to the velocity equation (2)
    Apply the velocity constriction
    Update the particle position  $prtpos^i_j$  according to the position equation (1)
    Apply the position constriction
  end
end

```

Σχήμα 9: Ψευδοκώδικας του βασικού αλγορίθμου PSO (Zeng, 2016)

Οι Γενετικοί αλγόριθμοι (GA) είναι μια μεγάλη γκάμα αλγορίθμων βασισμένοι στη Θεωρία της Εξέλιξης κατά την οποία μόνο ο καταλληλότερος μπορεί να επιβιώσει (Σχήμα 10). Πρωτοεμφανιζόμενοι το 1960 από τον John Holland (Holland, 1960), οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι αλγόριθμοι που υιοθετούν τη θεωρία του Δαρβίνου, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία αρχικοποίησης, μια συνάρτηση κατάστασης και τις διαδικασίες φυσικής επιλογής, δηλαδή μετάλλαξης, διασταύρωσης και επιλογής (Mac et al., 2016; Chentoufi et al., 2017). Η διάκριση αυτή γίνεται μέσα από μια συνάρτηση που ελέγχει κατά πόσο η κάθε υποψήφια λύση βοηθά στην λύση του προβλήματος (Mane et al., 2019).

Algorithm 1 Pseudo-code of the standard genetic algorithm

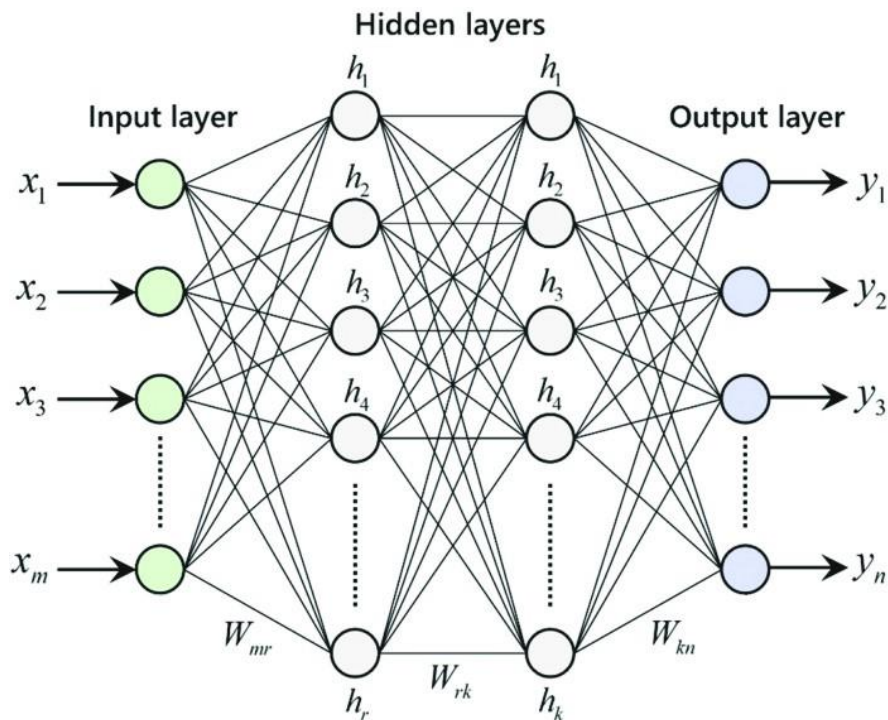
```

1: Input :  $N$  : Population size;  $P_c$  : Crossover rate;  $P_m$  : Mutation rate.
2: Output : Best Chromosome.
3:  $t \leftarrow 0$ 
4: Initialize arbitrarily the initial population  $P(t)$ 
5: while (not termination condition) do
6:   Evaluate  $P(t)$  using a fitness function
7:   Select  $P(t)$  from  $P(t-1)$ 
8:   Recombine  $P(t)$ 
9:   Mutate  $P(t)$ 
10:  Evaluate  $P(t)$ 
11:  Replace  $P(t-1)$  by  $P(t)$ 
12:   $t \leftarrow t + 1$ 
13: end

```

Σχήμα 10: Ψευδοκώδικας του βασικού Γενετικού αλγορίθμου (Lamini et al., 2018)

Τα Νευρωνικά Δίκτυα (ANN) θεωρείται ότι παίρνουν τις ρίζες τους από το νευρωνικό δίκτυο που βρίσκεται στον ανθρώπινο εγκέφαλο. Ο αλγόριθμος λειτουργεί σε ένα στάδιο που ονομάζεται κρυφό στάδιο (Hidden State). Αυτά τα κρυφά στάδια προσομοιάζουν καταστάσεις παρόμοιες με τους νευρώνες. Κάθε μια από αυτές τις καταστάσεις είναι παρωδική και έχει μια πιθανολογική συμπεριφορά για την πληροφορία που μεταφέρεται (Εικόνα 6). Αυτό το πλέγμα σταδίων λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ εισόδου και εξόδου της πληροφορίας (Bharadwaj et al., 2018).



Εικόνα 6: Απεικόνιση κόμβων νευρωνικών δικτύων και παραμέτρων βάρους (Caban et al., 2018)

Υβριδικοί Αλγόριθμοι

Τέλος, ερευνητές για να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα ορισμένων μεθόδων και ταυτόχρονα να περιορίσουν τα μειονεκτήματα άλλων, συνδύασαν δύο ή περισσότερες μεθόδους στις έρευνες τους, με σκοπό να παρέχουν μια αποτελεσματική μέθοδο υβριδικού σχεδιασμού διαδρομής για τον έλεγχο αυτόματων συστημάτων. Μερικές από αυτές τις προσεγγίσεις χρησιμοποιούν «fuzzy logic» σε συνδυασμό με «Φίλτρο Κάλμαν», APF σε συνδυασμό με GA και APF σε συνδυασμό με PSO (Park et al., 2016; Purcaru et al. 2013; Cherubini et al., 2010).

Σχολιασμός μεθόδων

Σε έναν σύντομο σχολιασμό των πιο σημαντικών μεθόδων, οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε κανόνες είναι απλοί και εύχρηστοι. Ωστόσο, αυτές οι αλγόριθμοι δεν μπορούν να απαριθμήσουν όλα τα σενάρια, ειδικά όταν υπάρχουν πολλά εμπόδια. Για παράδειγμα, η πλοήγηση με κανόνες καλύπτει μόνο τις υποχρεώσεις των πλοίων σε σενάριο δύο πλοίων, ενώ το πλοίο μπορεί να συναντήσει περισσότερα από δύο πλοία και περισσότερα σε σύνθετες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι υβριδικές μέθοδοι που περιέχουν APF και LCM (Naeem et al., 2016; Ko et al., 2003), συνήθως αγνοούν τη δυναμική του πλοίου κατά τον προγραμματισμό κίνησης. Η μέθοδος APF μπορεί να παγιδευτεί σε ένα τοπικό ελάχιστο, το οποίο αναφέρεται σε πολλές μελέτες. Η μέθοδος LCM εξετάζει μόνο ένα εμπόδιο ή μία ομάδα εμποδίων κάθε φορά, και τα εμπόδια πρέπει να είναι στάσιμα ή να έχουν σχετικά χαμηλά επίπεδα ταχύτητας. Ωστόσο, οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι αυτή η μέθοδος αποδίδει καλά με στάσιμα εμπόδια (Mahini et al., 2013). Και οι δύο αλγόριθμοι, APF και LCM δίνουν μόνο μία λύση στο πλοίο, ενώ αυτή η λύση μπορεί να μην είναι η βέλτιστη.

Ο αλγόριθμος VO και οι παραλλαγές του μπορούν να απεικονίσουν και να παρουσιάσουν τις πιθανές λύσεις στους χρήστες, οι οποίες μπορούν να τους βοηθήσουν να κατανοήσουν την επιλογή της βέλτιστης λύσης. Επιπλέον, η λύση που παρουσιάζει ο αλγόριθμος δομείται βάσει της γνώσης του χάρτη και των στατικών εμποδίων.

2.2 COLREGs

Οι COLREGs, γνωστοί και ως "Κανόνες του Δρόμου" (Rules of the Road) αποτελούνται από 41 κανόνες χωρισμένους σε 6 μέρη (IMO, 1972). Στην παρούσα εργασία, θα μας απασχολήσουν τα μέρη A, B.

ΜΕΡΟΣ Α-Γενικοί Κανόνες(1-3)

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

ΜΕΡΟΣ Β – Κανόνες χειρισμού πλεύσης (4-19)

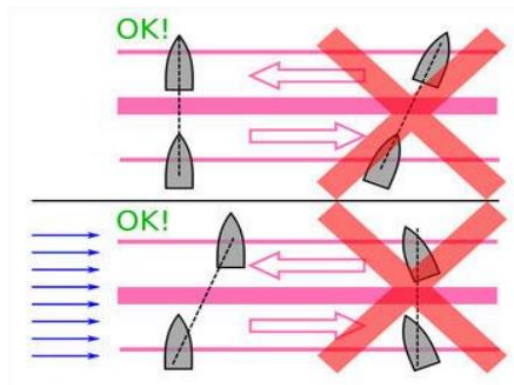
Το δεύτερο μέρος χωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα. Το πρώτο τμήμα (Section 1) περιλαμβάνει τους κανόνες 4 έως 10 και σχετίζεται με τη συμπεριφορά των πλοίων σε οποιαδήποτε κατάσταση ορατότητας. Καλύπτονται ζητήματα όπως η πρόβλεψη οπτική και ακουστική επιτήρηση (Look-out), ο καθορισμός της ασφαλούς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

Ο Κανόνας 10, σχετίζεται με τα Συστήματα Διαχωρισμού Κυκλοφορίας (Εικόνα 7) ή χάριν συντόμευσης TSS (Traffic Separation Schemes) και τη συμπεριφορά των πλοίων κοντά σε αυτά. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη κυκλοφοριακών λωρίδων. Τα πλοία εντός αυτών πλέουν σύμφωνα με την γενική κατεύθυνση της κάθε μίας (Wu et al.2020).



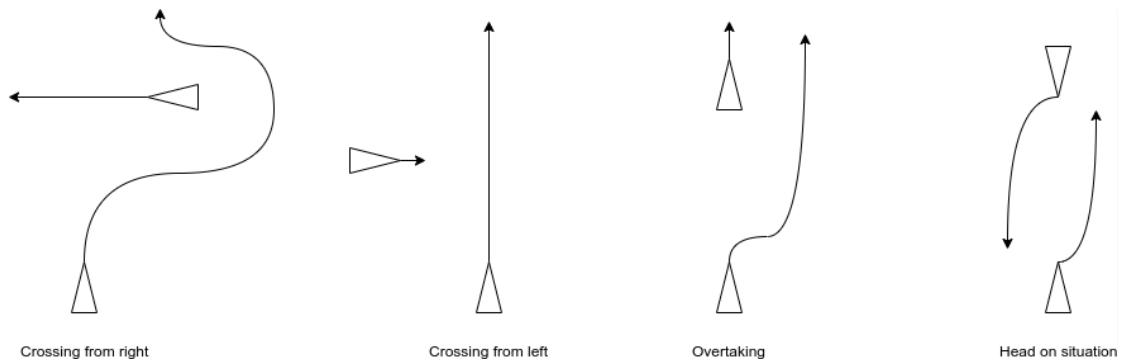
Εικόνα 7: Σύστημα Διαχωρισμού της Κυκλοφορίας (Traffic Separation Scheme) στο Στενό της Μεσσήνης στην Ιταλία (Cucinotta et al., 2017)

Ο Κανόνας 10 ορίζει ότι τα πλοία τα οποία διασχίζουν τις λωρίδες κυκλοφορίας (Εικόνα 8), θα πρέπει να το κάνουν “όσο το δυνατόν περισσότερο υπό ορθή γωνία σε σχέση με τη γενική κατεύθυνση της ροής της κυκλοφορίας”.



Εικόνα 8: Σωστός και λανθασμένος τρόπος διέλευσης μέσα από μία κυκλοφοριακή λωρίδα σύμφωνα με τους CORLEGS (Serrat, 2012)

Το δεύτερο κομμάτι (Section 2) που μας απασχολεί και ως επί τω πλείστων περιλαμβάνει τους Κανόνες 11 έως 18 και σχετίζεται με τη συμπεριφορά των πλοίων όταν το ένα μπορεί να γίνει οπτικά αντιληπτό από το άλλο, δηλαδή με τις καταστάσεις συναντήσεων (Encounter Situations). Σε αυτό καθορίζονται οι ελιγμοί που πρέπει να λάβουν χώρα από τα εμπλεκόμενα σκάφη για την αποφυγή της σύγκρουσης σε κάθε ένα από τα τρία είδη συναντήσεων (Head-on – μετωπική, Crossing – διασταυρούμενη και Overtaking – προσπέραση) (Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Απαιτούμενοι ελιγμοί αποφυγής σύγκρουσης σε κάθε περίπτωση συνάντησης κατά COLREGs (Kufsoalor et al., 2019).

Παραδείγματος χάρη, στον Κανόνα 14 αναφέρεται ότι στην περίπτωση επικίνδυνης μετωπικής συνάντησης μηχανοκίνητων σκαφών, κάθε ένα πρέπει να μεταβάλει την πορεία του προς τα δεξιά (Starboard) ώστε να περάσει από την αριστερή πλευρά του άλλου (Port side). Τέλος το τρίτο κομμάτι (Section 3), περιλαμβάνει τον Κανόνα 19 και σχετίζεται με τη συμπεριφορά των πλοίων σε συνθήκες περιορισμένης ορατότητας.

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

2.3 Ship Domain

Σημαντική παράμετρος στην εφαρμογή είναι ο υπολογισμός του Ship Domain. Ο ορισμός του Ship Domain περιγράφηκε νωρίς από τη δεκαετία του 1970 (Goodwin, 1975) και εντάχθηκε ως ένα τα πιο ελκυστικά πεδία που έχουν αποδειχθεί από πολυάριθμες έρευνες τα τελευταία 50 χρόνια. Τα πλεονεκτήματα του Ship Domain περιλαμβάνουν τον γρήγορο εντοπισμό και την αξιολόγηση της κατάστασης ναυσιπλοΐας. Διαδραματίζει βασικό ρόλο στην αξιολόγηση του ρίσκου σύγκρουσης και στη λήψη της απόφασης του ελιγμού. Οι προηγούμενες μελέτες έχουν χωριστεί σε τρεις ομάδες μεθόδων:

- Στατιστικές μέθοδοι
- Αναλυτικές μέθοδοι
- Μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης

Σε πρώτο πλαίσιο οι στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούν ως δεδομένα χαρακτηριστικά της θέσης και της τροχιάς του πλοίου, με σκοπό να ορίσουν την περιοχή γύρω από το πλοίο όπου ξένα αντικείμενα πρέπει να διατηρούνται απέξω. Σε μια μελέτη, μετά από στατιστική ανάλυση δεδομένων ο Goodwin (1975), παρουσίασε το μοντέλο του, όπου όρισε ως Ship Domain ένα πολύγωνο με ακτίνες D_f , D_p , D_a , για την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας.

$$D_f = 0.85 NM$$

$$D_p = 0.7 NM$$

$$D_a = 0.45 NM$$

Σε επόμενη μελέτη ο Coldwell (1983) όρισε ένα νέο μοντέλο με διαχωρισμό στον υπολογισμό σχετικά με την κατάσταση της προσέγγισης. Το μοντέλο αυτό συμπεριλαμβάνει επίσης ως μεταβλητή και το μήκος του πλοίου (L). Αν η κατάσταση προσέγγισης είναι μετωπική τότε δημιουργείται πάλι ένα πολύγωνο με ακτίνες

$$D_f = 6.1 * L$$

$$D_p = 1.75 * L$$

$$D_s = 3.25 * L$$

Ενώ για την κατάσταση προσέγγισης οι ακτίνες ορίζονται ως:

$$D_f = 6.0 * L$$

$$D_p = D_a = 1.75 * L$$

Οι αναλυτικές μέθοδοι, χρησιμοποιούν ποικιλία μεταβλητών για να περιγράψουν τον υπολογισμό δημιουργίας του χώρου. Πιο συγκεκριμένα, σημαντικές παράμετροι είναι η ταχύτητα, η σχετική ταχύτητα και οι γεωμετρικές διαστάσεις. Ωστόσο, στις μελέτες αυτές (Smierzchalski et al., 1999) παρά τον μεγάλο αριθμό των παραμέτρων δεν συνυπολογίζεται το ανθρώπινο λάθος.

Τέλος, η μέθοδος της τεχνητής νοημοσύνης (AI) προσφέρει περισσότερα οφέλη από άλλες στην αντιπροσώπευση της γνώσης του πλοηγού καθώς πηγάζει από την προσομοίωση εξειδικευμένης γνώσης. Ουσιαστικά εργαλεία που αναφέρονται είναι η ασαφής λογική (fuzzy-logic) και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Η πρώτη εφαρμογή της ασαφούς λογικής στον προσδιορισμό του τομέα του πλοίου, είναι η μελέτη του James (1986) ακολουθούμενη από τους Zhao et al. (1993) και Kao et al. (2007). Η μέθοδος έχει δυνατότητες στον καθορισμό του τομέα του πλοίου λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Kijima (2003) για τα πλοία που προσεγγίζονται από την αριστερή πλευρά, το αρχικό DCPA είναι 1,5 ναυτικά μίλια, το 98% των πλοίων δεν προβαίνει σε αποφυγή σύγκρουσης. Για πλοία που έρχονται στη δεξιά πλευρά ή τη πλήρη, όταν το αρχικό DCPA είναι 1,5 ναυτικά μίλια, το 94,3% των πλοίων πάλι, δεν μεταβαίνει σε ενέργεια διαφυγής. Για πλοία που προσεγγίζονται από τη πρύμνη, όταν το αρχικό DCPA είναι 0,9 ναυτικά μίλια, το 100% των πλοίων δεν λαμβάνουν μέτρα αποφυγής.

Κεφάλαιο 3

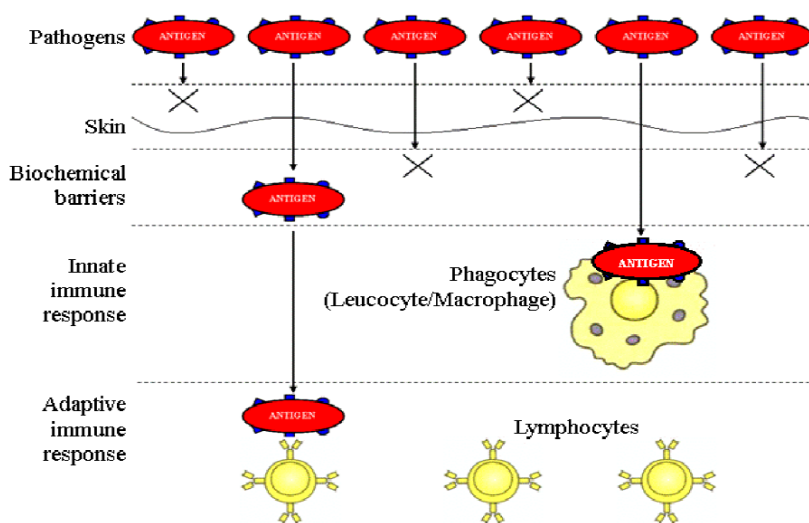
3.1 Βιολογικό ανοσοποιητικό σύστημα

Το παρών κεφάλαιο αναφέρεται στη θεωρία του ανοσοποιητικού συστήματος (βιολογικού και τεχνητού) και αναλύει τις διάφορες υπολογιστικές πτυχές του.

Το Βιολογικό Ανοσοποιητικό Σύστημα είναι ένα σύνθετο δίκτυο εξειδικευμένων ιστών, οργάνων και κυττάρων. Η κύρια λειτουργία του είναι να αναγνωρίζει την παρουσία ξένων στοιχείων στο σώμα και να ανταποκρίνεται προκειμένου να εξαλείψει ή να εξουδετερώσει τους ξένους εισβολείς (Kuby et al., 1997).

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί εκτίθενται σε πολλούς διαφορετικούς μικροοργανισμούς και ιούς που προκαλούν ασθένειες. Αυτοί οι μικροοργανισμοί ονομάζονται παθογόνα. Γενικά, οι οργανισμοί προσπαθούν να προστατευθούν από τα παθογόνα χρησιμοποιώντας διαφορετικούς μηχανισμούς, όπως η υψηλή θερμοκρασία, το χαμηλό pH και οι χημικές ουσίες που απωθούν ή σκοτώνουν τους εισβολείς. Πιο προηγμένοι οργανισμοί (σπονδυλωτά) έχουν αναπτύξει έναν αποτελεσματικό αμυντικό μηχανισμό που ονομάζεται ανοσοποιητικό σύστημα (Janeway et al., 1993). Οι ουσίες που μπορούν να διεγείρουν συγκεκριμένες αποκρίσεις του ανοσοποιητικού συστήματος αναφέρονται συνήθως ως αντιγόνα (τα παθογόνα συνήθως δρουν ως αντιγόνα). Όταν το ανοσοποιητικό σύστημα διεγείρεται, δημιουργεί έναν αριθμό αντισωμάτων που ανταποκρίνεται στα ξένα αντιγόνα. Για να είναι αποτελεσματικό το ανοσοποιητικό σύστημα θα πρέπει να μπορεί να διακρίνει τον «εαυτό» (κύτταρα, πρωτεΐνες, μόρια που ανήκουν ή παράγονται στο σώμα) από τον «μη εαυτό» (αντιγόνα). Η διάκριση «εαυτού/μη εαυτού» είναι απαραίτητο χαρακτηριστικό του ανοσοποιητικού συστήματος, καθώς η έκβαση μιας ακατάλληλης απόκρισης στα μόρια του εαυτού είναι θανατηφόρα.

Το ανοσοποιητικό σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα πολυστρωματικό σύστημα με αμυντικούς μηχανισμούς σε πολλά επίπεδα (Hofmeyr et al., 2000). Τα τρία κύρια στρώματα περιλαμβάνουν το ανατομικό φράγμα, την έμφυτη ανοσία και την προσαρμοστική ανοσία (Εικόνα 10).



Εικόνα 10: Πολλαπλά στρώματα του ανοσοποιητικού συστήματος (Malim et al., 2011)

Ανατομικό Φράγμα

Το πρώτο στρώμα αφορά το ανατομικό φράγμα, που αποτελείται από το δέρμα και την επιφάνεια των βλεννογόνων. Το δέρμα εμποδίζει τη διείσδυση των περισσότερων παθογόνων μικροοργανισμών και αναστέλλει την ανάπτυξη των περισσότερων βακτηρίων λόγω του χαμηλού pH του. Από την άλλη πλευρά, πολλά παθογόνα εισέρχονται στο σώμα κολλώντας ή διεισδύοντας μέσω των βλεννώδων μεμβρανών. Αυτές οι μεμβράνες παρέχουν έναν αριθμό μη ειδικών μηχανισμών που βοηθούν στην αποτροπή μιας τέτοιας εισόδου. Το σάλιο, τα δάκρυα και ορισμένες βλενώδεις εκκρίσεις δρουν για να απομακρύνουν πιθανούς εισβολείς και επίσης περιέχουν αντιβακτηριακές και αντιϊκές ουσίες (Kuby et al., 1997).

Έμφυτη ανοσία

Η έμφυτη ανοσία είναι ο τύπος της ανοσίας που μεταφέρεται από τη μητέρα στο μωρό όταν γεννιέται ένα άτομο. Έχει μη συγκεκριμένη ανταπόκριση προς τις ξένες οντότητες και αποτελείται κυρίως από τους ακόλουθους μηχανισμούς:

Φυσιολογικοί φραγμοί: Αυτό περιλαμβάνει μηχανισμούς όπως η θερμοκρασία, το pH, η τάση οξυγόνου και διάφορες διαλυτές χημικές ουσίες. Σκοπός αυτών των μηχανισμών είναι να παρέχουν επιζήμιες συνθήκες διαβίωσης στα ξένα παθογόνα. Για παράδειγμα, η χαμηλή οξύτητα του γαστρικού συστήματος λειτουργεί ως φραγμός στη μόλυνση από μικροοργανισμούς που καταπίνονται, καθώς δεν μπορούν να επιβιώσουν στο χαμηλό pH του στομάχου.

Φαγοκυτταρικοί φραγμοί: Ορισμένα εξειδικευμένα κύτταρα, όπως τα μακροφάγα, τα ουδετερόφιλα και τα NK-κύτταρα (natural killer cells), είναι σε θέση να απορροφήσουν συγκεκριμένο υλικό, συμπεριλαμβανομένων ολόκληρων παθογόνων μικροοργανισμών. Αυτή η κατάποση έχει δύο σκοπούς. Σε πρώτη φάση να σκοτώσει το αντιγόνο και σε δεύτερη να παρουσιάσει θραύσματα των πρωτεϊνών του εισβολέα σε άλλα κύτταρα και μόρια του ανοσοποιητικού.

Φλεγμονώδης απόκριση: Τα ενεργοποιημένα μακροφάγα παράγουν πρωτεΐνες που ονομάζονται κυτοκίνες. Λειτουργούν ως ορμονοειδείς αγγελιοφόροι που περιλαμβάνουν τη φλεγμονώδη απόκριση, η οποία χαρακτηρίζεται από αγγειοδιαστολή και αύξηση της διαπερατότητας των τριχοειδών. Αυτές οι αλλαγές επιτρέπουν τη στρατολόγηση μεγάλου αριθμού κυκλοφορούντων ανοσοκυττάρων στο σημείο της μόλυνσης. Οι κυτοκίνες παράγονται επίσης από άλλα κύτταρα και μη του ανοσοποιητικού, για παράδειγμα αυτά που εκκρίνουν κυτοκίνες όταν υποστούν βλάβη (Baumann et al., 1994).

Προσαρμοστική ανοσία

Η προσαρμοστική ανοσία που ονομάζεται επίσης επίκτητη ή ειδική ανοσία, αντιπροσωπεύει το τμήμα του ανοσοποιητικού συστήματος που είναι σε θέση να αναγνωρίσει και να εξαλείψει επιλεκτικά ξένους μικροοργανισμούς και μόρια. (Roitt et al., 1997).

Τα κύρια χαρακτηριστικά της προσαρμοστικής ανοσίας είναι τα ακόλουθα (Dasgupta et al., 1999):

Αντιγονική ειδικότητα: Επιτρέπει στο ανοσοποιητικό σύστημα να διακρίνει ανεπαίσθητες διαφορές μεταξύ των αντιγόνων και να τα αντιμετωπίσει.

Ποικιλομορφία: Το προσαρμοστικό ανοσοποιητικό σύστημα μπορεί να δημιουργήσει δισεκατομμύρια διαφορετικά μόρια αναγνώρισης που είναι σε θέση να αναγνωρίζουν μοναδικά διαφορετικές δομές ξένων αντιγόνων.

Ανοσολογική μνήμη: Το προσαρμοστικό ανοσοποιητικό σύστημα μπορεί να θυμηθεί μια προηγούμενη αλληλεπίδραση με ένα αντιγόνο. Αυτό βοηθά στην παροχή γρήγορης απάντησης σε επόμενες προσεγγίσεις.

Αναγνώριση εαυτού/μη εαυτού: Τα κύτταρα του ανοσοποιητικού μπορούν να διακρίνουν τα δικά τους κύτταρα από τα ξένα και έτσι ανταποκρίνονται μόνο στα μόρια που δεν αφορούν τον εαυτό τους.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η επίκτητη ανοσία δεν δρα ανεξάρτητα από την έμφυτη ανοσία. Αντίθετα, συνεργάζονται για την εξάλειψη των ξένων εισβολέων. Για παράδειγμα, τα φαγοκύτταρα (έμφυτη ανοσία) εμπλέκονται στην ενεργοποίηση της προσαρμοστικής ανταπόκρισης.

Επίσης, ορισμένοι διαλυτοί παράγοντες, που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης ανοσοαπόκρισης, είναι γνωστό ότι αυξάνουν τη δραστηριότητα αυτών των φαγοκυτταρικών κυττάρων (Kuby et al., 1997).

Ένα σημαντικό μέρος του προσαρμοστικού ανοσοποιητικού συστήματος διαχειρίζεται τα λευκά αιμοσφαίρια, που ονομάζονται λεμφοκύτταρα. Αυτά τα κύτταρα παράγονται στο μυελό των οστών, κυκλοφορούν στο αίμα και το λεμφικό σύστημα και βρίσκονται σε διάφορα λεμφοειδή όργανα για να εκτελούν ανοσολογικές λειτουργίες.

B-κύτταρα και T-κύτταρα: Αντιπροσωπεύουν τον κύριο πληθυσμό των λεμφοκυττάρων. Τα κύτταρα παράγονται από τον μυελό των οστών και είναι αρχικά αδρανή, δηλαδή δεν είναι ικανά να εκτελέσουν τις λειτουργίες τους. Για να γίνουν άνοσο-συστατικά, πρέπει να περάσουν από μια διαδικασία ωρίμανσης. Στην περίπτωση των B-κυττάρων, η διαδικασία ωρίμανσης συμβαίνει στον ίδιο τον μυελό των οστών. Για τα T-κύτταρα, πρέπει να μεταναστεύσουν πρώτα στον θύμο αδένα όπου ωριμάζουν. Γενικά, ένα ώριμο λεμφοκύτταρο μπορεί να θεωρηθεί ως ανιχνευτής που μπορεί να ανιχνεύσει συγκεκριμένα αντιγόνα. Υπάρχουν δισεκατομμύρια από αυτούς τους ανιχνευτές που κυκλοφορούν στο σώμα, αποτελώντας ένα αποτελεσματικό, κατανεμημένο σύστημα ανίχνευσης και απόκρισης ανωμαλιών (de Castro et al., 2002).

Χυμική ανοσία: Τα ώριμα B-κύτταρα εκφράζουν μοναδικούς υποδοχείς δέσμευσης αντιγόνου (ABR) στην επιφάνειά τους. Η αλληλεπίδραση του ABR με συγκεκριμένο αντιγόνο επάγει τον πολλαπλασιασμό και τη διαφοροποίηση των B-κυττάρων σε πλασματοκύτταρα που εκκρίνουν αντισώματα. Ένα αντίσωμα είναι ένα μόριο που συνδέεται με τα αντιγόνα και τα εξουδετερώνει ή διευκολύνει την εξάλειψή τους. Το αντιγόνο που είναι επικαλυμμένο με αντισώματα μπορεί να εξαλειφθεί με πολλούς τρόπους: από φαγοκύτταρά, από το σύστημα συμπληρώματος ή εμποδίζοντάς τα να εκτελέσουν οποιαδήποτε επιβλαβή λειτουργία (π.χ. δέσμευση υικών σωματιδίων στα κύτταρα ξενιστές) (Dasgupta et al., 1999).

Κυτταρική ανοσία: Κατά την ωρίμανσή τους, τα T-κύτταρα εκφράζουν ένα μοναδικό ABR στην επιφάνειά τους που ονομάζεται υποδοχέας T-κυττάρων. Σε αντίθεση με το ABR των B-κυττάρων που μπορεί να αναγνωρίσει μόνο αντιγόνα, οι υποδοχείς T-κυττάρων μπορούν να αναγνωρίσουν μόνο αντιγονικά πεπτιδία που παρουσιάζονται από πρωτεΐνες κυτταρικής μεμβράνης γνωστές ως μόρια μείζονος συμπλέγματος ιστοσυμβατότητας (MHC). Όταν ένα T-κύτταρο συναντά αντιγόνα που σχετίζονται με ένα μόριο MHC σε ένα κύτταρο, το T-κύτταρο πολλαπλασιάζεται και διαφοροποιείται σε T-κύτταρα μνήμης και σε διάφορα T-κύτταρα-τελεστές. Η κυτταρική ανοσία επιτυγχάνεται από αυτά τα δημιουργημένα τελεστικά T-κύτταρα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι Τ-λεμφοκυττάρων που αλληλοεπιδρούν με πολύπλοκο τρόπο για να σκοτώσουν αλλοιωμένα αυτοκύτταρα (για παράδειγμα, κύτταρα μολυσμένα με ιό) ή για να ενεργοποιήσουν τα φαγοκυτταρικά κύτταρα.

Διάκριση εαυτού/μη εαυτού: Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ωρίμανσης στον θύμο αδέντα τα Τ-κύτταρα υποβάλλονται σε μια διαδικασία επιλογής που διασφαλίζει ότι είναι σε θέση να αναγνωρίσουν τα μη αυτοπεπτιδία που παρουσιάζονται από το ΜHC. Αυτή η διαδικασία έχει δύο κύριες φάσεις: θετική επιλογή και αρνητική επιλογή (Coutinho et al., 1980).

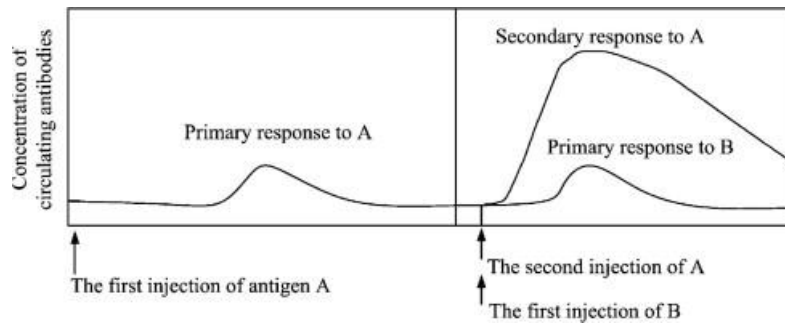
Θετική επιλογή: Κατά τη φάση της θετικής επιλογής, τα Τ-κύτταρα ελέγχονται για την αναγνώριση των μορίων ΜHC που εκφράζονται στα φλοιώδη επιθηλιακά κύτταρα. Εάν ένα Τ-κύτταρο αποτύχει να αναγνωρίσει κάποιο από τα μόρια ΜHC, απορρίπτεται. Διαφορετικά, διατηρείται.

Αρνητική επιλογή: Ο σκοπός της αρνητικής επιλογής είναι να ελέγξει την ανοχή των κυττάρων του εαυτού. Τα Τ-κύτταρα που αναγνωρίζουν τον συνδυασμό ΜHC και αυτοπεπτιδίων αποτυγχάνουν σε αυτό το τεστ. Αυτή η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως ένα φιλτράρισμα μιας μεγάλης ποικιλίας Τ-κυττάρων. Διατηρούνται μόνο εκείνα τα Τ-κύτταρα που δεν αναγνωρίζουν αυτοπεπτιδία (Karpler et al., 1987).

Ανοσολογική μνήμη: Τα ανοσολογικά λεμφοκύτταρα είναι σε θέση να αναγνωρίσουν συγκεκριμένα αντιγόνα μέσω του ΑΒR τους. Τα περισσότερα από τα λεμφοκύτταρα πεθαίνουν όταν το αντιγόνο εξαλείφεται, αλλά μερικά από αυτά διατηρούνται ως κύτταρα μνήμης. Τα κύτταρα μνήμης έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και στην επόμενη εμφάνιση του ίδιου αντιγόνου ανταποκρίνονται γρήγορα.

Απόκριση του Βιολογικού Ανοσοποιητικού Συστήματος

Η πρώτη συνάντηση των ανοσολογικών λεμφοκυττάρων με ένα αντιγόνο δημιουργεί την πρωτογενή απόκριση που φαίνεται στην Εικόνα 11. Καθώς το σώμα δεν έχει εκτεθεί ποτέ σε αυτό το αντιγόνο πριν η χρονική καθυστέρηση για την πρωτογενή απόκριση είναι μεγαλύτερη. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου το αντιγόνο αλληλοεπιδρά με τα ώριμα λεμφοκύτταρα, με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των λεμφοκυττάρων με μοναδική αντιγονική ειδικότητα. Η ειδικότητα κάθε Τ-κυττάρου και κάθε Β-κυττάρου προσδιορίζεται πριν από την επαφή του με το αντιγόνο μέσω αντιστοίχισης ενός τμήματος της δομής. Η διαδικασία επέκτασης του πληθυσμού συγκεκριμένων Τ-κυττάρων και Β-κυττάρων που αναγνωρίζουν το συγκεκριμένο αντιγόνο ονομάζεται κλωνική επιλογή (Jerne et al., 1974; de Castro et al., 2002). Μεταξύ αυτών των πολλαπλασιασμένων λεμφοκυττάρων, τα περισσότερα πεθαίνουν όταν εξαλείφεται το αντιγόνο. Ωστόσο, ορισμένα διατηρούνται ως κύτταρα μνήμης όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Η επόμενη εμφάνιση του ίδιου αντιγόνου ενεργοποιεί μια δευτερεύουσα απόκριση. Σε αυτή την περίπτωση η χρονική καθυστέρηση είναι μικρότερη και το αντιγόνο ανιχνεύεται εύκολα λόγω της παρουσίας των κυττάρων μνήμης.



Εικόνα 11: Απόκριση των αντιγόνων του Βιολογικού Ανοσοποιητικού Συστήματος. (Gong et al., 2009)

3.2 Υπολογιστικές πτυχές του ανοσοποιητικού συστήματος

Από την άποψη της επεξεργασίας πληροφοριών, το φυσικό βιολογικό ανοσοποιητικό σύστημα παρουσιάζει πολλά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά. (Forrest et al., 1994).

Αντιστοίχιση προτύπων: Το ανοσοποιητικό σύστημα είναι σε θέση να αναγνωρίσει συγκεκριμένα αντιγόνα και να δημιουργήσει κατάλληλες αποκρίσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν μηχανισμό αναγνώρισης που βασίζεται στη χημική δέσμευση υποδοχέων και αντιγόνων. Αυτή η σύνδεση εξαρτάται από το μοριακό σχήμα των αντιγόνων.

Εξαγωγή χαρακτηριστικών: Γενικά τα αντισώματα δεν δεσμεύονται στο πλήρες αντιγόνο, αλλά σε τμήμα του. Με αυτόν τον τρόπο, το ανοσοποιητικό σύστημα μπορεί να αναγνωρίσει ένα αντιγόνο απλώς ταιριάζοντας τμήματα του.

Μάθηση και Μνήμη: Το κύριο χαρακτηριστικό του προσαρμοστικού ανοσοποιητικού συστήματος είναι ότι βρίσκεται σε θέση να μαθαίνει μέσω της αλληλεπίδρασης με τα αντιγόνα που είχαν συναντηθεί προηγουμένως. Έτσι, την επόμενη φορά που θα ανιχνευθεί το ίδιο αντιγόνο, τα κύτταρα μνήμης δημιουργούν μια ταχύτερη και πιο έντονη απόκριση (δευτερεύουσα απόκριση). Τα κύτταρα μνήμης λειτουργούν ως συστηματική κατανεμημένη μνήμη.

Ποικιλομορφία: Οι μηχανισμοί κλωνικής επιλογής και υπερμετάλλαξης δοκιμάζουν συνεχώς διαφορετικές διαμορφώσεις ανιχνευτών για γνωστά και άγνωστα αντιγόνα. Αυτή η διαδικασία εξερευνά το χώρο των πιθανών διαμορφώσεων που αναζητούν σχεδόν βέλτιστους υποδοχείς και μπορούν να αντιμετωπίσουν τους διαφορετικούς τύπους αντιγόνων. Η εξερεύνηση εξισορροπείται με την εκμετάλλευση ευνοώντας την αναπαραγωγή πολλά υποσχόμενων ατόμων.

Κατανεμημένη Επεξεργασία: Σε αντίθεση με το νευρικό σύστημα, το ανοσοποιητικό σύστημα δεν διαθέτει κεντρικό ελεγκτή. Η ανίχνευση και η απόκριση μπορούν να εκτελεστούν τοπικά και άμεσα χωρίς επικοινωνία με κανένα κεντρικό όργανο. Αυτή η κατανεμημένη συμπεριφορά επιτυγχάνεται από δισεκατομμύρια μόρια και κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος που κυκλοφορούν γύρω από το αίμα και είναι ικανά να λαμβάνουν αποφάσεις σε ένα τοπικό περιβάλλον συνεργασίας.

Αυτορρύθμιση: Ανάλογα με τη σοβαρότητα της επίθεσης, η απόκριση του ανοσοποιητικού συστήματος μπορεί να κυμαίνεται από πολύ ελαφριά (σχεδόν ανεπαίσθητη) έως πολύ έντονη. Μια ισχυρότερη απάντηση χρησιμοποιεί πολλούς πόρους για να βοηθήσει στην απόκρουση του εισβολέα. Μόλις εξαλειφθεί ο εισβολέας, το ανοσοποιητικό σύστημα αυτορυθμίζεται προκειμένου να σταματήσει την χρήση νέων πόρων και να απελευθερώσει τους χρησιμοποιημένους.

Αυτοπροστασία: Προστατεύοντας ολόκληρο το σώμα, το ανοσοποιητικό σύστημα προστατεύει τον εαυτό του. Σημαίνει ότι δεν υπάρχει άλλο πρόσθετο σύστημα για την προστασία και τη διατήρηση του ανοσοποιητικού συστήματος.

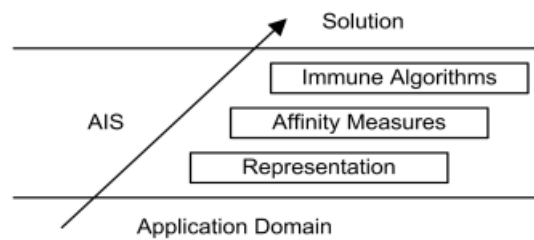
3.3 Τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα

Το ανοσοποιητικό σύστημα παρουσιάζεται ως ένα φυσικό σύστημα απόκρισης που μπορεί να προσαρμοστεί γρήγορα στις μεταβαλλόμενες καταστάσεις. Οι αποτελεσματικοί μηχανισμοί ενός βιολογικού ανοσοποιητικού συστήματος (BIS) είναι η ικανότητα να θυμάται, να ταξινομεί και να εξουδετερώνει την επίδραση των ξένων σωματιδίων. Η κατανόηση και η έρευνα για το BIS έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια από αρκετούς ερευνητές. Αυτό οδηγεί στην ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εμπνευσμένων από το BIS, στο πλαίσιο ενός νέου κλάδου της υπολογιστικής νοημοσύνης που είναι γνωστό ως τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα (AIS). Το AIS αναδύεται σε ένα ενεργό και ελκυστικό πεδίο που περιλαμβάνει μοντέλα, τεχνικές και εφαρμογές μεγάλης ποικιλομορφίας (Dasgupta et al., 2006). Ακόμα, προσφέρει ισχυρές δυνατότητες επεξεργασίας πληροφοριών για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων.

Το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα (AIS) είναι μεθοδολογικό πλαίσιο που αντλεί έμπνευση από τις λειτουργίες του βιολογικού ανοσοποιητικού συστήματος. Οι εφαρμογές του AIS περιλαμβάνουν την αναγνώριση προτύπων, τη ρομποτική, τη συντήρηση συστημάτων (Bayar et al., 2015), τη μάθηση, την ανίχνευση ανωμαλιών και τη βελτιστοποίηση (Hart & Timmis, 2008). Διαφορετικές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί με βάση διαφορετικές κατανοήσεις για τον τρόπο που το ανοσοποιητικό σύστημα ενεργεί (Dasgupta, 2006). Σε μία δημοσίευση που εκτιμάται ότι ήταν μία από τις πρώτες που ασχολήθηκαν με το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα (Farmer et al., 1986), εξετάστηκε το ανοσοποιητικό σύστημα στο πλαίσιο των συστημάτων ταξινόμησης, υπογραμμίζοντας τον παραλληλισμό της θεωρίας του ανοσοποιητικού συστήματος (Jerne 1974) και της τεχνητής νοημοσύνης. Από τη στιγμή εκείνη, το ανοσοποιητικό σύστημα έχει εφαρμοσθεί σε μεγάλη ποικιλία πεδίων που αφορούν τη μάθηση, την εύρεση ανωμαλιών και προβλημάτων βελτιστοποίησης (Hart & Timmis 2008). Εδώ ο στόχος είναι να εισαχθούν νέοι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από μηχανισμούς που βρίσκονται στα φυσικά ανοσοποιητικά συστήματα και να αναπτυχθούν μεθοδολογίες για την εφαρμογή αυτών των αλγορίθμων για την αποτελεσματική επίλυση προβλημάτων.

Το κίνητρο για την δημιουργία λύσεων σε προβλήματα μηχανικής μέσω του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος (AIS) προήλθε από την ταυτοποίηση των χαρακτηριστικών λειτουργίας του βιολογικού ανοσοποιητικού συστήματος (BIS) και τις δυνατότητες εφαρμογής του στο κόσμο της μηχανικής. Ωστόσο η μοντελοποίηση του έχει δύο πτυχές, η πρώτη αφορά την μοντελοποίηση του έτσι ώστε αυτή να βοηθήσει να λύσει υπολογιστικά προβλήματα και η δεύτερη αφορά τη δημιουργία προσομοιώσεων αυτού με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του (Timmis et al., 2008).

Μια πρωταρχική προσέγγιση έγινε από τους ερευνητές (de Castro et al., 2002a) όπου πρότειναν μια σταδιακή προσέγγιση του προβλήματος (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Η σταδιακή προσέγγιση για τη δόμηση AIS λύσεων (de Castro et al., 2002)

Η προσέγγιση αναγνωρίζει ως κύριες κατασκευαστικές παραμέτρους που χρειάζεται να προσδιοριστούν:

1. Την αναλογία των βιολογικών εννοιών/μηχανισμών με τις υπολογιστικές έννοιες.
2. Τον υπολογισμό ομοιότητας.
3. Τον αλγόριθμο του ανοσοποιητικού συστήματος.

Δεδομένου του πεδίου εφαρμογής του μοντέλου απαιτείται και ανάλογη διαφοροποίηση στις πληροφορίες που χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν (Stepney et al. 2005). Η μέθοδος διαφοροποιείται από τους αλγόριθμους EA με την εισαγωγή της έννοιας της υπερμετάλλαξης.

Υπερμετάλλαξη: Η μετάλλαξη που χρησιμοποιείται πιο συχνά στο AIS είναι πολύ παρόμοια με αυτή που βρίσκεται στους Γενετικούς Αλγόριθμους, π.χ. για δυαδικές συμβολοσειρές τα bit αναστρέφονται, για συμβολοσειρές πραγματικής τιμής μία τιμή αλλάζει τυχαία ή για άλλες η σειρά των στοιχείων αλλάζει. Επιπλέον, ο μηχανισμός συχνά ενισχύεται από τη «σωματική» ιδέα, δηλαδή όσο μεγαλύτερη η συγγένεια τόσο περισσότερο (ή λιγότερο) θέλουμε να επηρεάσουμε την μετάλλαξη.

Πρόσφατες εφαρμογές AIS

Τα τελευταία χρόνια ο τομέας της μοντελοποίησης με βάση το τεχνητό ανοσοποιητικό σύστημα (AIS) έχει τραβήξει την προσοχή πολλών ερευνητών λόγω της ευρείας εφαρμογής του σε διαφορετικά πεδία. Το ενδιαφέρον και το κίνητρο για εμβάθυνση στον τομέα έγινε αισθητό από το 1^ο Διεθνές Συνέδριο για το Τεχνητό Ανοσοποιητικό Σύστημα (ICARIS) όπου συνεχίστηκε για εννέα ακόμη χρονιές (Timmis et al. 2003; Nicosia et al. 2004b; Jacob et al. 2005; Bersini & Carneiro 2006; Castro et al. 2007b; Bentley et al. 2008). Η πλειονότητα των συστημάτων που έχουν προταθεί εμπνέονται από ένα ορθά δομημένο ανοσιακό σύστημα, δηλαδή ένα σύστημα ικανό να αναγνωρίσει και να καταπολεμήσει ένα πρόβλημα. Σε αντίθεση, η δομή αυτή μπορεί να επεξεργασθεί περαιτέρω με σκοπό την επίλυση μηχανικών προβλημάτων. Μια μεγάλη συζήτηση και τροχοπέδη στην ανάπτυξη αυτών των μοντέλων είναι η διαρκής ενασχόληση για τη δημιουργία μοντέλων ταυτόσημων του ανοσοποιητικού συστήματος. Τα υπολογιστικά μοντέλα αναπτύσσονται για την επίλυση προβλημάτων και δεν πρέπει να πέφτουν θύματα της μεταφοράς. Από την άλλη πλευρά αλγόριθμοι που απλά δανείζονται ένας κομμάτι της ιδέας μπορεί να είναι αδύναμοι και να αποτυγχάνουν να ξεκλειδώσουν όλες τις υπολογιστικές τους ικανότητες λόγω της απουσίας πτυχών αναγκαίων για την βέλτιστη λειτουργία. (Stepney et al., 2005; Timmis et al., 2008).

Η ικανότητα του AIS σε συνθήκες πραγματικού χρόνου δοκιμάστηκε από τους Lay et al. (2007), μέσω μιας εφαρμογής του DCA (Εικόνα 13). Στην εφαρμογή αυτή ο αλγόριθμος εξετάστηκε κατά πόσο είναι ικανός να εκτελεί τις λειτουργίες του χωρίς να χάνει χρονικές προθεσμίες,

δηλαδή η εφικτότητα της χρησιμοποίησης μια τέτοιου είδους εφαρμογής σε κατάσταση πραγματικού χρόνου. Μέσω της προσαρμοστικής ικανότητας του AIS τονίσθηκε ότι το σύστημα είναι ικανό και αξιόπιστο και ταυτόχρονα ικανό να μειώνει το χρόνο και το κόστος υπολογισμού των παραμέτρων.

```

input:  $S$  = a set of antigens, representing data elements to classified as safe or dangerous.
output:  $K$  = set of antigens classified as safe.
          $L$  = set of antigens classified as dangerous.

begin
  Create  $DC$  pool of 100 dendritic cells.
  for all antigen  $ag \in S$  do ▷ Perform signal processing on  $ag$ 
    for 10 randomly selected dendritic cells  $dc \in DC$  do
      Sample  $ag$ .
      Update  $dc.danger$ ,  $dc.PAMP$ , and  $dc.safe$  signals based on  $ag$ .
      Calculate and update concentration of  $dc.semimatureCytokine$  output cytokine.
      Calculate and update concentration of  $dc.matureCytokine$  output cytokine.
      Calculate and update concentration of  $dc.coStimulatory$  output molecules.
      if concentration of  $dc.coStimulatory$  > threshold then
        Remove  $dc$  from  $DC$  and place in  $M$ .
        Insert new  $dc$  into  $DC$ .
      end if
    end for
  end for

  for all dendritic cells  $dc \in M$  do ▷ Differentiation of dendritic cells.
    if concentration of  $dc.semimatureCytokine$  >  $dc.matureCytokine$  then
       $dc.class$  = semi mature.
    else
       $dc.class$  = mature.
    end if
  end for

  for all antigen  $ag \in S$  do ▷ Classification of antigens
    for all dendritic cells  $dc \in M$  that sampled  $ag$  do
      Calculate if  $ag$  presented in mature or semimature context by  $dc$ .
    end for
    if  $ag$  presented as semimature majority of time then
      Place  $ag$  in  $K$ . ▷  $ag$  is benign
    else
      Place  $ag$  in  $L$ . ▷  $ag$  is malignant
    end if
  end for
end

```

Εικόνα 13: Αλγόριθμος DCA (Greensmith et al. 2005)

Ορισμένοι από τους σημαντικούς τομείς εφαρμογής περιλαμβάνουν το πρόβλημα βελτιστοποίησης (Charsto et al., 2002; Zhang et al., 2007), την ασφάλεια υπολογιστών (Forrest et al., 1972; Somayaji et al., 1997; Harmer et al., 2002), τον σχεδιασμό ανίχνευσης εισβολής (Hofmeyr et al., 1998; Aickelin et al., 2004), τον εντοπισμό σφαλμάτων (Dasgupta et al., 2004), ανοχή σφαλμάτων (Bradley et al., 2000; Bradley et al., 2002), αναγνώριση προτύπων (Timmis, 2000), κατανεμημένη μάθηση (Watkins et al., 2005, δίκτυο αισθητήρων (Drozda, 2007), προγραμματισμός εργασιών (Wei Ge et al., 2008), σχεδιασμός συστήματος συστάσεων (Cayzer et al., 2005; Chen et al., 2004). Το AIS είναι σχετικά νέο και αναδύεται ως ένα ενεργό και ελκυστικό πεδίο που περιλαμβάνει μοντέλα, τεχνικές και εφαρμογές μεγάλης ποικιλομορφίας.

Για την επίλυση ενός προβλήματος αποφυγής εμποδίων για ένα κινητό ρομπότ σε άγνωστο περιβάλλον, οι Mohanty et al. (2020) πρότειναν έναν αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τόσο την ιδιοτυπική θεωρία δικτύου όσο και τη θεωρία κλωνικής επιλογής του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος. Η πρώτη θεωρία χρησιμοποιείται για την πλοήγηση γενικά, ενώ η δεύτερη τίθεται σε ισχύ κατά τις τοπικές καταστάσεις ελάχιστων. Τα αποτελέσματα τους απέδειξαν ότι ο μηχανισμός είναι ικανός να αποφύγει επιτυχώς διάφορους τύπους εμποδίων,

συμπεριλαμβανομένων τοπικών παγίδων. Η συγκεκριμένη μελέτη έχει προχωρήσει και σε πειραματική επικύρωση της εφαρμογής με τα αποτελέσματα να εκτελούνται με τη χρήση του φυσικού ρομπότ.

Σε μία εφαρμογή της μεθόδου πιο κοντά στο πεδίο ενασχόλησης της διπλωματικής αυτής (Lazarowska, 2019), αφορούσε την χάραξη πορείας ενός σκάφους σε κατάσταση σύγκρουσης στη θάλασσα. Ο κύριος στόχος ήταν η ανάπτυξη και ο έλεγχος ενός αλγορίθμου Path Planning για πλοία που θα οδηγούσε σε ασφαλέστερες μεταφορές στο πεδίο της αυτόνομης πλοήγησης υπακούοντας τους COLREGs. Ο αλγόριθμος ακολούθησε μοντελοποίηση μέσω του ACO (αλγόριθμος εμπνευσμένος από το SI (Swarm Intelligence) (Bonabeau et al., 1999) και του τετερμινιστικού Trajectory Base Algorithm (TBA).

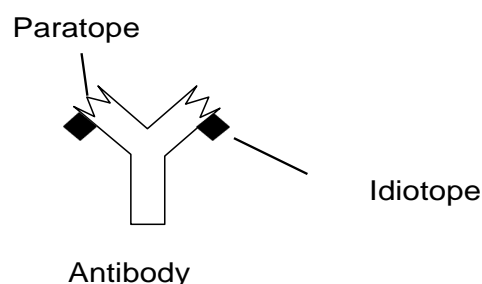
Η πληθώρα των αλγορίθμων που βρίσκεται στη βιβλιογραφία δεν αφορά εφαρμογές των συστημάτων στον τομέα της ναυτιλίας. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη να γίνει μια προσομοίωση που θα επωφελείται από την υπολογιστική ισχύ αυτής της μεθόδου. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι των Mohanty et al. (2020) και Lazarowska (2019) ώθησαν στη μορφή της μοντελοποίησης του δικού μας αλγορίθμου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

3.4 Αλγόριθμοι AIS

Η μελέτη και ο σχεδιασμός του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος (AIS) είναι ένας σχετικά νέος τομέας έρευνας που προσπαθεί να δημιουργήσει υπολογιστικά συστήματα που εμπνέονται από το φυσικό βιολογικό ανοσοποιητικό σύστημα. Όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα, υπάρχουν πολλά επιθυμητά υπολογιστικά χαρακτηριστικά στο BIS που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση υπολογιστικών προβλημάτων. Ένα τυπικό μοντέλο/αλγόριθμος AIS υλοποιεί μία ή περισσότερες από αυτές τις δυνατότητες. Ο Dasgupta (1999) και ο deCastro (2002) παρέχουν τις λεπτομέρειες της μοντελοποίησης και των εφαρμογών του AIS. Οι τέσσερις μορφές αλγορίθμου AIS που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι το μοντέλο ανοσολογικού δικτύου, η αρνητική επιλογή, η κλωνική επιλογή και η θεωρία κινδύνου.

Μοντέλο Ανοσιακού Δικτύου

Το μοντέλο του ανοσοποιητικού δικτύου προτάθηκε από τον Jerne (1974). Αυτή η θεωρία πρότεινε ότι το ανοσοποιητικό σύστημα διατηρεί ένα ιδιοτυπικό δίκτυο διασυνδεδεμένων κυττάρων για την αναγνώριση αντιγόνου. Αυτά τα κύτταρα διεγείρουν και καταστέλλουν το ένα το άλλο με συγκεκριμένο τρόπο που οδηγεί σε σταθεροποίηση του δικτύου. Ο σχηματισμός ενός τέτοιου δικτύου είναι δυνατός με την παρουσία ενός παρατόπου και ενός ιδιοτόπου σε κάθε κύτταρο αντισώματος. Ο παράτοπος που υπάρχει σε ένα Β-κύτταρο και αναγνωρίζεται από άλλα τα ιδιότοπα Β-κυττάρων, έτσι ώστε κάθε κύτταρο να αναγνωρίζει και να αναγνωρίζεται (Εικόνα 14). Σε αυτό το δίκτυο δύο κυψέλες συνδέονται εάν η ομοιότητά τους υπερβαίνει ένα ορισμένο όριο και η ισχύς της σύνδεσης είναι ευθέως ανάλογη με αυτή.



Εικόνα 14: Παρουσία παρατόπου και ιδιοτόπου στο αντίσωμα

Από την άποψη του σχηματισμού δικτύου δύο πράγματα είναι πολύ σημαντικά: η σύνδεση αντιγόνου-αντισώματος και η σύνδεση αντισώματος-αντισώματος. Αυτό το ιδιοτυπικό δίκτυο μπορεί επίσης να θεωρηθεί ότι έχει γνωστικές ικανότητες που το κάνουν παρόμοιο με ένα νευρωνικό δίκτυο (Εικόνα 15) (Varela et al., 1988).

input: S = a set of antigens, representing data elements to be clustered,
 nt network affinity threshold, ct clonal pool threshold, h number of highest affinity clones,
 a number of new antibodies to introduce.
output: N = set of memory detectors capable of classifying unseen patterns.

begin
 Generate set of random specificity B-cells N .
repeat
 for all antigens $ag \in S$ **do**
 Calculate affinity of all B-cells $b \in N$ with ag .
 Select highest affinity B-cells, perform affinity proportional cloning, place clones in C .
 for all B- cell clones $c \in C$ **do**
 Mutate c at rate inversely proportional to affinity.
 Determine affinity of c with ag .
 end for
 Select h highest affinity clones $c \in C$ and place in D .
 Remove all elements of D whose affinity with ag is less than ct .
 Remove elements of D whose affinity with other elements in D is less than ct .
 Insert remaining elements of D into N .
 end for
 Determine affinity between each pair of B-cells in N .
 Systemically remove all B cells whose affinity to another B cell is less than nt .
 Introduce a new, randomly generated, B-cells into N .
until a stopping condition has been satisfied
end

Εικόνα 15: Γενικός αλγόριθμος ανοσιακού δικτύου (Timmis et al. 2008).

Αλγόριθμος Αρνητικής Επιλογής

Ο σκοπός της αρνητικής επιλογής (Εικόνα 18) είναι να παρέχει ανοχή για τα αυτοκύτταρα. Ασχολείται με την ικανότητα του ανοσοποιητικού συστήματος να ανιχνεύει άγνωστα αντιγόνα ενώ δεν αντιδρά στα κύτταρα του «εαυτού» (Forrest et al., 1994; Forrest et al., 1996; Somayaji et al., 1997; Hofmeyr et al., 1998; Esponda et al., 2004). Κατά τη δημιουργία των Τ-κυττάρων, οι υποδοχείς κατασκευάζονται μέσω μιας ψευδοτυχαίας διαδικασίας γενετικής αναδιάταξης. Στη συνέχεια, υποβάλλονται σε μια διαδικασία ωρίμανσης στον θύμο αδένα, που ονομάζεται αρνητική επιλογή. Εκεί, τα Τ-κύτταρα που αντιδρούν ενάντια στις αυτο-πρωτεΐνες καταστρέφονται. Έτσι, μόνο εκείνα που δεν συνδέονται με αυτο-πρωτεΐνες επιτρέπεται να φύγουν από τον θύμο. Αυτά τα ώριμα Τ-κύτταρα στη συνέχεια κυκλοφορούν σε όλο το σώμα για να εκτελέσουν ανοσολογικές λειτουργίες και να προστατεύσουν το σώμα από ξένα αντιγόνα.

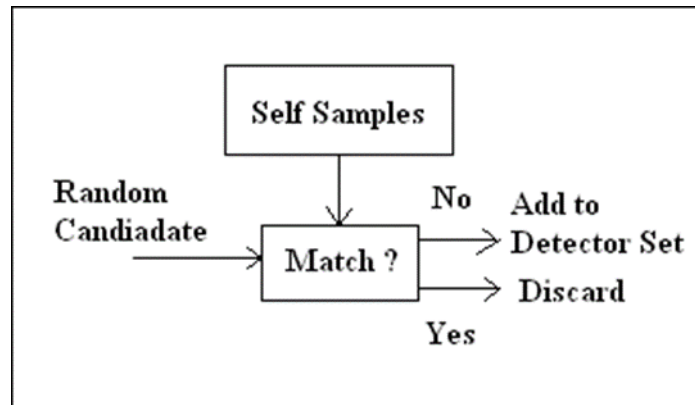
Αυτός ο αλγόριθμος δίνεται από τους Forrest et al. (1994) τα κύρια βήματα του οποίου είναι τα εξής:

Βήμα 1. Στο στάδιο παραγωγής, οι ανιχνευτές παράγονται από κάποια τυχαία διαδικασία και κρίνονται προσπαθώντας να ταιριάξουν τα ίδια δείγματα όπως φαίνεται στην Εικόνα 16.

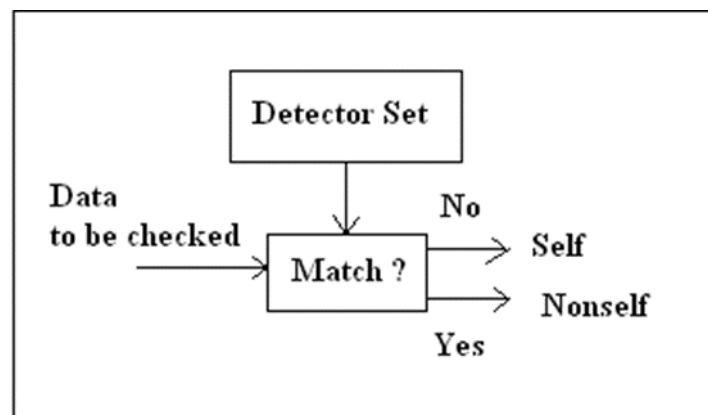
Βήμα 2. Όσοι υποψήφιοι ταιριάζουν, αποκλείονται και οι υπόλοιποι διατηρούνται ως ανιχνευτές.

Βήμα 3. Στο στάδιο ανίχνευσης, η συλλογή ανιχνευτών (ή σύνολο ανιχνευτών) χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί εάν μια εισερχόμενη παρουσία δεδομένων είναι η ίδια ή όχι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 17.

Βήμα 4. Εάν ταιριάζει με οποιονδήποτε ανιχνευτή, τότε ορίζεται ως μη εαυτός ή ανωμαλία.



Εικόνα 16: Στάδιο επιλογής



Εικόνα 17: Στάδιο παρακολούθησης


```

input:  $S$  = set of self strings characterising benign, normal data.
output:  $A$  = Stream of nonself strings detected.

begin
  Create empty set of detector strings  $D$                                 ▷ Generation of detector strings
  Generate random strings  $R$ .
  for all random strings  $r \in R$  do
    for all self strings  $s \in S$  do
      if  $r$  matches  $s$  then
        Discard  $r$ 
      else
        Place  $r$  in  $D$ 
      end if
    end for
  end for

  while There exist protected strings  $p$  to check do                                ▷ Detection stage
    Retrieve protected string  $p$ 
    for all detector strings  $d \in D$  do
      if  $p$  matches  $d$  then
        Place  $p$  in  $A$  and output.                                ▷ Nonself string detected
      end if
    end for
  end while
end

```

Εικόνα 18: Γενικός αλγόριθμος αρνητικής επιλογής (Forrest et al., 1994)

Αλγόριθμος Κλωνικής Επιλογής

Η αρχή της κλωνικής επιλογής (Εικόνα 20) του AIS περιγράφει πώς τα κύτταρα του ανοσοποιητικού εξαλείφουν ένα αντιγόνο. Είναι ένας απλός αλλά αποτελεσματικός αλγόριθμος με σκοπό την επίτευξη εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Ο βασικός αλγόριθμος εφαρμόζεται για πρώτη φορά από τους Charsto et al. για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης (Chartso & Timmis, 2002; Charsto & Zuben, 2002). Τα βήματα που εμπλέκονται στον αλγόριθμο κλωνικής επιλογής είναι τα εξής:

Βήμα 1: Αρχικοποίηση ενός αριθμού αντισωμάτων (κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος) που αντιπροσωπεύουν το αρχικό μέγεθος πληθυσμού.

Βήμα 2: Όταν ένα αντιγόνο ή παθογόνο εισβάλλει στον οργανισμό, επιβιώνει ένας αριθμός αντισωμάτων που αναγνωρίζουν αυτά τα αντιγόνα. Στην Εικόνα 19 μόνο το αντίσωμα C μπορεί να αναγνωρίσει το Αντιγόνο 3 καθώς η δομή του ταιριάζει σε ένα τμήμα του παθογόνου. Έτσι, η ικανότητα του αντισώματος C είναι υψηλότερη από άλλα.

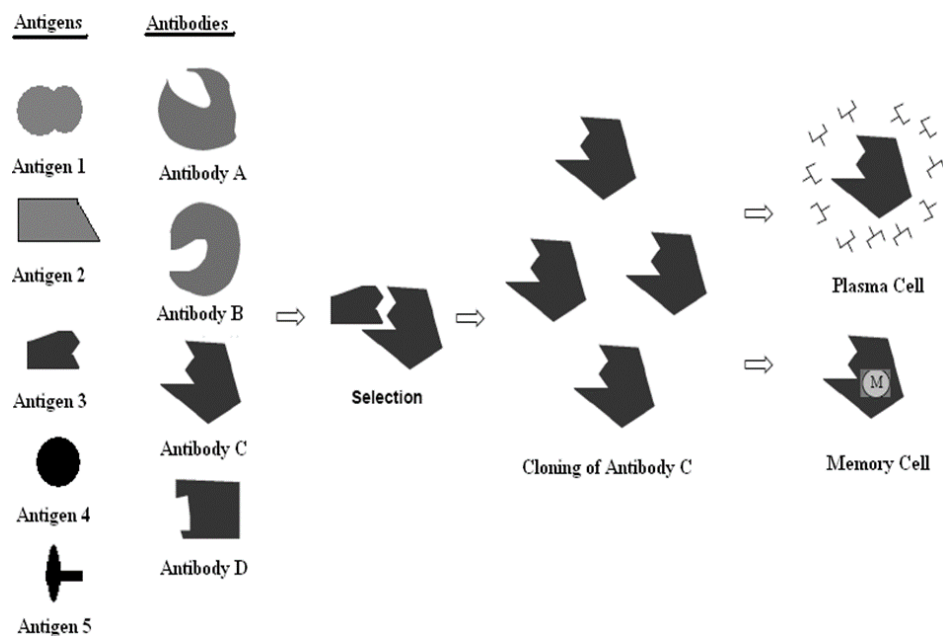
Βήμα 3: Τα κύτταρα του ανοσοποιητικού συστήματος αναγνωρίζουν τα αντιγόνα υπό την κυτταρική αναπαραγωγή. Κατά την αναπαραγωγή τα σωματικά κύτταρα αναπαράγονται χωρίς να υπάρχει διασταύρωση γενετικού υλικού κατά τη μίτωση των κυττάρων. Τα νέα κύτταρα είναι αντίγραφα (κλώνι) των γονέων τους όπως φαίνεται για το αντίσωμα C στην Εικόνα 19.

Βήμα 4: Ένα τμήμα των κλωνοποιημένων κυττάρων υφίσταται έναν μηχανισμό μετάλλαξης που είναι γνωστός ως σωματική υπερμετάλλαξη όπως περιγράφεται από τον Charsto (2002). Η σωματική υπερμετάλλαξη που χρησιμοποιείται πιο συχνά στο AIS είναι πολύ παρόμοια με αυτή που βρίσκεται στους Γενετικούς Αλγόριθμους, π.χ. για δυαδικές συμβολοσειρές τα bit αναστρέφονται, για συμβολοσειρές πραγματικής τιμής μία τιμή αλλάζει τυχαία ή για άλλες η σειρά των στοιχείων αλλάζει. Επιπλέον, ο μηχανισμός συχνά ενισχύεται από τη «σωματική» ιδέα, δηλαδή όσο μεγαλύτερη η συγγένεια τόσο περισσότερο (ή λιγότερο) θέλουμε να επηρεάσουμε την μετάλλαξη.

Βήμα 5: Η συγγένεια κάθε κυττάρου μεταξύ τους είναι ένα μέτρο ομοιότητας μεταξύ τους. Τα αντισώματα που υπάρχουν σε μια απόκριση μνήμης έχουν κατά μέσο όρο υψηλότερη συγγένεια από αυτά της πρώιμης πρωτογενούς απόκρισης. Αυτό το φαινόμενο αναφέρεται ως ωρίμανση της ανοσο-απόκρισης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετάλλαξης αλλάζει η ομοιότητα και η συγγένεια των αντισωμάτων. Σε κάθε επανάληψη μετά από κλωνοποίηση και μετάλλαξη εκείνα τα αντισώματα που έχουν υψηλότερη ικανότητα και υψηλότερη συγγένεια επιτρέπεται να εισέλθουν στη δεξαμενή των αποτελεσματικών κυττάρων. Τα κύτταρα με χαμηλής συγγένειας ή αυτό-αντιδραστικούς υποδοχείς εξαλείφονται.

Βήμα 6: Σε κάθε επανάληψη μεταξύ των αποτελεσματικών ανοσοκυττάρων μερικά γίνονται τελεστικά κύτταρα (Κύτταρα Πλάσματος), ενώ άλλα διατηρούνται ως κύτταρα μνήμης. Τα τελεστικά κύτταρα εκκρίνουν αντισώματα που έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής έτσι ώστε να δρουν πιο γρήγορα ή πιο αποτελεσματικά στο μέλλον όταν ο οργανισμός εκτεθεί στο ίδιο ή παρόμοιο παθογόνο.

Βήμα 7: Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού, διαφορετικά επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 έως 7.



Εικόνα 19: Επιλογή κλώνων

Ο αλγόριθμος κλωνικής επιλογής έχει πολλά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος του πληθυσμού που είναι δυναμικά ρυθμιζόμενο, η εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης, η εύρεση της θέσης πολλαπλών βέλτιστων, η δυνατότητα διατήρησης τοπικών βέλτιστων λύσεων και ρύθμιση καθορισμένων κριτηρίων διακοπής.

input: S = a set of antigens, representing data elements to be recognised.

output: M = set of memory B-cells capable of classifying unseen data elements.

begin

Generate set of random specificity B-cells B .

for all antigens $ag \in S$ **do**

Calculate affinity of all B-cells $b \in B$ with ag .

Select highest affinity B-cells, perform affinity proportional cloning, place clones in C .

for all B- cell clones $c \in C$ **do**

Mutate c at rate inversely proportional to affinity.

Determine affinity of c with ag .

end for

Copy all $c \in C$ into B .

Copy the highest affinity clones $c \in C$ into memory set M .

Replace lowest affinity B-cells $b \in B$ with randomly generated alternatives.

end for

end

Εικόνα 20: Γενική προσέγγιση του αλγορίθμου κλωνικής επιλογής βασισμένη στον CLONALG (de Castro et al., 2002)

Θεωρία κινδύνου

Η αρχική Θεωρία Κινδύνου (Danger Theory) δημοσιεύθηκε από την Matzinger (1994). Σύμφωνα με τη θεωρία, το ανοσοποιητικό σύστημα για να λειτουργεί σωστά, είναι σημαντικό να υπάρχουν και να αναγνωρίζονται μόνο τα «σωστά» κύτταρα, καθώς διαφορετικά αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια αυτοκαταστροφική αυτοάνοση αντίδραση. Η κλασική ανοσολογία (Kuby et al., 2002) ορίζει ότι μια ανοσολογική απόκριση ενεργοποιείται όταν το σώμα συναντά κάτι «μη εαυτό» ή ξένο. Δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητό πώς επιτυγχάνεται αυτή η διάκριση του «εαυτού/μη-εαυτού», αλλά πολλοί ερευνητές πιστεύουν ότι η διαφορά μεταξύ τους μαθαίνεται νωρίς στη ζωή. Συγκεκριμένα, πιστεύεται ότι η διαδικασία ωρίμανσης παίζει σημαντικό ρόλο για την επίτευξη αυτό-ανοχής, εξαλείφοντας εκείνα τα T-κύτταρα και B-κύτταρα που αντιδρούν στον εαυτό τους (Εικόνα 21).

Επιπλέον, απαιτείται ένα σήμα «επιβεβαίωσης»: δηλαδή, για την ενεργοποίηση είτε των B-κυττάρων είτε των T- (φονικών) κυττάρων (T-killer cells), πρέπει επίσης να ενεργοποιηθεί ένα T- (βοηθητικό) λεμφοκύτταρο. Αυτή η διπλή ενεργοποίηση αποτελεί περαιτέρω προστασία από την πιθανότητα τυχαίας αντίδρασης στον εαυτό.

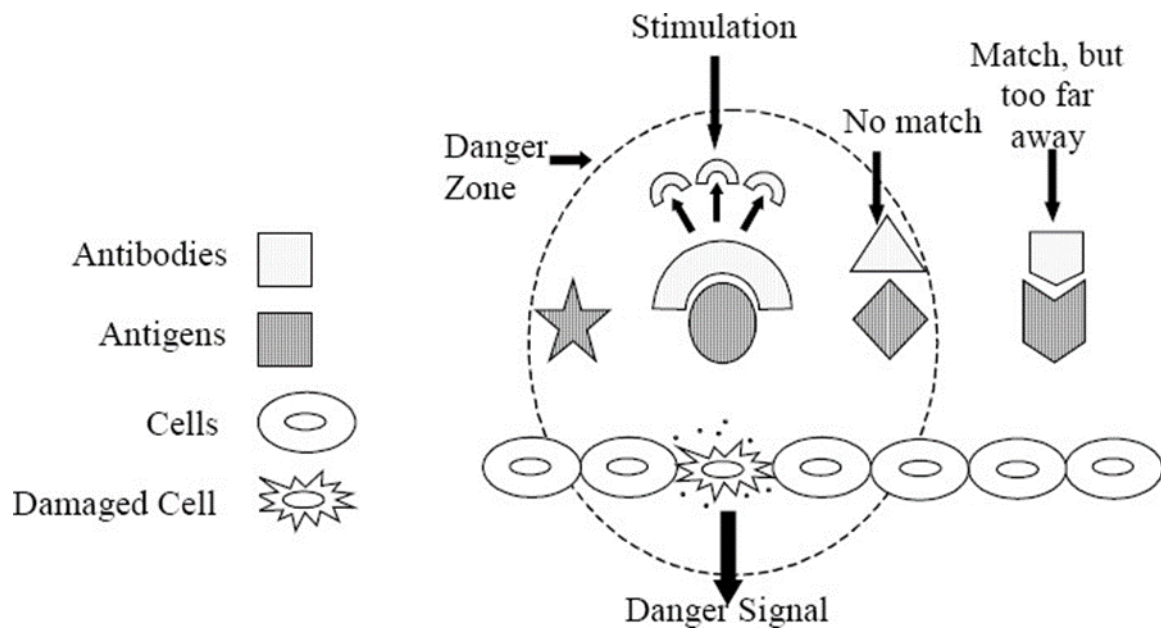
Σύμφωνα με τη θεωρία κινδύνου, πρέπει να υπάρχει διάκριση που υπερβαίνει τη διάκριση του «εαυτού/μη-εαυτού» που περιγράφεται παραπάνω.

Για παράδειγμα:

1. Δεν υπάρχει ανοσολογική αντίδραση σε ξένα βακτήρια στο έντερο ή στο φαγητό που τρώμε, παρόλο που και τα δύο είναι ξένες οντότητες.
2. Αντιστρόφως, ορισμένες αυτό-αντιδρούσες διεργασίες είναι χρήσιμες, για παράδειγμα έναντι μορίων που εκφράζονται από κύτταρα υπό πίεση.
3. Ο ορισμός του «εαυτού» είναι προβληματικός - ρεαλιστικά, ο εαυτός περιορίζεται στο υποσύνολο που πραγματικά φαίνεται από τα λεμφοκύτταρα κατά την ωρίμανση.
4. Το ανθρώπινο σώμα αλλάζει κατά τη διάρκεια της ζωής του και έτσι αλλάζει και ο «εαυτός» του. Ως εκ τούτου, τίθεται το ερώτημα εάν οι άμυνες ενάντια σε μη αυτό-μάθηση νωρίς στη ζωή μπορεί να είναι αυτόματα αντιδραστικές αργότερα.

Άλλες πτυχές που φαίνεται να έρχονται σε αντίθεση με την παραδοσιακή άποψη είναι ότι τα αυτοάνοσα νοσήματα και ορισμένοι τύποι όγκων που καταπολεμούνται από το ανοσοποιητικό σύστημα (και οι δύο επιθέσεις εναντίον του εαυτού) και επιτυχείς μεταμοσχεύσεις (καμία επίθεση εναντίον μη εαυτού).

Η Θεωρία Κινδύνου (Εικόνα 22) αδιαφορεί για καταστάσεις όπου αναγνωρίζεται «μη εαυτός» αλλά δεν υπάρχει κίνδυνος και ενδιαφέρεται για κατατάσεις όπου αναγνωρίζεται «εαυτός» αλλά υπάρχει κίνδυνος στο σύστημά μας. Η κεντρική ιδέα είναι ότι το ανοσοποιητικό σύστημα δεν ανταποκρίνεται στον μη εαυτό αλλά στον κίνδυνο. Πρακτικά, δεν χρειάζεται να επιτεθούμε σε οτιδήποτε είναι ξένο, κάτι που φαίνεται να υποστηρίζεται από τα παραπάνω αντιπαραδείγματα. Σε αυτή τη θεωρία, ο κίνδυνος μετρείται με τη βλάβη στα κύτταρα που υποδεικνύονται από σήματα κινδύνου που αποστέλλονται όταν τα κύτταρα πεθαίνουν με αφύσικο θάνατο. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 21, ένα κύτταρο που βρίσκεται σε κίνδυνο εκπέμπει ένα σήμα συναγερμού, οπότε τα αντιγόνα στη γειτονιά συλλαμβάνονται από κύτταρα που παρουσιάζουν αντιγόνο όπως τα μακροφάγα, τα οποία στη συνέχεια ταξιδεύουν στον τοπικό λεμφαδένα και παρουσιάζουν τα αντιγόνα στα λεμφοκύτταρα. Ουσιαστικά, το σήμα κινδύνου δημιουργεί μια ζώνη κινδύνου γύρω από τον εαυτό του. Έτσι τα Β-κύτταρα που παράγουν αντισώματα που ταιριάζουν με αντιγόνα εντός της επικίνδυνης ζώνης διεγείρονται και υφίστανται τη διαδικασία κλωνικής επέκτασης. Αυτά που δεν ταιριάζουν ή είναι πολύ μακριά δεν διεγείρονται.



Εικόνα 21: Αρχή της Θεωρίας κινδύνου (Aickelin et al., 2008)

Σύμφωνα με τη θεωρία κινδύνου, οι Bretscher και Chon (1970) πρότειναν ένα μοντέλο δύο σημάτων. Σύμφωνα με αυτό:

Σήμα 1: Χρησιμοποιείται για την αναγνώριση αντιγόνου. Το κύτταρο αυτή τη στιγμή θεωρείται και αυτό ως ξένο.

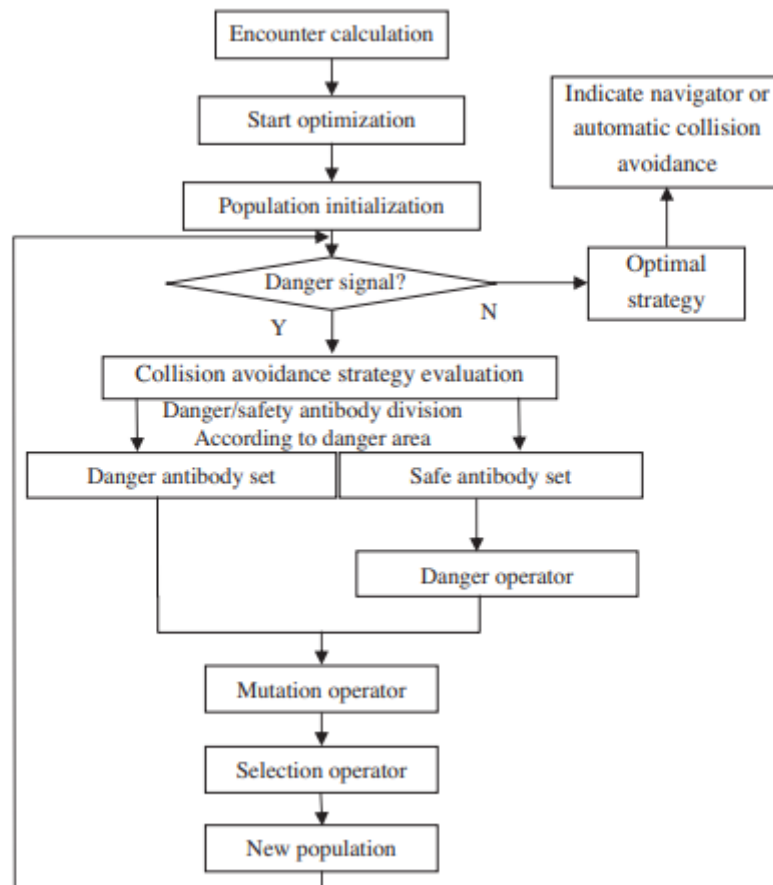
Σήμα 2: Χρησιμοποιείται για συν-διέγερση. Αυτό σημαίνει ότι το κύτταρο είναι πραγματικά επικίνδυνο.

Έτσι, σύμφωνα με το μοντέλο δύο σημάτων, η θεωρία κινδύνου λειτουργεί με 3 βήματα:

Βήμα 1: Ενεργοποίηση εάν ληφθεί Σήμα 1 και Σήμα2 μαζί. Απενεργοποίηση εάν ληφθεί το Σήμα 1 απουσία του Σήματος 2. Αγνόησε το Σήμα 2 χωρίς το Σήμα 1.

Βήμα 2: Αποδοχή Σήματος 2 μόνο από κύτταρα που παρουσιάζουν αντιγόνο. Το σήμα μπορεί να προέρχεται από οποιοδήποτε κύτταρο.

Βήμα 3: Μετά την ενεργοποίηση επέστρεψε σε κατάσταση ηρεμίας μετά από σύντομο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 22: Στρατηγική Αποφυγής Σύγκρουσης Danger Model (Xu, 2014)

Η πρόκληση είναι ξεκάθαρα να οριστεί ένα κατάλληλο σήμα κινδύνου. Το σήμα κινδύνου βοηθά στον προσδιορισμό του υποσυνόλου των χαρακτηριστικών αντισωμάτων που μας ενδιαφέρει. Ένα κατάλληλα καθορισμένο σήμα κινδύνου ξεπερνά πολλούς από τους περιορισμούς της επιλογής «εαυτού/μη εαυτού». Ακόμα, περιορίζει τον τομέα του «μη εαυτού» σε ένα διαχειρίσιμο μέγεθος, καταργεί την ανάγκη ελέγχου όλων των «εαυτών» και αντιμετωπίζει προσαρμοστικά σενάρια όπου ο «εαυτός» ή ο «μη εαυτός» αλλάζει με την πάροδο του χρόνου.

Κεφάλαιο 4

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τη γενική μεθοδολογία της μοντελοποίησης του αλγορίθμου αποφυγής σύγκρουσης ενός αυτόνομου πλοίου με χρήση του Τεχνητού Ανοσοποιητικού Συστήματος, του αλγορίθμου VO και ελέγχου κινδύνου σύγκρουσης.

4.1 Παραδοχές Εφαρμογής

Στη παρούσα εργασία, εξετάζεται η προσέγγιση δύο πλοίων, θεωρώντας ως γνωστές τις ενέργειες του Target Ship Σε πιθανή κατάσταση προσέγγισης όπου το OS είναι το stand-on vessel, πάλι θα πραγματοποιείται προσπάθεια αποφυγής σύγκρουσης, αφού το Target Ship, θεωρείται ότι κινείται καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης του σε μια τροχιά με μια συγκεκριμένη ταχύτητα.

Σε αυτό το στάδιο είναι αναγκαίο να ορισθούν οι παραδοχές της μοντελοποίησης. Στο Global Path Planning κομμάτι, θεωρείται ότι γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια τις θέσεις και τις ακτίνες των στατικών εμποδίων και το σημείο στόχου ενώνεται μέσω ενός ευθυγράμμου τμήματος με το σημείο εκκίνησης. Κατά το Local Path Planning κομμάτι, θεωρούμε ότι:

- Κινούμαστε σε έναν χάρτη με γνωστά σημεία έναρξης και τερματισμού.
- Οι θέσεις των στατικών εμποδίων δεν αλλάζουν.
- Το TS δεν είναι υπεύθυνο να μεταβάλλει την πορεία του σε κανένα σενάριο.
- Η προσομοίωση γίνεται σε μικρή κλίμακα πλοίου-μοντέλου έτσι ώστε να είναι δυνατή η μελλοντική εφαρμογή του αλγορίθμου σε διαδικασία πραγματικής δοκιμής (test).
- Γνωρίζουμε όλα τα χαρακτηριστικά της κίνησης του TS.
- Δεν μεταβάλλεται η ταχύτητα του OS κατά την αποφυγή, μόνο η γωνία πλευσης.
- Όταν προσπεράσουμε το TS και έχουμε ασφαλή απόσταση δεν υπάρχει πλέον κίνδυνος σύγκρουσης.
- Δεν υπάρχει συνυπολογισμός της δυναμικής της κίνησης του πλοίου στην κατάσταση αποφυγής.
- Δεν υπάρχει συνυπολογισμός της κατάστασης της θάλασσας (π.χ. επίδραση ανέμου, κυμάτων στην κίνηση του πλοίου).

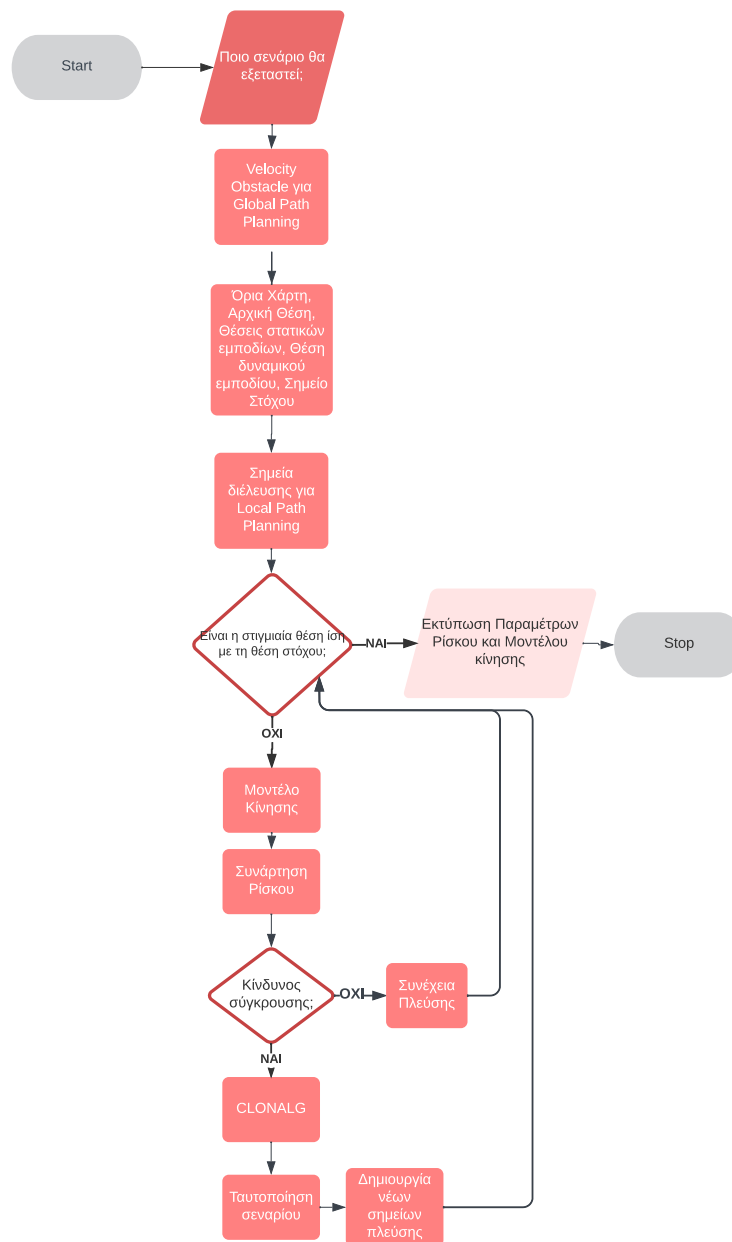
Ακόμα, κατά αποφυγή σύγκρουσης, θεωρητικά, το Stand-On σκάφος, δεν θα έπρεπε να προβεί σε καμία ενέργεια, εκτός από τη διατήρηση της πορείας και ταχύτητας προτού περάσει το πλοίο που ανταποκρίνεται και ανοίξει το δρόμο, σύμφωνα με την COLREGs. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση και ειδικότερα στην κατάσταση Cross-left, το OS θα προβεί σε λειτουργία αποφυγής σύγκρουσης σαν να είναι εκείνο υπεύθυνο για την αποφυγή, έτσι ώστε να εξετασθεί η συμπεριφορά και σε αυτό το σενάριο.

Επίσης, Τα Συστήματα Ελέγχου του Πλοίου καθώς και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του, δεν είναι μέλημα αυτής της εργασίας, οπότε αγνοείται το πηδάλιο και η εξίσωση Nomoto και θεωρούμε ότι το πλοίο υιοθετεί αμέσως τη διαφορά στη κατεύθυνση που ορίζει ο αλγόριθμος.

Συνοψίζοντας, στην εφαρμογή που παρουσιάζεται παρακάτω, το OS, ακολουθώντας μια σειρά ενεργειών, ξεκινώντας από ένα σημείο, καταφέρνει να χαράξει πορεία μέχρι το σημείο στόχου, να αποφύγει τα στατικά εμπόδια, να αποφύγει το δυναμικό εμπόδιο (TS) και τέλος να χαράξει και να ακολουθήσει νέα πορεία για το σημείο στόχου.

4.2 Περιγραφή κώδικα

Ο σχεδιασμός διαδρομής είναι ένα κρίσιμο μέρος στην ανάπτυξη των USV (Unmanned Surface Vehicles) γενικά, και ειδικότερα για τα ASV (Autonomous Surface Vehicles), με στόχο τη χρήση αλγορίθμων ικανών για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τροχιών για την καθοδήγηση του ταξιδιού ενός σκάφους. Ως αρχικό πρόβλημα, τέθηκε η δημιουργία ενός μοντέλου που μπορεί να λύσει το πρόβλημα της εύρεσης διαδρομής μεταξύ δύο θέσεων σε δυναμικό χώρο, λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια, καθώς και να είναι φυσικά εφικτή εντός χωρικών περιορισμών. Τα συνήθη χρησιμοποιούμενα κριτήρια βελτιστοποίησης για τη διαδρομή και τη τροχιά περιλαμβάνουν ελαχιστοποίηση του μήκους της διαδρομής, του χρόνου και της κατανάλωση ενέργειας, καθώς και μέτρα ασφάλειας ή κινδύνου. Η δομή και το διάγραμμα ροής της εφαρμογής φαίνονται στο Σχήμα 11.

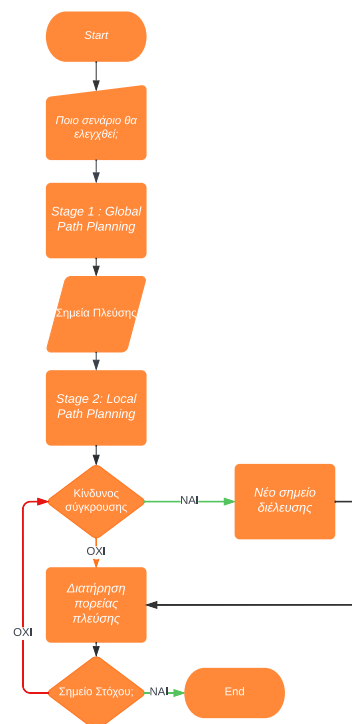


Σχήμα 11: Διάγραμμα ροής του COLAV

Ακόμα, η χάραξη της πορείας, συνήθως ορίζεται εντός καθαρά γεωμετρικού χώρου, ενώ ο σχεδιασμός τροχιάς ή η παραγωγή τροχιάς, περιλαμβάνει γεωμετρικά μονοπάτια προικισμένα με χρονικές ιδιότητες, π.χ. να ενσωματώνουν τη δυναμική. Στην μοντελοποίηση αυτή, ο ορισμός της τροχιάς και η πλοήγηση του πλοίου γίνονται σε διαφορετικά στάδια (Σχήμα 12).

Το Στάδιο 1 αποτελείται από το Global Path Planning (Offline), όπου το πλοίο γνωρίζει εκ των προτέρων το χάρτη πλοήγησης και τα στατικά εμπόδια καθώς και περιοχές που απαγορεύεται η μετάβαση του. Με αυτά τα δεδομένα, ο αλγόριθμος καλείται σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του πλοίου που έχουν ορισθεί, να υπολογίσει την τροχιά που πρέπει να ακολουθήσει το πλοίο για τη βέλτιστη μετάβαση στο Σημείο Στόχου. Η υλοποίηση αυτού του σταδίου γίνεται με τη χρήση του αλγόριθμου Velocity Obstacle. Ο αλγόριθμος είναι μια τροποποίηση μιας μεθόδου του Hucaihui (2018) που βρέθηκε στην ιστοσελίδα «GitHub⁽¹⁾».

Το Στάδιο 2 αποτελείται από το Local Path Planning (Online), όπου το πλοίο θα έχει ως δεδομένα εισόδου την προκαθορισμένα τροχιά ρουτίνας για τον δεδομένο χάρτη. Σε αυτό το στάδιο το πλοίο θα πρέπει να έχει την ικανότητα να αναγνωρίσει επικείμενους κινδύνους. Στην παρούσα εφαρμογή γίνεται με ένα πλοίο στόχου (TS) με στόχο να αλλάξει τη προκαθορισμένη τροχιά που είχε οριστεί στο Στάδιο 1. Η γενική ιδέα και ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης CLONALG, εμπνεύσθηκε από τη μοντελοποίηση του Franco⁽²⁾ (2022) και αποτελεί τροποποίηση αυτής.



Σχήμα 12: Global και Local Path Planning

Global Path Planning

Σε αυτή την ενότητα αναλύεται η μηχανική και η διαδικασία υπολογισμού του αλγορίθμου VO, που είναι υπεύθυνος για την χάραξη του Global Path. Στην παρακάτω ανάλυση θα αναφέρεται ως “Agent” το OS και ως “Obstacles” τα εμπόδια.

(1) github.com/hucaihui/ShipLocalPathPlanning

Τα χαρακτηριστικά του Agent (Πίνακας 1) αφορούν το μήκος του, το πλάτος του, την ακτίνα του, τη θέση του, τη ταχύτητα του, τη μορφή της γάστρας του, την εφικτή τιμή επιτάχυνσης, την ταχύτητα που είναι δυνατό να επιτευχθεί και τα rpm της μηχανής.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Agent

Μεγέθη		Τιμές/ Μονάδες
L	(Μήκος)	4.88m
B	(Πλάτος)	2.5m
Position	(Θέση)	m
Velocity	(Ταχύτητα)	m/s
Feasible acceleration	(Εφικτή Επιτάχυνση)	m/s ²
Reachable Velocity	(Εφικτή Ταχύτητα)	m/s

Η συνάρτηση “Feasible Acceleration” με δεδομένα τα όρια στις στροφές ενός εικονικού κινητήρα, είναι υπεύθυνη για την ορθή τροφοδότηση της συνάρτησης με τιμές ικανές για την επιτάχυνση του agent. Αφού οριοθετηθούν αυτά τα όρια, υπολογίζεται ένα πλέγμα ώθησης (Thrust grid), το οποίο με τη συνέχεια μετατρέπεται σε δύναμη ώσης. Για κάθε τιμή της από το πλέγμα, υπολογίζεται ένα νέο πλέγμα εφικτής επιτάχυνσης.

Κατά την εκκίνηση σχεδιάζεται η ευθεία που ενώνει το σημείο εκκίνησης με το σημείο στόχου. Έπειτα, ξεκινάει η διαδικασία εύρεσης της τροχιάς, με ταυτόχρονη εκκίνηση ενός ρολογιού. Πρώτο μέλημα είναι ο υπολογισμός της απόστασης από όλα τα γνωστά εμπόδια.

Σε δεύτερο στάδιο υπολογίζονται οι κώνοι σύγκρουσης. Οι κώνοι σύγκρουσης ουσιαστικά αφορούν τον σχετικό συνυπολογισμό της απόστασης, της ταχύτητας, των γωνιών και του Ship Domain με σκοπό την οριοθέτηση μιας επικίνδυνης περιοχής ανάμεσα στον Agent και τα Obstacles. Η αναπαράσταση που φαίνεται παρακάτω, έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό δύο εφαιπόμενων ευθειών στο Ship Domain του Agent και στο Ship Domain των Obstacles.

Στην δική μας εφαρμογή (Εικόνα 23), για τον υπολογισμό του Ship Domain υιοθετήθηκε το μοντέλο των Kijima (2003). Το μοντέλο σύμφωνα με πρόσφατες αναλύσεις, φαίνεται να δίνει ικανοποιητικές τιμές στον υπολογισμό του Ship Domain για την αποφυγή του κινδύνου (Gia et al., 2016).

Το μοντέλο εισάγει μια εξίσωση για τον υπολογισμό των διαμήκων και πλευρικών ακτινών του πεδίου, η οποία φαίνεται παρακάτω.

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (2)$$

$$V = 1.94384 * V \text{ (knots)} \quad (3)$$

$$k_{AD} = 10^{(0.3591 * \log_{10}(V) + 0.0952)} \quad (4)$$

$$k_{Dt} = 10^{(0.5441 * \log_{10}(V) - 0.0795)} \quad (5)$$

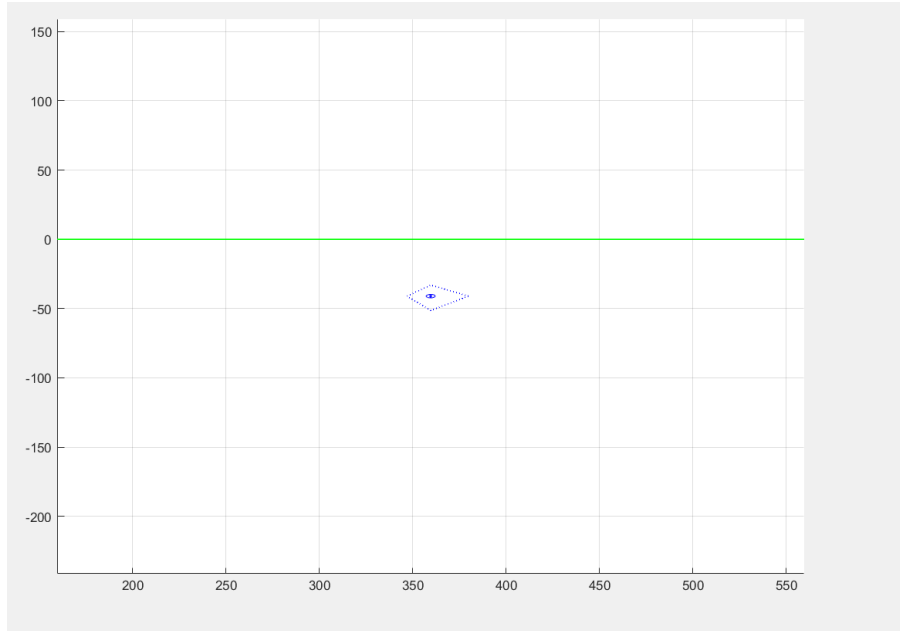
Όπου A_D , η τιμή advance και D_T η τακτική διάμετρος.

$$ShipDomain_{fore} = \left(1 + 1.34 * \sqrt{k_{AD}^2 + k_{Dt}^2 * Length} \right) \quad (6)$$

$$ShipDomain_{aft} = \left(1 + 0.67 * \sqrt{k_{AD}^2 + k_{Dt}^2} * Length \right) \quad (7)$$

$$ShipDomain_{port} = (0.2 + 0.75 * k_{Dt}) * Length \quad (8)$$

$$ShipDomain_{starboard} = (0.2 + k_{Dt}) * Length \quad (9)$$



Εικόνα 23: Στιγμιότυπο Ship Domain σε τυχαία στιγμή

Αν η τιμή του Ship Domain γίνει μικρότερη από $L/2$, τότε ακολουθείτε η τιμή $L/2$. Σε επόμενο στάδιο υπολογίζονται οι εφικτές ταχύτητες, με δεδομένα εισόδου το πλέγμα επιταχύνσεων.

$$V_{i+1} = V_i + dt * FeasibleAcceleration \quad (10)$$

Υπολογίζεται ένα πλέγμα ταχυτήτων που περιέχει όλες τις εφικτές ταχύτητες που μπορεί να έχει το πλοίο. Ωστόσο, δεν είναι όλες αυτές επιθυμητές καθώς ορισμένες μπορούν να ωθήσουν σε σύγκρουση. Επομένως, δημιουργούνται πολύγωνα, με σκοπό να ελεγχθούν και να περάσουν στο επόμενο στάδιο οι ταχύτητες που είναι ικανές να αποφύγουν τη σύγκρουση. Από αυτές τις τιμές που έμειναν, επιλέγεται η μικρότερη τιμή καθώς αυτή φαίνεται να είναι η πιο οικονομική. Η διαδικασία αυτή γίνεται σε κάθε σημείο διέλευσης έως ότου φθάσουμε στη σημείο στόχου.

Local Path Planning

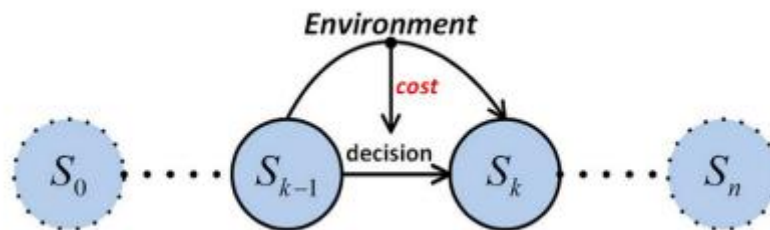
Σε αυτό το στάδιο ξεκινάει η διαδρομή του πλοίου στην πορεία που ορίστηκε. Έτσι, πραγματοποιήθηκε η δημιουργία ενός μοντέλου ασφάλειας (collision risk detection) σύμφωνα με το οποίο το πλοίο θα είναι ικανό να καταλάβει ότι βρίσκεται σε κατάσταση κινδύνου. Σημαντικός είναι ο ορισμός των παραμέτρων που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε αυτό το έργο (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Παράμετροι μοντέλου κίνησης

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες/ Εύρος
V	Ταχύτητα	Κόμβοι
P(P _x , P _y)	Θέση	Ναυτικά Μίλια
C	Πορεία	[0,2π)

B	Πραγματική Γωνία	$[0, 2\pi)$
Q	Σχετική Γωνία	$[-\pi, \pi)$
RC	Σχετική Πορεία	$[-\pi, \pi)$
RV	Σχετική Ταχύτητα	Κόμβοι

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποφυγής σύγκρουσης αυτόνομων πλοίων είναι μια διαδοχική διαδικασία λήψης αποφάσεων. Δεν μπορούμε να περιμένουμε να σχεδιάσουμε μια σειρά ενεργειών αποφυγής από την αρχή έως το τέλος της διαδικασίας αποφυγής σύγκρουσης. Στην πραγματικότητα, πρέπει να προσαρμόσουμε και να βελτιστοποιήσουμε την απόφαση αποφυγής σε κάθε χρονικό βήμα. Αυτή η διαδικασία είναι μια τυπική Markov διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η λήψη αποφάσεων αυτή τη στιγμή εξαρτάται μόνο από την τελευταία κατάσταση και δεν έχει καμία σχέση με το παρελθόν. Κατά τη διαδικασία αποφυγής, το αυτόνομο πλοίο θα πρέπει να αλληλεπιδρά συνεχώς με το περιβάλλον και να ενημερώνει συνεχώς τη σχετική κατάσταση κίνησης μεταξύ άλλων πλοίων. Μετά από αυτό, το σύστημα θα πρέπει να επιλέγει τη βέλτιστη δράση με το χαμηλότερο κόστος, ώστε να φτάσει ο επόμενος κύκλος ενημέρωσης. Η διαδικασία φαίνεται στην Εικόνα 24 όπου S_0, S_{k-1}, S_k, S_n υποδεικνύουν την κατάσταση σε κάθε στιγμή δειγματοληψίας.



Εικόνα 24: Κατάσταση υπολογισμού παραμέτρων κατά την αποφυγή σύγκρουσης, (Shaobo et al., 2020)

Έτσι, η ανάλυση του κίνδυνου σύγκρουσης των δύο πλοίων γίνεται για κάθε συντεταγμένη του πλοίου. Σε πρώτο μέρος, μια συνάρτηση υπολογισμού των παραμέτρων (Motion Model) δίνει τις επαρκείς πληροφορίες για τη μηχανική της κίνησης του πλοίου Own Ship (OS) και του Target Ship (TS) με υπολογισμό των σχετικών παραμέτρων του, με σκοπό να τροφοδοτήσει τη συνάρτηση ρίσκου.

Σε επόμενο στάδιο, η συνάρτηση ρίσκου (Risk Function) ξεκινάει να υπολογίζει σε κάθε βήμα τον κίνδυνο σύγκρουσης, έτσι ώστε αυτή να είναι σε θέση να αναγνωρίσει την επικινδυνότητα της προσέγγισης των πλοίων. Οι παράμετροι που υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη φαίνονται παρακάτω στις εξισώσεις.

Μοντέλο κίνησης

- Πραγματική ταχύτητα κίνησης του OS.

$$U_{x0} = U_0 \cdot \cos(\phi_0) \quad (11)$$

$$U_{y0} = U_0 \cdot \sin(\phi_0), \text{ όπου } \phi_0 \text{ η γωνία κατεύθυνσης του OS.} \quad (12)$$
- Η πραγματική ταχύτητα κίνησης του Target Ship.

$$U_{xT} = U_T \cdot \cos(\phi_T) \quad (13)$$

$$U_{yT} = U_T \cdot \sin(\phi_T), \text{ όπου } \phi_0 \text{ η γωνία κατεύθυνσης του TS} \quad (14).$$
- Το διάνυσμα σχετικής ταχύτητας των δύο πλοίων.

$$U_{xR} = U_{xT} - U_{x0} \quad (15)$$

$$U_{yR} = U_{yt} - U_{y0} \quad (16)$$

d) Η σχετική ταχύτητα της κίνησης.

$$U_R = \sqrt{U_{xR}^2 + U_{yR}^2} \quad (17)$$

Η σχετική γωνία κατεύθυνσης.

$$\varphi_R = \arctan\left(\frac{U_{yR}}{U_{xR}}\right) + a \quad (18)$$

Όπου $\alpha =$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0, U_{xt} \geq 0, U_{yt} \geq 0 \\ \pi, U_{xt} < 0, U_{yt} < 0 \\ \pi, U_{xt} \geq 0, U_{yt} < 0 \\ 2\pi, U_{xt} < 0, U_{yt} \geq 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

e) Η σχετική απόσταση από το Target Ship.

$$R_t = \sqrt{(x_t + x_0)^2 + (y_t + y_0)^2} \quad (20)$$

f) Η πραγματική γωνία διόπτευσης (True Bearing)

$$\alpha_t = \arctan\frac{x_t - x_0}{y_t - y_0} + a \quad (21)$$

g) Η σχετική γωνία προσέγγισης

$$C_t = \varphi_t - \varphi_0 \quad (22)$$

h) Η απόσταση και ο χρόνος από το κοντινότερο σημείο διέλευσης

$$DCPA = R_t * \sin(\varphi_R - \alpha_t) \quad (23)$$

$$TCPA = R_t * \frac{\sin(\varphi_R - \alpha_t)}{U_R} \quad (24)$$

Μετά από αυτούς τους υπολογισμούς, πρέπει να καθοριστεί εάν υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης μεταξύ των πλοίων και στη συνέχεια να διακρίνει τις καταστάσεις συνάντησης, με στόχο των καθορισμό των απαραίτητων ενεργειών.

Εάν επιτευχθεί η συνθήκη ενεργοποίησης, δηλαδή η ύπαρξη κατάστασης κινδύνου ξεκινάει η μετάβαση στον αλγόριθμο αποφυγής σύγκρουσης. Σε περίπτωση που η προϋπόθεση του ρίσκου για αποφυγή σύγκρουσης δεν έχει επιτευχθεί, η ροή πληροφοριών συνεχίζεται κατά τη μετάβαση στα επόμενα σημεία διέλευσης, έως ότου το πλοίο φτάσει στο σημείο στόχου.

Συνάρτηση Ρίσκου

Η διαδικασία και ο υπολογισμός της τιμής του ρίσκου που ενεργοποιεί τον αλγόριθμο αποφυγής σύγκρουσης, λαμβάνει ως δεδομένα τη σχετική ταχύτητα των δύο πλοίων, τις σχετικές τους γωνίες, την απόσταση και το χρόνο που μεσολαβεί από το πλησιέστερο σημείο διέλευσης.

Για τον υπολογισμό του Ship Domain, θεωρούμε πάλι όπως και στον αλγόριθμο του VO, τη μεγαλύτερη διάσταση μήκους του πολυγώνου που υπολογίστηκε από το μοντέλο των Kijima (2003). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα έρευνας και της παρατήρησης, για τα πλοία που προσεγγίζονται από την αριστερή πλευρά, το αρχικό DCPA είναι 1,5 ναυτικά μίλια, το 98% των πλοίων δεν προβαίνει σε αποφυγή σύγκρουσης. Για πλοία που έρχονται στη δεξιά πλευρά ή

τη πλήρη, όταν το αρχικό DCPA είναι 1,5 ναυτικά μίλια, το 94,3% των πλοίων πάλι, δεν μεταβαίνει σε ενέργεια διαφυγής. Για πλοία που προσεγγίζονται από τη πρύμνη, όταν το αρχικό DCPA είναι 0,9 ναυτικά μίλια, το 100% των πλοίων δεν λαμβάνουν μέτρα αποφυγής.

Λαμβάνοντας υπόψη το σφάλμα παρατήρησης και την ασφάλεια, ορίσαμε την ασφαλή απόσταση διέλευσης μεταξύ OS και TS ως τη διπλάσια του Ship Domain. Όλοι οι παράμετροι και η διαδικασία υπολογισμών φαίνεται παρακάτω.

d_s : Ship Domain

$$d_p = 2 * d_s \quad (25)$$

$$U_{DCPA} = \begin{cases} 1, DCPA \leq d_s \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} * \sin \left[\frac{\pi}{(d_p - d_s)} * \frac{2 * DCPA - (d_p + d_s)}{2} \right], d_s < DCPA < d_p \\ 0, d_p < DCPA \end{cases} \quad (26)$$

$$U_{TCPA} = \begin{cases} 1, 0 \leq |TCPA| \leq t_1 \\ \left(\frac{t_2 - |TCPA|}{t_2 - t_1} \right)^2, t_1 < |TCPA| \leq t_2 \\ 0, t_2 < |TCPA| \end{cases} \quad (27)$$

$$\text{Όπου } t_1 = \begin{cases} \frac{\sqrt{(d_s^2 - DCPA^2)}}{RV}, DCPA \leq d_s \\ \frac{\sqrt{d_s - DCPA}}{RV}, DCPA > d_s \end{cases} \quad (29)$$

$$\text{Όπου } t_2 = \frac{\sqrt{d_p^2 - DCPA^2}}{RV} \quad (28)$$

$$U(D) = \begin{cases} 1, 0 \leq D \leq d_s \\ \frac{d_p - D}{d_p - d_s}, d_s < D \leq d_p \\ 0, d_p < D \end{cases} \quad (30)$$

$$U(B) = \frac{1}{2} * \left[\cos \left(B - \left(19 * \frac{\pi}{180} \right) \right) + \sqrt{\left(\frac{440}{289} + \cos^2 \left(B - 19 * \frac{\pi}{180} \right) \right)} \right] - \frac{5}{17} \quad (31)$$

$$U(K) = \left(1 + \frac{2}{(K * \sqrt{K^2 + 1} + 2 * K * \sin C_{OS})} \right)^{-1} \quad (32)$$

Η κάθε παράμετρος (Πίνακας 3) που παρουσιάζεται παραπάνω αποτελεί μια κανονικοποιημένη παράμετρο, η οποία δίνει μια τιμή για την τελική συνάρτηση υπολογισμού του ρίσκου σύγκρουσης. Ο τελικός υπολογισμός, ως αποτέλεσμα, συνυπολογίζει την σχετική ταχύτητα, τη γωνία, τη μεταξύ τους απόσταση, την απόσταση από

το πλησιέστερο σημείο διέλευσης, το χρόνο από το πλησιέστερο σημείο διέλευσης και τον ασφαλή χώρο του πλοίου.

Πίνακας 3: Παράμετροι Ρίσκου

U_{DCPA}	Παράμετρος απόστασης από το πλησιέστερο σημείο διέλευσης
U_{TCPA}	Παράμετρος χρόνου από το πλησιέστερο σημείο διέλευσης
U_{DIST}	Παράμετρος Σχετική Απόσταση
U_B	Παράμετρος Σχετικής Γωνίας
U_K	Παράμετρος Σχετικής Ταχύτητας
$CR_{ts} = w_1 * U_{DCPA} + w_2 * U_{TCPA} + w_3 * U_D + w_4 * U_B + w_5 * U_K$ (33)	

Η συνάρτηση έχει ως μέγιστη τιμή τη μονάδα. Ως κατάσταση σύγκρουσης θεωρείται κάθε τιμή ρίσκου που ξεπερνάει το 0.5. Οι τιμές των βαρών, σε πρώτη εφαρμογή λήφθηκαν ως εξής σύμφωνα με την ανάλυση (Shaobo et al., 2020) (Πίνακας 4). Έπειτα, μετά από μεγάλο αριθμό εκτελέσεων καταστάσεων προσέγγισης των δύο πλοίων παρατηρήθηκε ότι στην παρούσα εφαρμογή λόγω του μεγέθους και των ταχυτήτων των δύο πλοίων μεγαλύτερη βάση χρειαζόταν να δοθεί στην απόσταση μεταξύ των δύο πλοίων. Έτσι, οι τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται στις παρακάτω του Πίνακα 5.

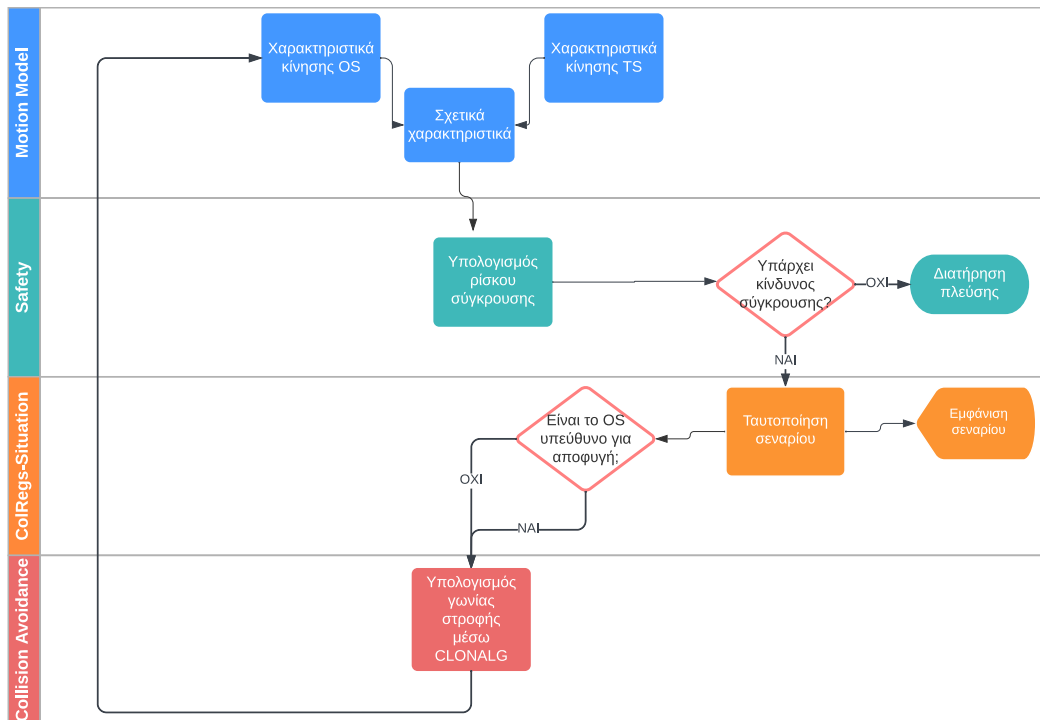
Πίνακας 4: Πίνακας βαρών συνάρτησης ρίσκου (Shaobo et al., 2020)

Factors	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
Weight	0.40	0.367	0.167	0.033	0.033

Πίνακας 5: Βάρη των παραμέτρων υπολογισμού της τιμής ρίσκου

Factors	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
Weight	0.4	0.2	0.3	0.05	0.05

Με βάση την ανάλυση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, στην παρούσα εργασία διαμορφώνεται ένα σύστημα λήψης αποφάσεων αποφυγής σύγκρουσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25: Μεθοδολογία λήψης αποφάσεων αποφυγής σύγκρουσης

Ανίχνευση Κατάστασης Προσέγγισης

Ο υπολογισμός της κατάσταση προσέγγισης γίνεται καθαρά λόγω πληρότητας της εφαρμογής και δεν θα διαδραματίσει κανέναν ρόλο στην αποφυγή της σύγκρουσης. Η προτεινόμενη διαδικασία για την ανίχνευση του ορθού σεναρίου προσέγγισης των δύο πλοίων στη παρούσα ανάλυση, αφορά καθαρά τη σχετική γωνία προσέγγισης και την κατεύθυνση των δύο πλοίων καθώς και τις σχετικές απόλυτες τιμές των ταχυτήτων τους.. Οι καταστάσεις που θα αναλυθούν είναι η μετωπική, η προσέγγισης από δεξιά και αριστερά και η προσέγγισή προσπέρασης.

$$\begin{aligned} \text{HEAD_ON} &\doteq \left\{ \left(-\frac{\pi}{8} \leq Q \leq \frac{\pi}{8} \right) \cup \left(\frac{3}{4}\pi \leq RC \leq \pi \right) \right\} \\ \text{OVERTAKEN} &\doteq \left\{ \left(|Q| \geq \frac{5}{8}\pi \right) \cup \left(0 \leq RC \leq \frac{3}{8}\pi \right) \cup (V_{Os} < V_{Ts}) \right\} \\ \text{CROSS_LEFT} &\doteq \left\{ \left(-\frac{5}{8}\pi < Q < -\frac{\pi}{8} \right) \cup \left(\frac{\pi}{8} \leq RC \leq \frac{5}{8}\pi \right) \right\} \\ \text{CROSS_RIGHT} &\doteq \left\{ \left(\frac{\pi}{8} < Q < \frac{5}{8}\pi \right) \cup \left(\frac{\pi}{8} < RC < \frac{5}{8}\pi \right) \right\} \\ \text{OTHERS} &\doteq \{(Q, RC) \notin \text{all above}\} \end{aligned}$$

Όπου V_{Os} : η ταχύτητα του OS.

V_{Ts} : η ταχύτητα του TS.

RC: η σχετική γωνία κατεύθυνσης.

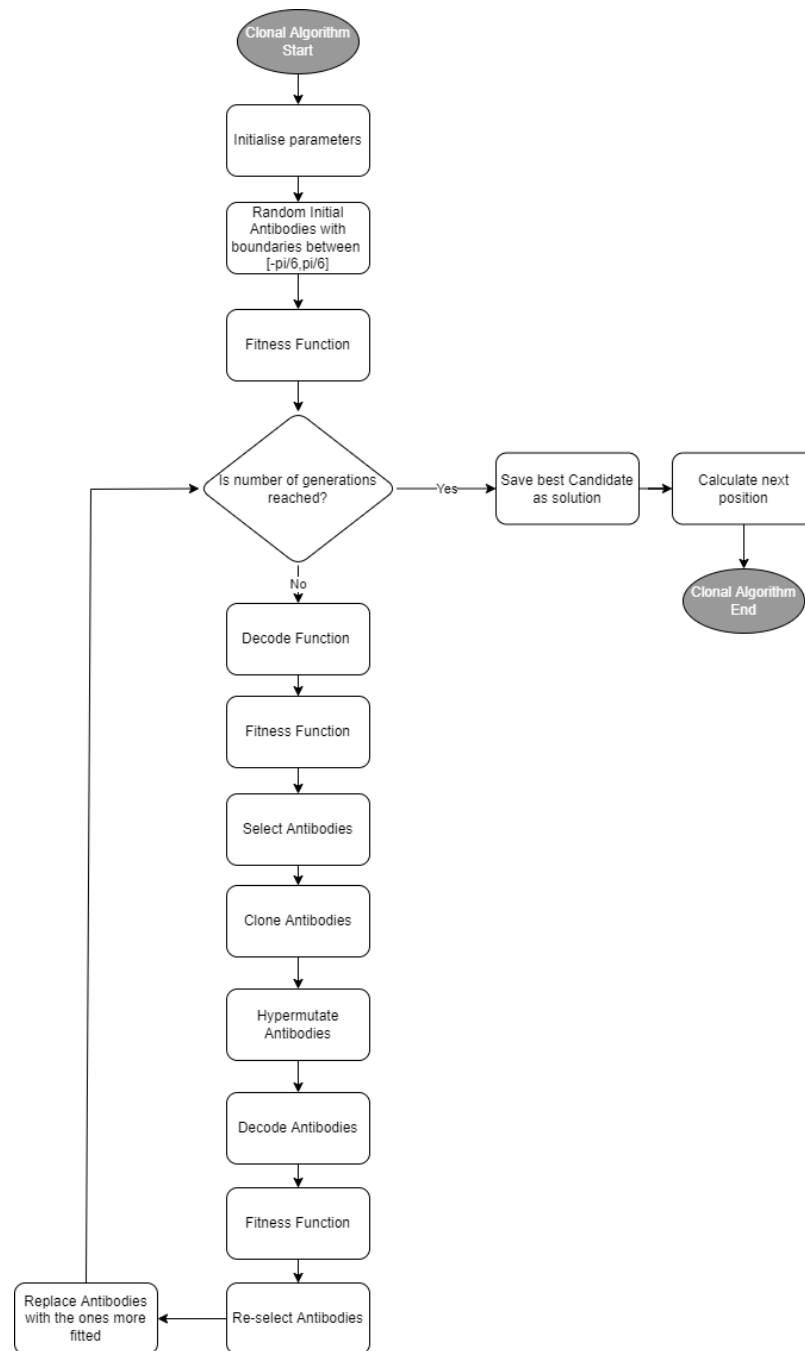
Q: η γωνία προσέγγισης.

Αλγόριθμος Τεχνητού Ανοσοποιητικού Συστήματος

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η μοντελοποίηση του τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος έχει δύο πτυχές. Σε αυτή την εφαρμογή μας αφορά η δημιουργία ενός αλγορίθμου με σκοπό την επίλυση υπολογιστικών προβλημάτων και πιο συγκεκριμένα προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Στην παρούσα μοντελοποίηση, εισάγεται μια νέα συνάρτηση αξιολόγησης (Xu et al., 2014) που ονομάζεται συνάρτηση «γενικευμένου» κόστους. Τη στιγμή που θα υπολογιστεί για πρώτη φορά ρίσκο σύγκρουσης, ξεκινά το πρόγραμμα βελτιστοποίησης. Έπειτα, δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός της στρατηγικής αποφυγής σύγκρουσης. Η καταλληλότητα των αντισωμάτων υπολογίζεται προκειμένου να αξιολογηθεί ο βαθμός ασφάλειας, η οικονομική απόδοση και η ομαλότητα της αλλαγής πορείας. Ακόμα, υιοθετούνται ενέργειες για την ενημέρωση του πληθυσμού και την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής για τον πλοηγό.

Έπειτα από την ανίχνευση του σεναρίου προσέγγισης των δύο πλοίων, ανάλογα με τη γωνία κατεύθυνσης και τη σχετική γωνία των δύο πλοίων, ξεκινούν οι ανάλογες ενέργειες αποφυγής της σύγκρουσης με λειτουργία του αλγορίθμου τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος CLONALG. Ο αλγόριθμος λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου τα χαρακτηριστικά της κίνησης των δύο πλοίων. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 13):



Σχήμα 13: Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου

Οι κύριες πτυχές του ανοσοποιητικού που λαμβάνονται υπόψη για την ανάπτυξη του αλγορίθμου είναι:

- 1) Η συντήρηση ενός συγκεκριμένου σετ μνήμης.
- 2) Επιλογή και κλωνοποίηση των αντισωμάτων που διεγέρθηκαν.
- 3) Εξάλειψη μη διεγερμένων αντισωμάτων.
- 4) Υπολογισμός συγγένειας και ωρίμανση.
- 5) Επανεπιλογή των κλώνων αναλογικά με την συγγένειά τους.

Ο CLONALG αποτελείται από δύο ομάδες πληθυσμών, τα αντιγόνα και τα αντισώματα, όταν αφορά την αναγνώριση μοτίβου και αντισώματα και συνάρτηση κόστους, όταν η εφαρμογή αφορά τη βελτιστοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, ως αντιγόνο, θεωρείται η συνάρτηση «γενικευμένου» κόστους και καλούμαστε να την εξαλείψουμε. Ως αντίσωμα θεωρείται εκείνη η γωνία που θα ελαχιστοποιήσει αυτή τη συνάρτηση. Η γωνία αυτή θα αντιπροσωπεύει και τη βέλτιστη λύση. Το σύνολο των αντισωμάτων καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας διασπάται σε υποσύνολα ανάλογα με την υπό μελέτη εφαρμογή. Το κριτήριο τερματισμού είναι ο μέγιστος αριθμός γενεών που ορίζεται από το χρήστη. Είναι αναγκαία η ορθή επιλογή της τιμής αυτής, καθώς η υποεκτίμηση της μπορεί να σημαίνει μη εύρεση της βέλτιστης λύσης, ενώ η υπερεκτίμηση να επιβραδύνει σημαντικά τον αλγόριθμο στον τερματισμό και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και στις επόμενες διεργασίες. Περαιτέρω ανάλυση των παραμέτρων και της σημασίας τους γίνεται στην ανάλυση ευαισθησίας στο Κεφάλαιο 5.

Για την επίτευξη της αποφυγής, τρία είδη λειτουργιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν: η αλλαγή πορείας, η επιβράδυνση και αλλαγή πορείας. Κατά την ενέργεια της αποφυγής, δύο είδη μεταβλητών μπορούν να επηρεάσουν την κατάσταση. Η πρώτη μεταβλητή είναι το πηδάλιο του οποίου η συμπεριφορά επηρεάζει τις αλλαγές στην πορεία ενός πλοίου. Η δεύτερη μεταβλητή είναι η ταχύτητα του πλοίου, του οποίου ο εσωτερικός έλεγχος είναι η ταχύτητα του από τον κύριο κινητήρα. Σύμφωνα με τους Wu & Wang (1986), η αποφυγή σύγκρουσης με μεταβολή της κατεύθυνσης υιοθετείται με πιθανότητα 100% σε μετωπική κατάσταση, 94,2% σε κατάσταση διέλευσης και 96,4% σε κατάσταση προσπέρασης. Σύμφωνα με τον Hai (1991), η αποφυγή σύγκρουσης με αλλαγή πορείας υιοθετείται με πιθανότητα 100%. Επομένως, η αποφυγή σύγκρουσης του με αλλαγή πορείας, υιοθετείται για την επίτευξη του στόχου.

Επιπλέον, η επιβράδυνση και η αντιστροφή της μηχανής χρησιμοποιούνται σε στενές καταστάσεις.

Στον CLONALG, ο χώρος της λύσης αντιπροσωπεύεται από το αντίσωμα. Επομένως, η γωνία του πλοίου που κωδικοποιείται ως αντίσωμα. Η κωδικοποίηση του αντισώματος σε 44 δυαδικά ψηφία επιλέγεται ίδια σύμφωνα με την εφαρμογή του Franco (2020) και εξασφαλίζει τη μοναδικότητα του αντισώματος, αφού με αυτό τον αριθμό μπορούν να κωδικοποιηθούν μέχρι 2^{44} διαφορετικά αντισώματα. Ο χώρος λύσης αυτών των αντισωμάτων είναι εντός του ορίου $[-\pi/3, \pi/3]$. Πιο συγκεκριμένα, κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου δημιουργείται αριθμός τυχαίων αρχικών αντισωμάτων σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν ορισθεί με τυχαία κωδικοποίηση 0 και 1 σε διανύσματα 44 ψηφίων. Η αποκωδικοποίηση αυτών σε γωνίες γίνεται μέσω της συνάρτησης *decode* που φαίνεται παρακάτω.

```
function z = decode(Ab,varMin,varMax)

    Ab = flip1r(Ab);
    s = size(Ab);
    aux = 0:1:21;
    aux = ones(s(1),1)*aux;
    x1 = sum((Ab.*2.^aux),2);

    % Keeping values between bounds
    z = varMin + x1' .* (varMax - varMin)/(2^22 - 1);

end
```

Η παρούσα χρήση του αλγορίθμου αφορά τη βελτιστοποίηση μια συνάρτησης κόστους. Η συνάρτηση κόστους χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του αντισώματος που είναι περισσότερο πιθανό να βρίσκεται ή κοντά στη βέλτιστη λύση είτε να είναι πραγματικά η βέλτιστη λύση. Τα αντισώματα με την υψηλότερη τιμή αξιολόγησης επιλέγονται για την επόμενη γενιά με μεγαλύτερη πιθανότητα. Αντίθετα, τα αντισώματα με τη χαμηλότερη τιμή αξιολόγησης έχουν μικρότερη πιθανότητα κλωνοποίησης στην επόμενη γενιά. Έτσι, η σύνθεση της αξιολόγησης θα επηρεάσει την απόδοση σύγκλισης και την ικανότητα εύρεσης του βέλτιστου σημείου. Η συνάρτηση είναι αναγκαίο να συγκλίνει στην εύρεση της βέλτιστης λύσης, ταυτόχρονα με την απλούστευση των υπολογισμών για την ανίχνευση αυτής.

Ο στόχος του αλγορίθμου είναι να βρίσκει κάθε στιγμή το σημείο που μπορεί να βοηθήσει το πλοίο να επιτύχει ασφαλή και οικονομική αποφυγή σύγκρουσης (Perera, Carvalho, & Guedes Soares, 2011). Κατά συνέπεια, η συνάρτηση κόστους περιλαμβάνει παράγοντες ασφάλειας οικονομίας, αλλά και ομαλότητας (Yavin, Frangos, Miloh, et al., 1997). Σε αυτή τη μοντελοποίηση, η συνάρτηση αξιολόγησης περιλαμβάνει τρία μέρη. Πιο συγκεκριμένα, στοιχεία ασφάλειας (για τον κίνδυνο σύγκρουσης), οικονομικούς παράγοντες (Szlarczyński, 2011) (π.χ. απόσταση προς τον στόχο), και ο παράγοντας ομαλότητας (αποφυγή μεγάλων γωνιών αλλαγής πορείας).

1) Παράγοντας ασφάλειας

$$f_{safe} = \frac{1}{1 + \frac{D_{min}}{\min(RT)}} \quad (35)$$

Όπου D_{min} =Η ελάχιστη δυνατή απόσταση διέλευσης.

RT = Η απόσταση των πλοίων.

2) Παράγοντας Οικονομίας

$$f_{economy} = \frac{1}{1 + S} \quad (36)$$

Όπου S = Η απόσταση του πλοίου από το σημείο στόχου.

3) Παράγοντας ομαλότητας

$$f_{smooth} = \frac{1}{1 + \Delta\phi} \quad (37)$$

Όπου $\Delta\phi$ = Η στροφή του πλοίου από την πορεία του

Επομένως, η συνολική συνάρτηση κόστους μετά την ενσωμάτωση και των τριών μερών δίνεται από:

$$f = w_1 * f_{safe} + w_2 * f_{economy} + w_3 * f_{smooth} \quad (38)$$

Σημαντική είναι η ορθή επιλογή των επιμέρους βαρών της συνάρτησης κόστους (Πίνακας 6). Για την επιλογή των τιμών των w_1, w_2, w_3 χρειάστηκε να πραγματοποιηθεί μεγάλος αριθμός εκτελέσεων του προγράμματος έτσι ώστε η συνάρτηση να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο ως προς την ασφάλεια, όσο και ως προς την οικονομία και ομαλότητα της αποφυγής σύγκρουσης. Πιο συγκεκριμένα, χρειάστηκαν να βρεθούν οι τιμές των βαρών που θα δίνουν

μεγάλες γωνίες όταν χρειάζεται άμεση αποφυγή της σύγκρουσης αλλά θα δίνουν και μικρές γωνίες μόλις διαπιστωθεί ότι υπάρχει ασφαλής απόσταση. Οι τιμές που επιλέχθηκαν φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 6: Βάρη συνάρτησης κόστους

Factors	W ₁	W ₂	W ₃
Weight	0.2667	0.3667	0.3667

Στον αλγόριθμο, ορίζεται το μέγεθος του πληθυσμού στο 30, οι γενιές αντισωμάτων ορίζονται στις 30, τα αντισώματα είναι κωδικοποιημένες γωνίες σε διανύσματα γραμμής με 44 ψηφία κωδικοποίησης, και η πιθανότητα μετάλλαξης ορίζεται στο 0.1, το ποσοστό κλώνων ορίζεται στο 0,1, και το ποσοστό του πληθυσμού που θα υποστεί τυχαίο ανασχηματισμό πάλι 0.1 (Πίνακας 7).

Πίνακας 7: Παράμετροι αλγόριθμου CLONALG

Αριθμός πληθυσμού (N)	Κωδικοποίηση Αντισωμάτων	Γενιές αντισωμάτων (Gen)	Πιθανότητα μετάλλαξης (Pm)	Πληθυσμός τυχαίου ανασχηματισμού (d)	Αναλογία κλώνων (beta)	Περιθώρια γωνίας
30	Random([0,1],N,44)	30	0.1	0.1	0.1	[-π/3, π/3]

Η συνάρτηση του αλγορίθμου κλωνικής επιλογής, προτού εφαρμοσθεί στο παρών πρόβλημα, δοκιμάστηκε για εύρεση του ελάχιστο σημείου μια σειράς συναρτήσεων με ικανοποιητικά αποτελέσματα με τα παραπάνω δεδομένα για τις παραμέτρους. Δύο παραδείγματα παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5, όπου οι συναρτήσεις που εξετάστηκαν είναι γνωστές ως *Griewank Function* και *Ackley Function*.

Σε κάθε στάδιο μετατόπισης του πλοίου σύμφωνα με τη γωνία που επιλέχθηκε από τον CLONALG, γίνεται εκ νέου ανάλυση και υπολογισμός όλων των παραμέτρων σύγκρουσης. Όταν η απόσταση του πλοίου OS από το TS γίνει μεγαλύτερη του Ship Domain και έχει προσπεραστεί το πλοίο, θεωρούμε ότι η διαδικασία αποφυγής σύγκρουσης ήταν επιτυχής.

Σε τελικό στάδιο, εκ νέου, ο αλγόριθμος VO, έχει ως στόχο τη χάραξη ενός νέου μονοπατιού μεταξύ τη θέσης του πλοίου μετά την αποφυγή σύγκρουσης και του σημείου στόχου. Μόλις επιτευχθεί ο στόχος, εκτυπώνονται γραφήματα για τις παραμέτρους της κίνησης.

4.4 Αποτελέσματα Κώδικα

Παρακάτω ακολουθεί η αναπαράσταση στιγμιότυπων από την εκτέλεση του κώδικα, και επεξήγηση της λειτουργίας του.

Σε πρώτο στάδιο (Εικόνα 26), γίνεται ερώτηση στο χρήστη για το σενάριο που θέλει να εξετασθεί. Τα σενάρια που εξετάζονται είναι το Head-On (Μετωπικό σενάριο), το Cross-Right (Σενάριο προσέγγισης από δεξιά), το Cross-Left (Σενάριο προσέγγισης από αριστερά) και το Overtake (Σενάριο προσπέρασης). Το παρών δεδομένο εισόδου, δεν δίνει στον αλγόριθμο γνώση της προσέγγισης. Η λειτουργία του είναι να μεταβάλει την αρχική θέση και το διάνυσμα της ταχύτητας του TS ανάλογα με το σενάριο που θέλουμε να εξετασθεί. Η αναγνώριση του σεναρίου από τον αλγόριθμο γίνεται σε επόμενο στάδιο.

```

Command Window
Which scenario to test?
1:HeadOn, 2:Cross Right, 3:Cross Left, 4:Overtake
fx type_of_encounter

```

Εικόνα 26: Αρχή του αλγορίθμου

Όταν ο χρήστης δώσει τη μεταβλητή εισόδου ξεκινάει το Offline Path Planning του αλγορίθμου. Η αναπαράσταση γίνεται σε έναν χάρτη μεγέθους (1000x200). Το OS ξεκινάει από το σημείο (0,0) και επιθυμεί την ασφαλή μετάβαση στο σημείο (1000,0). Η ταχύτητα OS θεωρείται 3 (m/s) (Πίνακας 8). Τα στατικά εμπόδια (Πίνακας 9) θεωρούνται ως ελλείψεις με μεγάλο άξονα που ορίζεται ως *Radius* και μικρό άξονα ίσο με $Radius/2$. Ακόμα, λαμβάνουν τις ίδιες συντεταγμένες για όλα τα σενάρια σύγκρουσης που θα εξετασθούν .

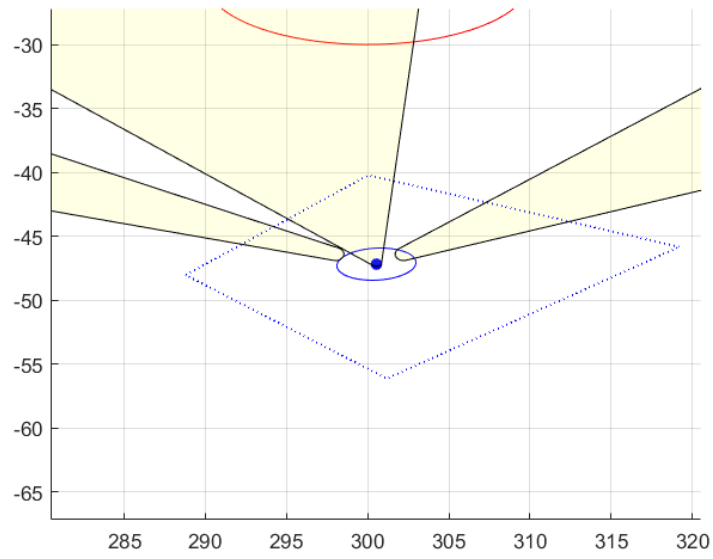
Πίνακας 8: Δεδομένα χάρτη και πλοίου

Starting Point	(0,0)
Goal Point	(1000,0)
Velocity OS	3 m/s

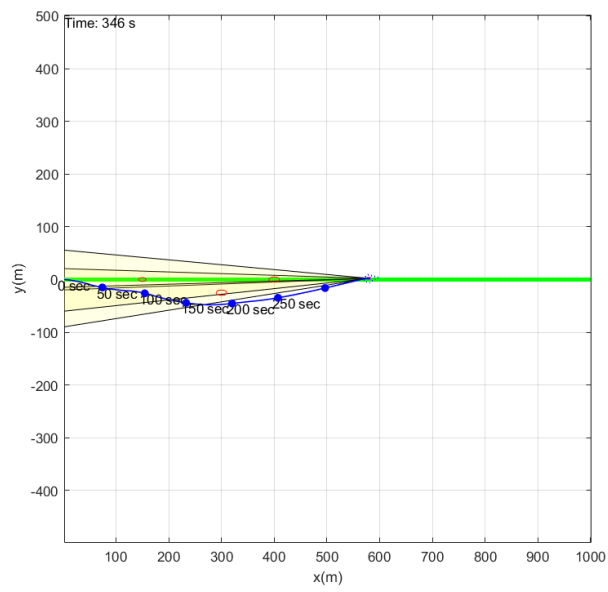
Πίνακας 9: Θέσεις στατικών αντικειμένων

Static Obstacle 1	
Position	(150,0)
Radius	7m
Static Obstacle 2	
Position	(300,-25)
Radius	10m
Static Obstacle 3	
Position	(400,0)
Radius	10

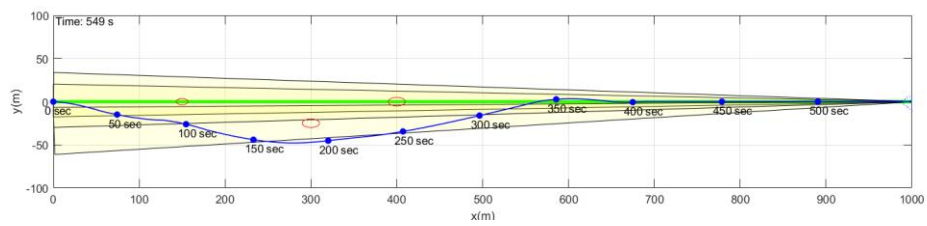
Στην Εικόνα 27, φαίνεται το OS, το Ship Domain, καθώς και τα «collision cones» υπεύθυνα για την ασφαλή εύρεση πορείας σε ένα τυχαίο σημείο της κίνησης. Αντίστοιχα, στην Εικόνα 28 απεικονίζεται ολόκληρος ο χάρτης με στιγμιότυπο σε ένα τυχαίο σημείο της πορείας και σε τελικό στάδιο όπου έχει υπολογιστεί όλη η τροχιά του πλοίου OS για αποφυγή των στατικών εμποδίων και επίτευξη του στόχου (Εικόνα 29). Όπως αναγράφεται, στο παρών μοντέλο πλοίου, θα χρειάζονταν 549 δευτερόλεπτα να διανύσει την αρχική απόσταση των 1000m με ταχύτητα 3 m/s να ολοκληρώσει την ασφαλή μετάβαση. Ακόμα, φαίνεται και μια σειρά δεδομένων για τα σημεία διέλευσης και τις γωνίες κατεύθυνσης που όρισε ο αλγόριθμος (Πίνακας 10).



Εικόνα 27: Κώνοι σύγκρουσης (Collision Cones)



Εικόνα 28: Χάρτης, Διαδρομής, Εμπόδια, Κώνοι Σύγκρουσης σε τυχαίο σημείο

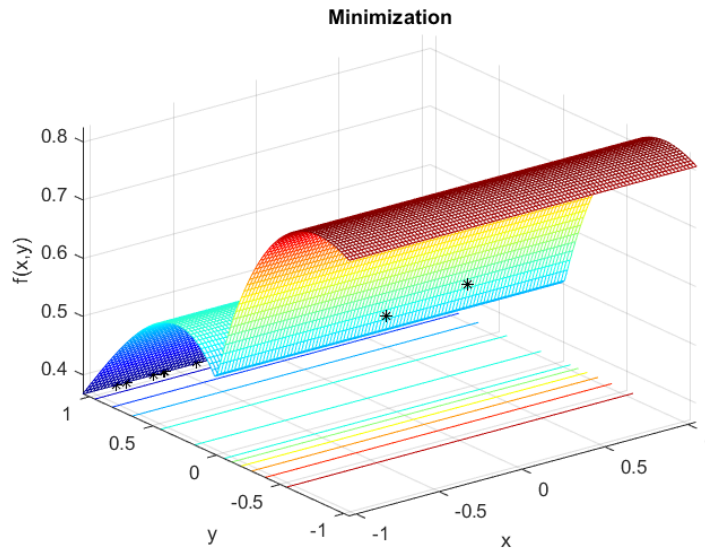


Εικόνα 29: Τελική Τροχιά Πλοίου

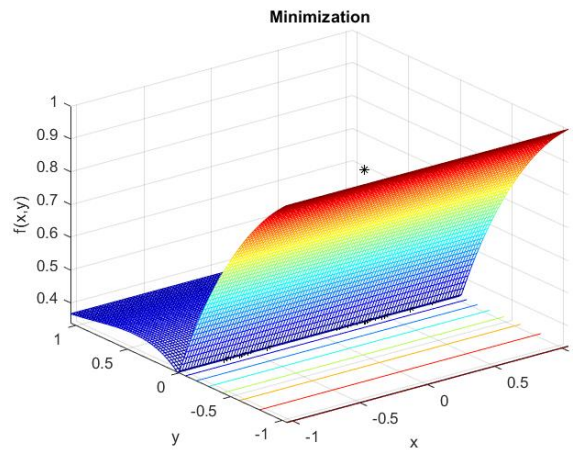
Πίνακας 10: Υποδειγματικά Σημεία διέλευσης

Waypoint #	Waypoint X	Waypoint Y	Heading Angle
1	0	0	0
2	1.48	-0.08	-0.05
3	2.96	-0.17	-0.06
4	4.43	-0.28	-0.07
5	5.91	-0.40	-0.08
6	7.39	-0.54	-0.09
7	8.87	-0.69	-0.10
8	10.35	-0.86	-0.11
9	11.83	-1.03	-0.12
10	13.30	-1.23	-0.13
11	14.78	-1.43	-0.14
12	16.26	-1.65	-0.15
13	17.74	-1.88	-0.15
14	19.22	-2.12	-0.16
15	20.69	-2.37	-0.17
16	22.17	-2.63	-0.18
17	23.65	-2.91	-0.18
18	25.13	-3.19	-0.19

Στο επόμενο στάδιο, ξεκινάει η πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο του OS. Μετά την ανίχνευση του κινδύνου, η συνάρτηση του CLONALG, είναι υπεύθυνη σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε να εντοπίσει το αντίσωμα που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους. Η γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης αυτής φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 30), όπου με μαύρους αστερίσκους διακρίνονται τα αντισώματα που εξετάζονται σε κάθε θέση. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 31, οι τιμές της συνάρτησης μεταβάλλονται λόγω μεταβολής των μελών που την δομούν ($f_{safe}, f_{economy}, f_{smooth}$), με αποτέλεσμα να αλλάζει το ελάχιστο της. Η αναπαράσταση γίνεται για ένα τυχαίο σημείο της διαδρομής. Αυτό συμβαίνει καθώς πλέον έχει μειωθεί το ρίσκο σύγκρουσης αλλά δεν έχει ολοκληρωθεί η αποφυγή. Έτσι, επιθυμούμε τη πλοήγηση σε τροχιά παράλληλη της αρχικά βέλτιστης, δηλαδή γωνία 0 μοιρών. Τα σημεία όπου το γράφημα της συνάρτησης έχει κόκκινη απόχρωση είναι οι χειρότερες γωνίες που μπορούν να επιλεγούν, ενώ με μπλε οι καλύτερες γωνίες για την αποφυγή της σύγκρουσης.

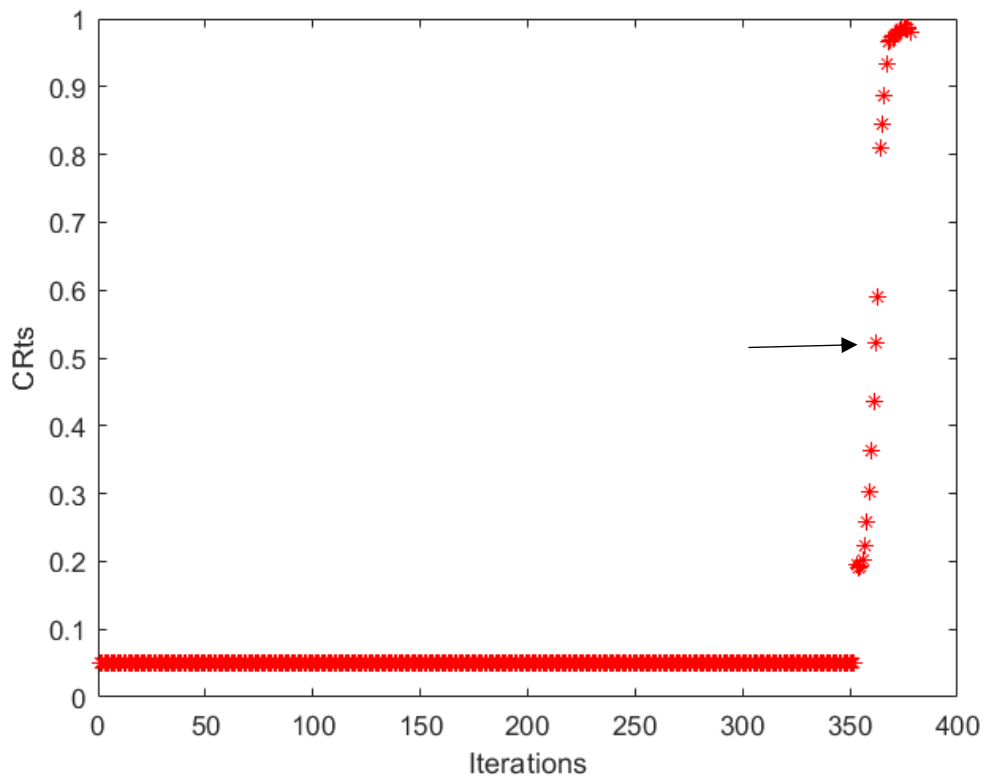


Εικόνα 30: Συνάρτηση κόστους κατά την 1η επανάληψη (HEAD ON)

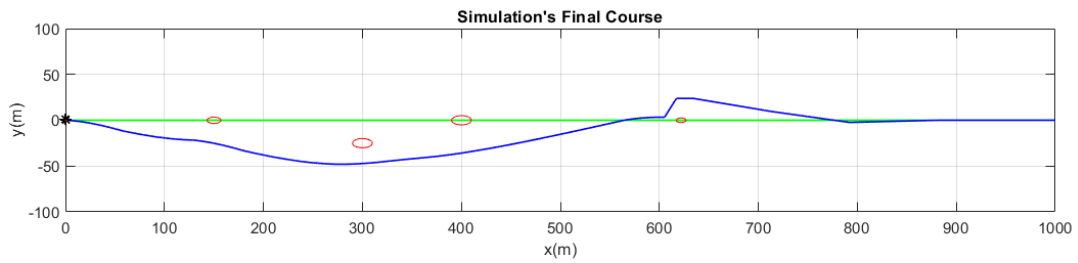


Εικόνα 31: Διατήρηση πορείας για οικονομία (HEAD ON)

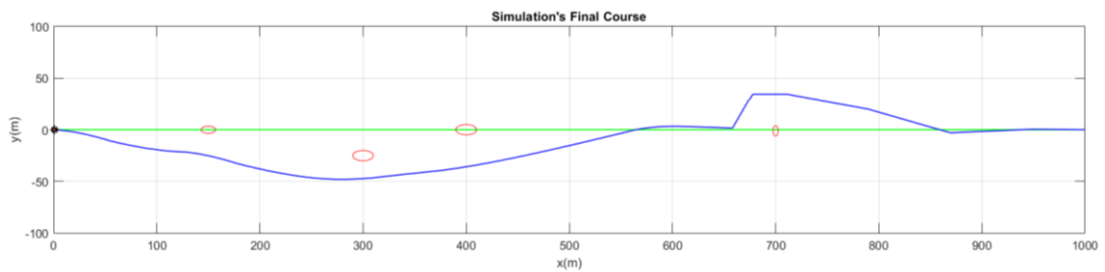
Μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων (Head-On:21) της συνάρτησης του CLONALG, το OS καταφέρνει να αποφύγει επιτυχώς τη σύγκρουση. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η έναρξη εκ νέου του αλγόριθμου VO με σκοπό την εύρεση μονοπατιού μεταξύ του σημείου που αποφεύχθηκε η σύγκρουση και του σημείου στόχου. Οι τιμές του CRts και ιδιαίτερα η τιμή που πυροδότησε την έναρξη του αλγορίθμου CLONALG φαίνεται στην Εικόνα 32. Οι τέσσερις διαφορετικές πορείες του OS ανάλογα με το σενάριο που εξετάζεται παρατίθενται στις Εικόνες 33-36.



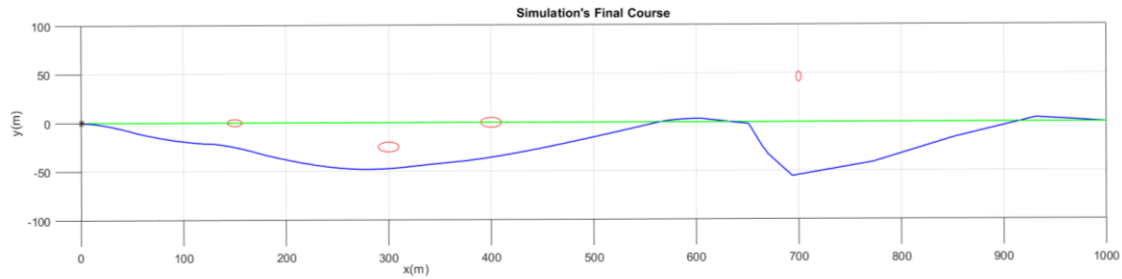
Εικόνα 32: Τιμή ρίσκου συναρτήσει των επαναλήψεων



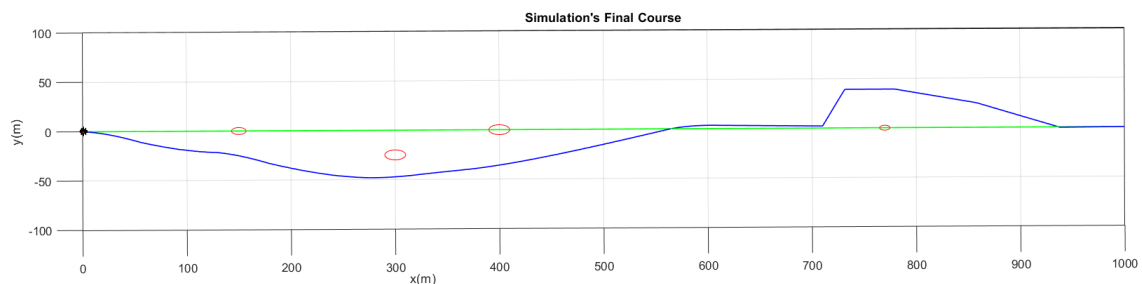
Εικόνα 33: Πορεία πλοίου Head-On



Εικόνα 34: Πορεία πλοίου Cross-right



Εικόνα 35: Πορεία πλοίου Cross-left



Εικόνα 36: Πορεία πλοίου Overtake

Head-On: Λόγω του προβλήματος βελτιστοποίησης, επιλέγεται η γωνία που θα αποφευχθεί πιο γρήγορα η σύγκρουση. Με αποτέλεσμα να επιλέγεται η στροφή στο αριστερό μέρος, λόγω της σχετικής θέσης των δύο πλοίων.

Cross-right: Το πλοίο επιλέγει να περάσει από τη πλώρη του TS. Η επιλογή έχει βάση στην μεγαλύτερη ταχύτητα του OS και στην επίτευξη ασφαλούς απόστασης.

Cross-left: Λόγω της βελτιστοποίησης επιλέγεται στροφή κατά το δεξιό μέρος και αποφυγή της σύγκρουσης παρά την μη υπευθυνότητα του να αποφύγει τη σύγκρουση.

Overtake: Το OS επιλέγει πορεία με αριστερή στροφή, γίνεται προσπέραση του TS με παράλληλη πορεία και επιστροφή στην αρχική του πορεία μετά τη προσπέραση.

Η σύγκριση της συμπεριφοράς του μοντέλου σε σχέση με τους COLREGs σχολιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

Απόδοση

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα για την απόδοση της εφαρμογής:

- Ο συνδυασμός των αλγορίθμων VO και CLONALG είναι ικανός να βρει μια ασφαλή τροχιά για το πλοίο σε καταστάσεις είτε με στατικά εμπόδια, είτε με προσέγγιση δυναμικών εμποδίων και η αποφυγή αυτών.
- Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου VO είναι τα 75.1 δευτερόλεπτα. Σε αυτό το χρόνο περιλαμβάνεται και η κίνηση του πλοίου από το σημείο εκκίνησης στο σημείο

τερματισμού. Υπολογίστηκε ότι το πλοίο στον παρών χάρτη χρειάζεται 549 δευτερόλεπτα για τη μετάβαση.

- Όσον αφορά τον αλγόριθμο CLONALG παρατηρείται ότι καθόλη τη διάρκεια της αποφυγής σύγκρουσης δεν παραβιάζεται ο χώρος του Ship Domain και ο απαιτούμενος χρόνος για την εκτέλεση του είναι κατά μέσο όρο τα 5.9 δευτερόλεπτα ανά βήμα επανάληψης.

Ανάλυση Ευαισθησίας

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος κλωνικής επιλογής έχει στοχαστικές διαδικασίες επιλογής και εκτελεί μόνο μετάλλαξη (δεν υπάρχει διασταύρωση). Ως εκ τούτου, δεν είναι απαραίτητο να οριστεί μία πιθανότητα διασταύρωσης (crossover), που είναι συνήθης σε άλλους ΕΑ. Ωστόσο, έχει έναν αριθμό παραμέτρων που ορίζονται από το χρήστη και επηρεάζουν κυρίως: 1) την ταχύτητα σύγκλισης· 2) η υπολογιστική πολυπλοκότητα 3) την ικανότητά του να εκτελεί την αναζήτηση του ελαχίστου της συνάρτησης κόστους (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Παράμετροι CLONALG

N	Αριθμός Πληθυσμού
Ab	Μέγεθος αντισωμάτων
Gen	Αριθμός γενεών
Pm	Πιθανότητα μετάλλαξης
d	Πληθυσμός τυχαίου ανασχηματισμού
beta	Αναλογία κλώνων

Η ανάλυση ευαισθησίας έγινε για τρεις διαφορετικές τιμές των παραμέτρων. Οι επιλεγμένες τιμές κατά την εκτέλεση του κώδικα είναι οι εξής (Πίνακας 12):

Πίνακας 12: Τιμές Παραμέτρων CLONALG

N	Ab	Gen	Pm	d	Beta
30	44	30	0.1	0.1	0.1

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας την τιμή κάθε παραμέτρου ξεχωριστά και διατηρώντας τις τιμές των υπολοίπων σταθερές. Ο αριθμός του πληθυσμού (N) είναι υπεύθυνος για τον αριθμό των αντισωμάτων που ελέγχεται σε κάθε στάδιο από τη συνάρτηση «γενικευμένου» κόστους, η κωδικοποίηση των αντισωμάτων (Ab) αφορά τη μοναδικότητα του κάθε αντισώματος, ο αριθμός των γενεών (Gen) αφορά τις επαναλήψεις δημιουργίας αντισωμάτων, η πιθανότητα μετάλλαξης (Pm) μεταλλάσσει με μια συγκεκριμένη διαδικασία ποσοστό του επιλεγμένου πληθυσμού, ο πληθυσμός τυχαίου ανασχηματισμού (d) εισάγει τυχαία αντισώματα στο τέλος κάθε γενιάς και η αναλογία κλώνων (beta) επιλέγει ποσοστό των αντισωμάτων που θα κλωνοποιηθούν. Ο αριθμός του πληθυσμού (N) και ο αριθμός των γενεών (Gen) έλαβε τις τιμές 15,30,60,90, ενώ η πιθανότητα μετάλλαξης (Pm) και η αναλογία κλώνων (beta) έλαβαν τις τιμές 0.1, 0.5, 0.9. Το θεωρητικό ολικό ελάχιστο της συνάρτησης «γενικευμένου» κόστους είναι 0.

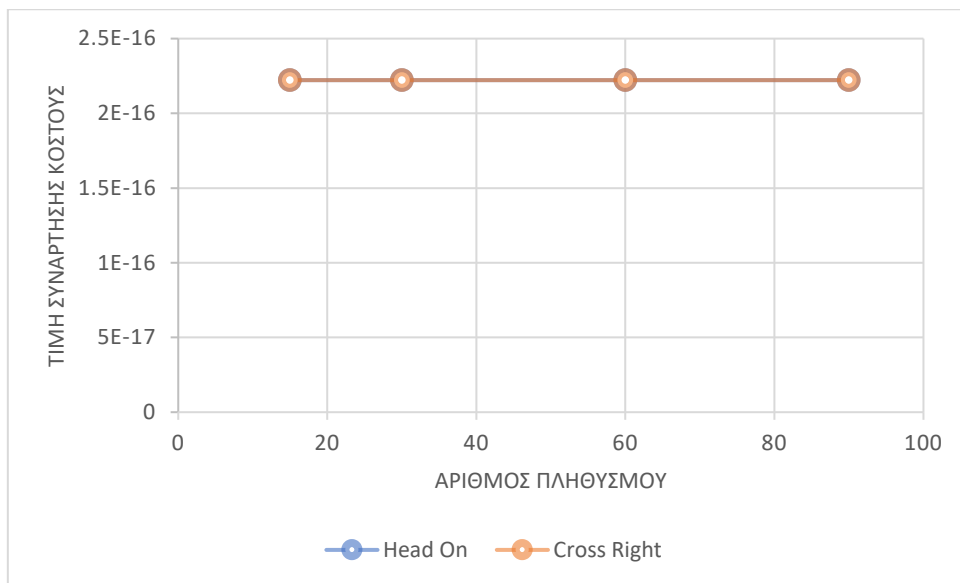
Τα μεγέθη που καταγράφονται σε κάθε επανάληψη αφορούν το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου CLONALG ανά επανάληψη σε seconds, και την τιμή της συνάρτησης κόστους. Επιθυμητή είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της

συνάρτησης κόστους. Η Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων φαίνεται στα Σχήματα 14-21, ενώ η αριθμητικές τιμές των αποτελεσμάτων βρίσκονται στο Παράρτημα.

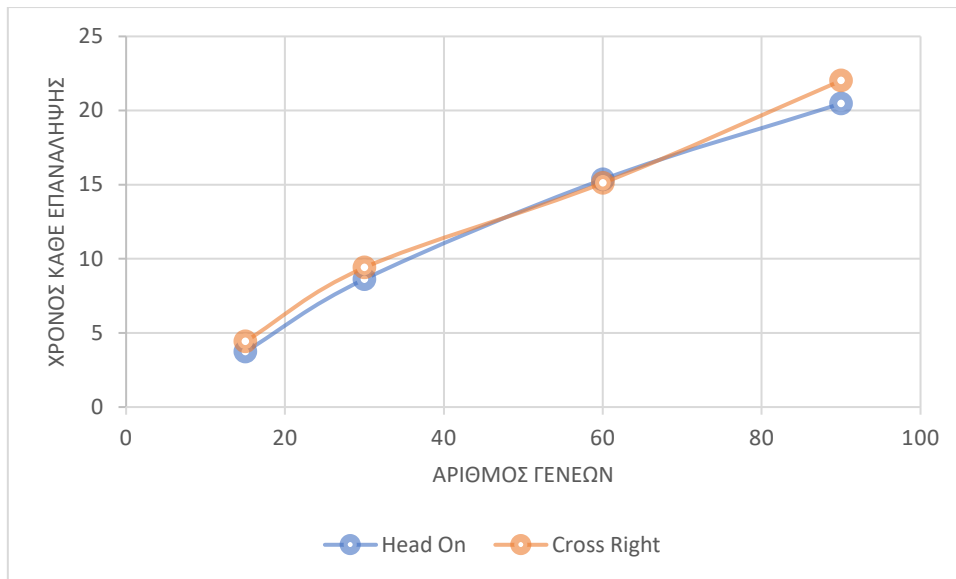
Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων



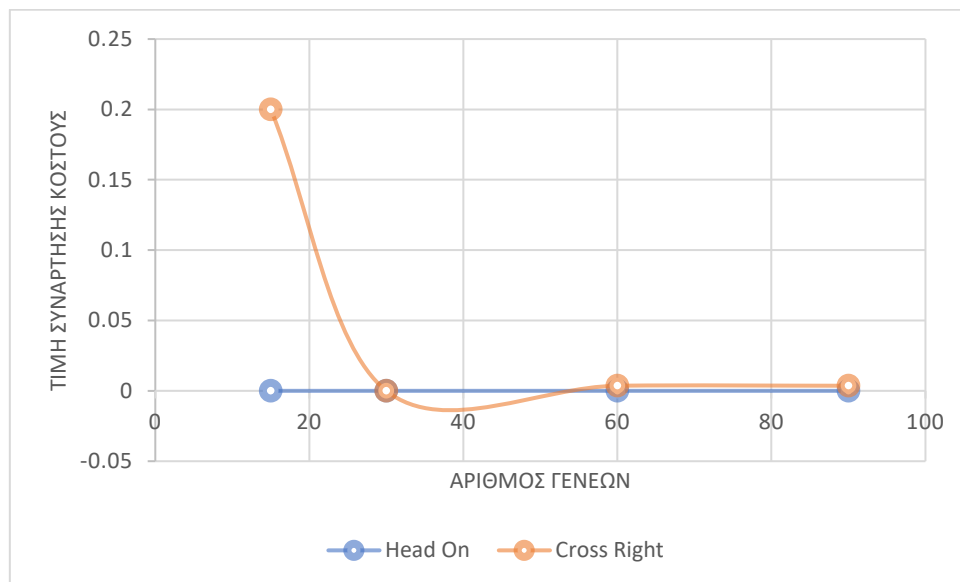
Σχήμα 14: Ανάλυση Ευαισθησίας Χρόνος Επανάληψης-Αριθμός Πληθυσμού



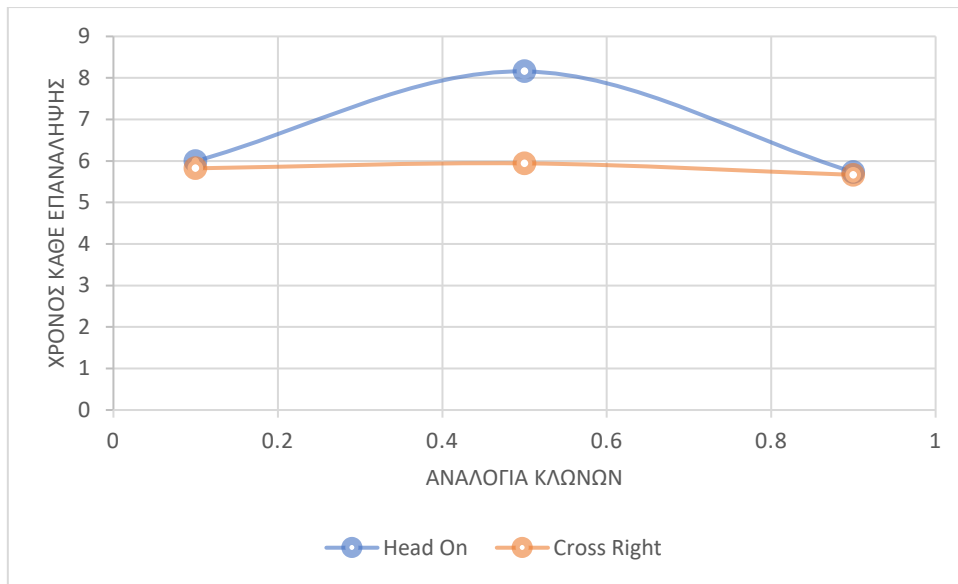
Σχήμα 15: Ανάλυση Ευαισθησίας Τιμής Συνάρτησης Κόστους-Αριθμός Πληθυσμού



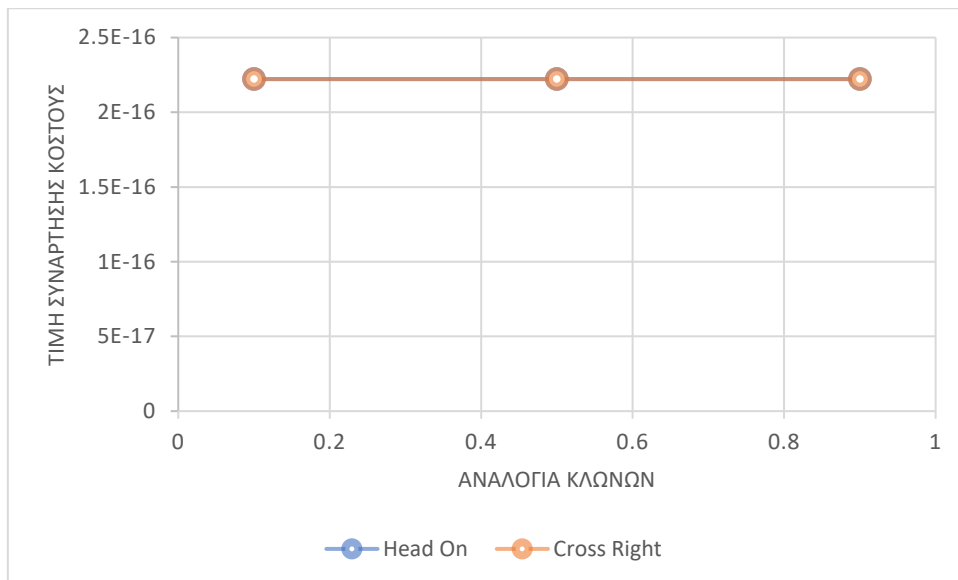
Σχήμα 16: Ανάλυση Ευαισθησίας Χρόνος Επανάληψης Κόστους-Αριθμού Γενεών



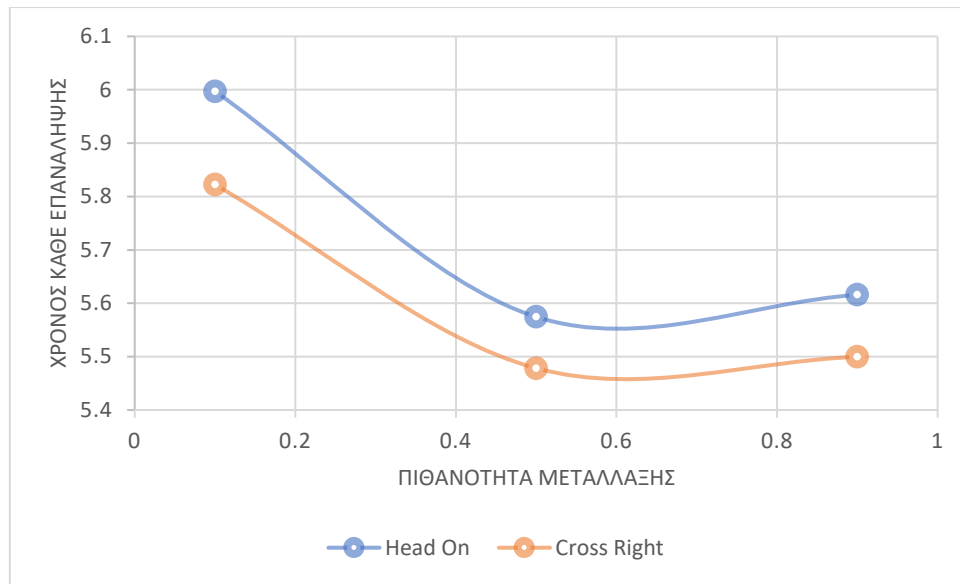
Σχήμα 17: Ανάλυση Ευαισθησίας Τιμής Συνάρτησης Κόστους-Αριθμού Γενεών



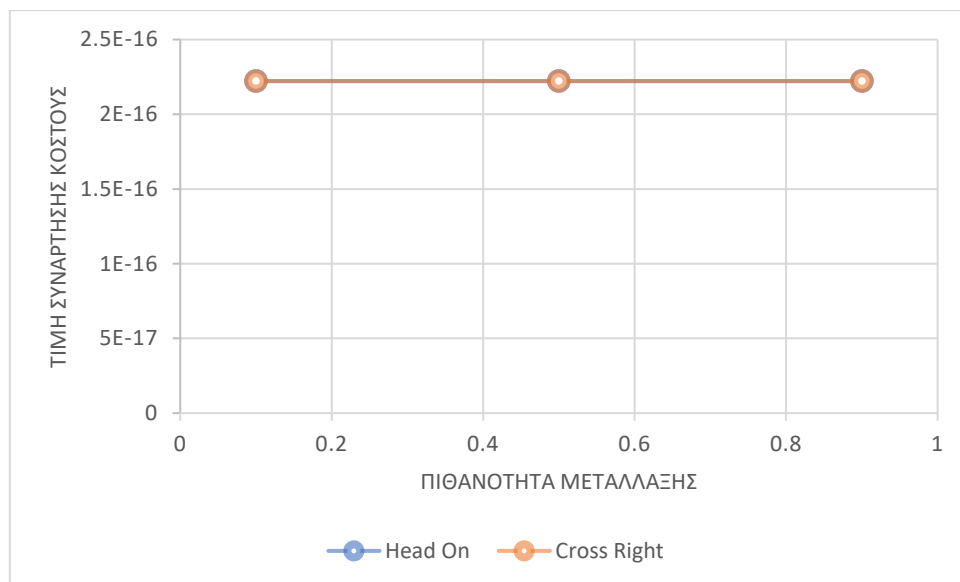
Σχήμα 18: Ανάλυση Ευαισθησίας Χρόνου Επανάληψης- Αναλογίας Κλώνων



Σχήμα 19: Ανάλυση Ευαισθησίας Τιμής Συνάρτησης Κόστους-Αναλογίας Κλώνων



Σχήμα 20: Ανάλυση Ευαισθησίας Χρόνου Επανάληψη -Πιθανότητας Μετάλλαξης

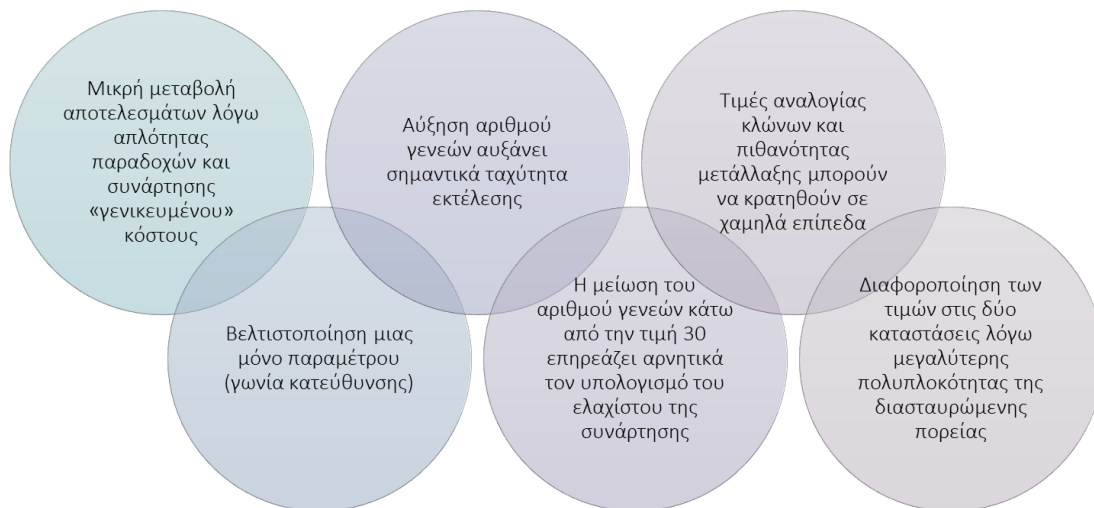


Σχήμα 21: Ανάλυση Ευαισθησίας Τιμή Συνάρτησης Κόστους-Πιθανότητα Μετάλλαξης

Παρατηρείται ότι αυξάνοντας τον αριθμό του πληθυσμού (N) και των γενεών (Gen), ο χρόνος εκτέλεσης του αλγόριθμου αυξάνεται σημαντικά. Η διαφορά αυτή διαδραματίζει σοβαρό ρόλο στην ταχύτητα του κώδικα αν συμπεριλάβει κανείς υπόψιν τον αριθμό των επαναλήψεων που χρειάζεται ο CLONALG για να βρει τη βέλτιστη πορεία κατά τη πλοήγηση, δεδομένου ότι η επανάληψη υλοποιείται για κάθε σημείο διέλευσης για το οποίο υπάρχει ακόμα κίνδυνος. Όπως φαίνεται, η τιμή της συνάρτησης κόστους δεν βελτιώνεται σημαντικά με την αύξηση αυτών των παραμέτρων στον αρχικό υπολογισμό και η χαμηλότερη τιμή της συνάρτησης κόστους επιτυγχάνεται για όλες τις τιμές των παραμέτρων.

Οι τιμές των παραμέτρων τόσο της αναλογίας κλώνων (beta) και πιθανότητας μετάλλαξης, δεν επηρεάζουν την ταχύτητα εκτέλεσης του κώδικα, επίσης δεν φαίνεται σημαντική αλλαγή στις τιμές της συνάρτησης κόστους. Ο αριθμός των αναγκαίων επαναλήψεων δεν μεταβάλλεται αισθητά και κυμαίνεται κοντά στις 21 επαναλήψεις για Head-On και 41 για Cross-Right.

Η μικρή μεταβολή των αποτελεσμάτων φαίνεται να είναι αποτέλεσμα της απλότητας και των παραδοχών της συνάρτησης κόστους. Ο αλγόριθμος CLONALG είναι ικανός να επιλύει σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών μεταβλητών. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η μοντελοποίηση γίνεται για τη βελτιστοποίηση μιας και μόνης παραμέτρου, της γωνίας κατεύθυνσης, που σε συνδυασμό με την μαθηματική απλότητα της συνάρτησης κόστους καθιστά την εύρεση του ελαχίστου μια σχετικά απλή διαδικασία. Επομένως, ο αριθμός των γενεών και του πληθυσμού δεν χρειάζεται να είναι ιδιαίτερα μεγάλος, αφού η βέλτιστη τιμή βρίσκεται σχετικά γρήγορα. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων θα καθορίσει κυρίως τον χρόνο εκτέλεσης της συνάρτησης. Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων της αναλογίας κλώνων και πιθανότητας μετάλλαξης μπορούν επίσης να κρατηθούν σε χαμηλά επίπεδα, αφού ειδικά η πιθανότητα μετάλλαξης, είναι αυτή που δύναται να παρακάμψει ένα τοπικό ελάχιστο. Στην δική μας εφαρμογή φαίνεται να μην υπάρχουν πολλαπλά τοπικά ελάχιστα. Έτσι, οι τιμές των παραμέτρων που επιλέχθηκαν είναι οι προαναφερόμενες.



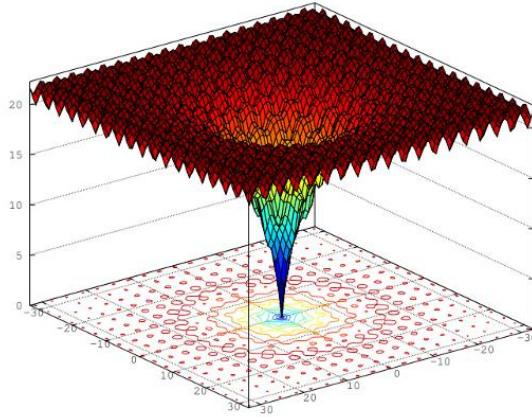
Εικόνα 37: Σχολιασμός Ανάλυσης Ευαισθησίας

Ελαχιστοποίηση συναρτήσεων δύο μεταβλητών

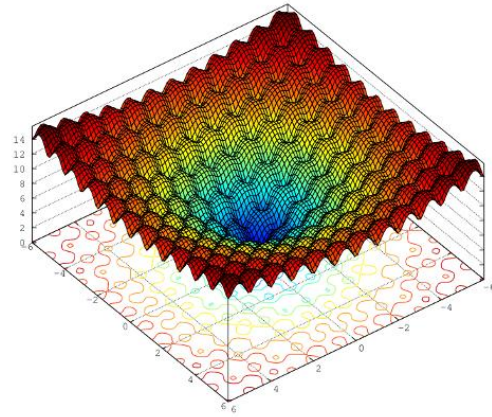
Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση του CLONALG εφαρμόστηκε σε συναρτήσεις δύο μεταβλητών με σκοπό την εύρεση του ολικού ελαχίστου της συνάρτησης. Οι συναρτήσεις που εξετάστηκαν είναι η *Ackley Function* και η *Griewank Function*. Στις Εικόνες 37-38 φαίνονται η πραγματική μορφή των συναρτήσεων και τα χαρακτηριστικά τους, ενώ στις παρακάτω εικόνες η γραφική απεικόνιση τους βάσει του αλγορίθμου, τα αντισώματα, και η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης, συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων-γενεών.

$$f(x) = 20 + e - 20e^{-\frac{1}{5}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)}$$

Dimensions: n
Domain: $-32.768 \leq x_i \leq 32.768$
Global Optimum: $f(x) = 0.0$ at $x = (0.0, 0.0, \dots, 0.0)$
Operator: AckleyEvaluator
Charts:



(a) [-32.768, 32.768]

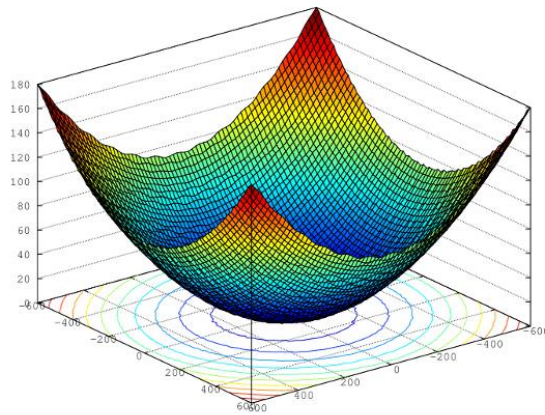


(b) [-6.0, 6.0]

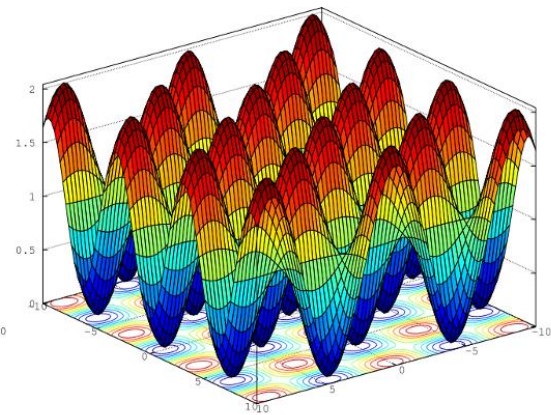
Εικόνα 38: Συνάρτηση Ackley

$$f(x) = 1 + \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right)$$

Dimensions: n
Domain: $-600.0 \leq x_i \leq 600.0$
Global Optimum: $f(x) = 0.0$ at $x = (0.0, 0.0, \dots, 0.0)$
Operator: GriewankEvaluator
Charts:



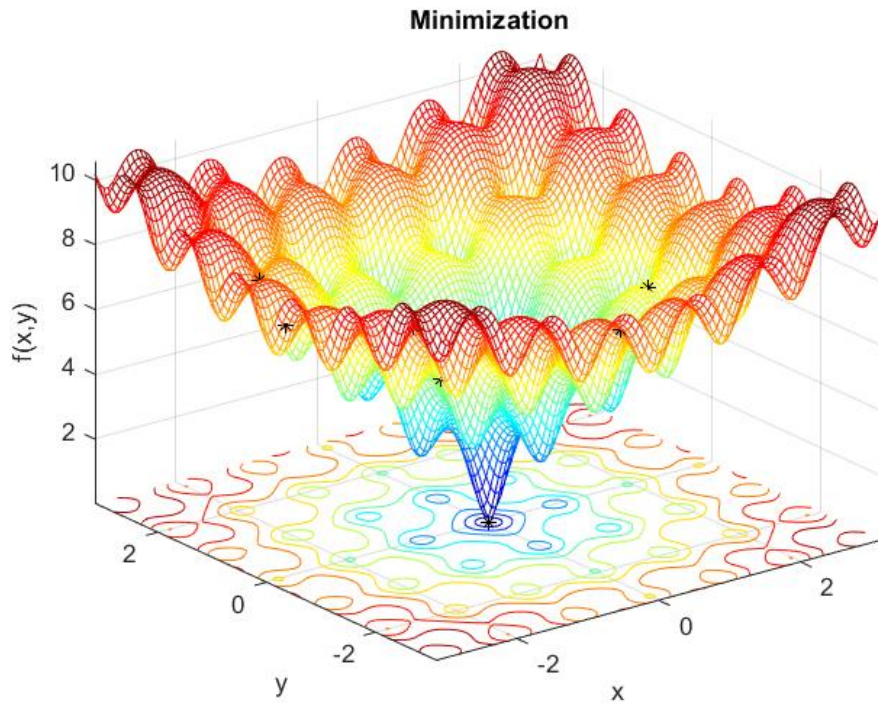
(a) [-600.0, 600.0]



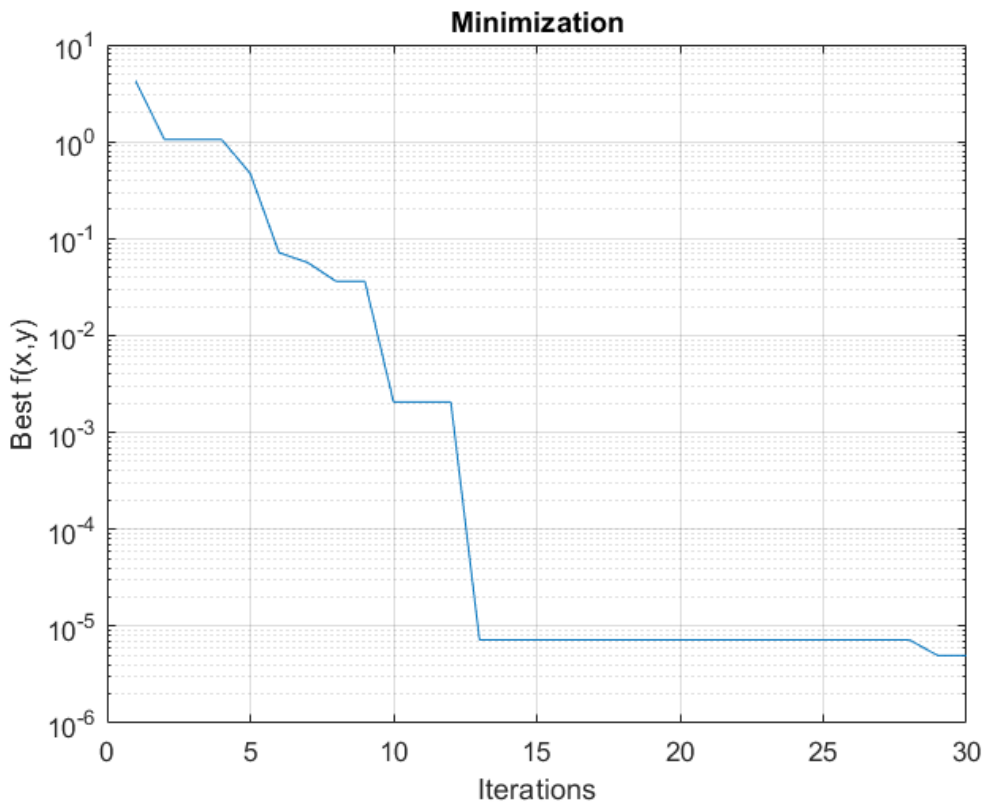
(b) [-10.0, 10.0]

Εικόνα 39: Συνάρτηση Griewank

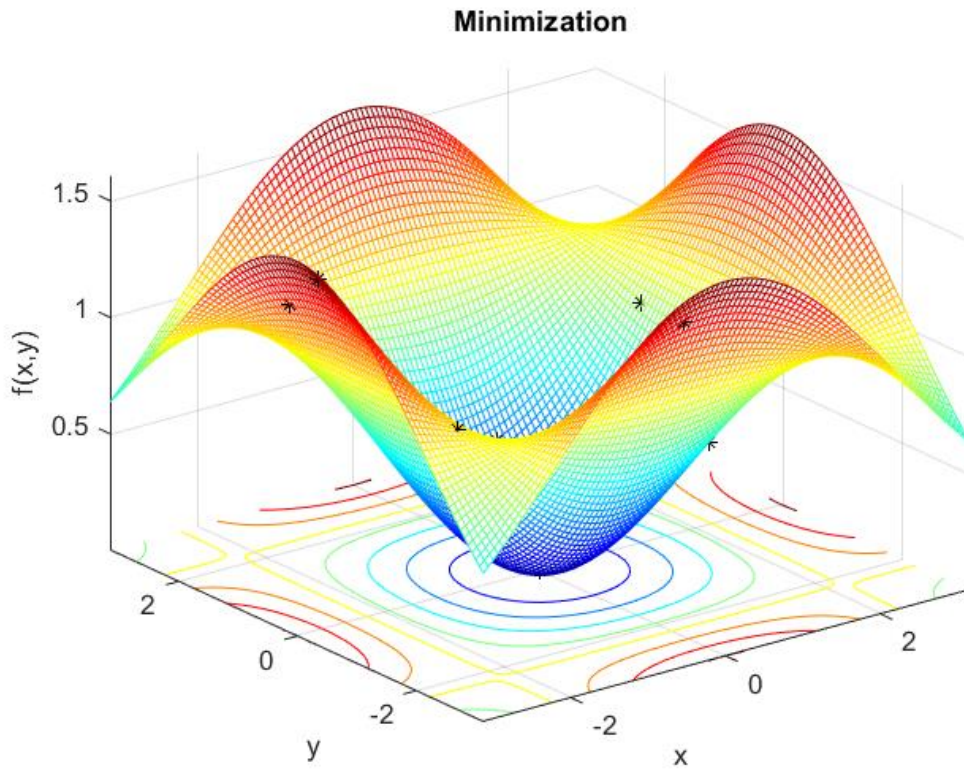
Τα αποτελέσματα μετά από την εκτέλεση του αλγόριθμου εύρεσης του ελάχιστου σημείου των δύο συναρτήσεων είναι τα εξής (Εικόνα 39; Εικόνα 40; Εικόνα 41; Εικόνα 42):



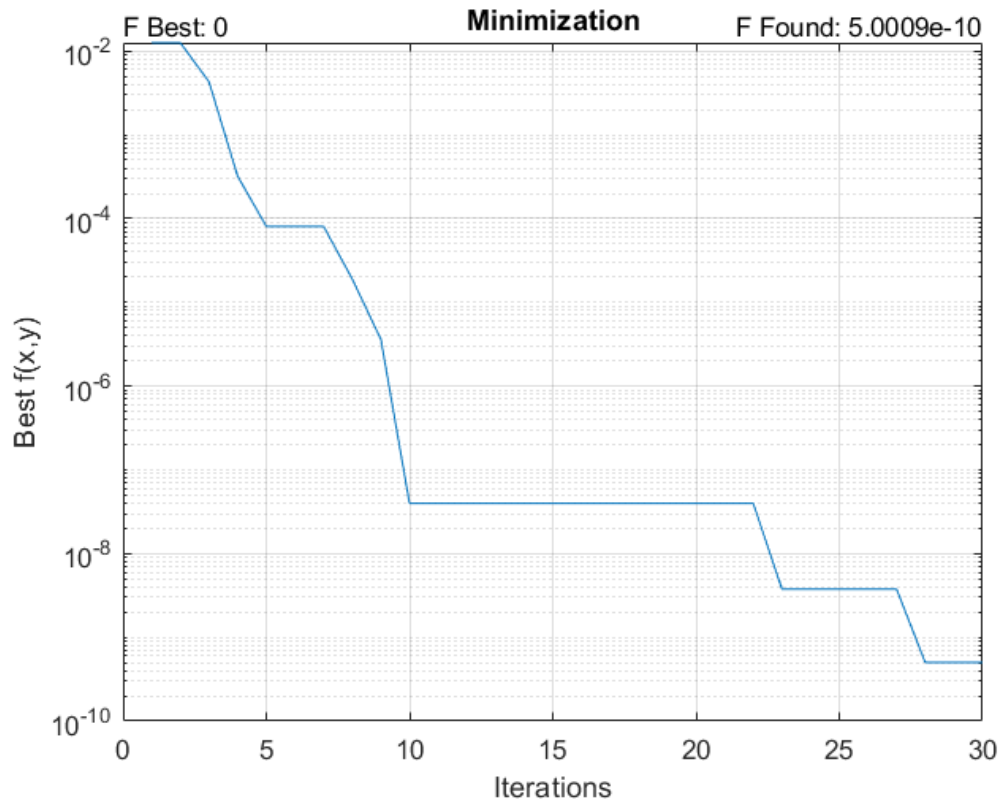
Εικόνα 40: Συνάρτηση Ackley και αντισώματα



Εικόνα 41: Τιμή ελαχίστου συνάρτησης Ackley ανά επανάληψη



Εικόνα 42: Συνάρτηση Griewank και αντισώματα



Εικόνα 43: Τιμή ελαχίστου συνάρτησης Griewank ανά επανάληψη

Στη συνάρτηση *Ackley* μετά από 30 επαναλήψεις συγκλίνει προς την τιμή 0, με την ελάχιστη τιμή στο δεδομένο αριθμό επαναλήψεων να είναι $f(x)_{\min}=3*10^{-4}$.

Στη συνάρτηση *Griewank* η σύγκλιση φαίνεται να έχει πλησιάσει ακόμα περισσότερο την ελάχιστη τιμή, με αποτέλεσμα $f(x)_{\min}=5*10^{-10}$.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος κλωνικής επιλογής μπορεί επίσης να χαρακτηριστεί ως συνεργατική και ανταγωνιστική προσέγγιση, όπου τα μεμονωμένα Ab's ανταγωνίζονται για την βελτιστοποίηση, με αποτέλεσμα ολόκληρος ο πληθυσμός να συνεργαστεί ως σύνολο ατόμων για να παρουσιαστεί μια τελική λύση.

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στα πλαίσια της Διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε το πρόβλημα σχεδιασμού ασφαλούς τροχιάς ενός υποθετικά αυτόνομου πλοίου σε μια κατάσταση σύγκρουσης στη θάλασσα. Ο κύριος στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η ανάπτυξη και η δοκιμή αλγορίθμων σχεδιασμού διαδρομής για πλοία, μια εφαρμογή που θα συμβάλει στην επίτευξη ασφαλέστερης ναυσιπλοΐας και θα σημάνει πρόοδο στην αυτόνομη πλοήγηση καθώς ταυτόχρονα θα συμβαδίζει με τις βιβλιογραφικές τάσεις, αλλά θα πηγαίνει και “ένα βήμα παραπέρα” με την εφαρμογή ενός υβριδικού αλγορίθμου. Η εφαρμογή που εξετάστηκε αποτελείται από δύο αλγόριθμους τον Velocity Obstacle (VO) και τον αλγόριθμο τεχνητού ανοσοποιητικού συστήματος (CLONALG).

Παρά την ύπαρξη μιας σειράς αυστηρών και μάλλον εξιδανικευμένων παραδοχών, όπως λόγου χάρη η “a priori” γνώση της κίνησης του Target Ship και η σταθερή ταχύτητα του, τα εξαγόμενα αποτελέσματα για την αποφυγή της σύγκρουσης χαρακτηρίζονται ικανοποιητικά και ο αλγόριθμος CLONALG φαίνεται σε δοκιμή εύρεσης ολικού ελαχίστου των συναρτήσεων να φθάνει πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση.

Όσον αφορά τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς COLREGs προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα για κάθε ένα από τα σενάρια προσέγγισης των δύο πλοίων.

Κατάσταση Head-On: Η συμπεριφορά του πλοίου στην αποφυγή σύγκρουσης στην κατάσταση Head-On εξαρτάται από τη γωνία προσέγγισης των δύο πλοίων. Οι κανονισμοί ορίζουν στροφή κατά το δεξιό μέρος της πλώρης. Ωστόσο, λόγω της σχετικής θέσης επιλέγεται η στροφή αριστερά, αντίθετα με την ενέργεια που ορίζουν οι COLREGs.

Κατάσταση Cross-right: Στην κατάσταση Cross-right To OS μας ορίζεται από τους κανονισμούς ως το Give-way vessel. Το πλοίο επιλέγει να περάσει από τη πλώρη του TS, αντίθετα με την ενέργεια που ορίζουν οι COLREGs.

Κατάσταση Cross-left: Στη παρούσα κατάσταση το OS ορίζεται ως το stand-on vessel. Σύμφωνα με τους κανονισμούς δεν είναι υπευθυνότητα του OS να μεταβάλλει τη πορεία του. Ωστόσο, επιλέγεται στροφή προς τα δεξιά και αποφυγή της σύγκρουσης.

Κατάσταση Overtake: Στην τελευταία κατάσταση που αναλύθηκε, σύμφωνα με τους κανονισμούς το OS οφείλει να προσπεράσει το TS δίχως να εμποδίσει τη πορεία του. Η αποφυγή γίνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς και διατηρείται η ασφαλής απόσταση.

Σε επόμενο μέρος, ο CLONALG, όπως εφαρμόζεται σε αυτή την Διπλωματική εργασία, αντιπροσωπεύει μια υπολογιστική εφαρμογή των αρχών κλωνικής επιλογής και ωρίμανσης συγγένειας που είναι υπεύθυνες για την περιγραφή της συμπεριφοράς του ανοσοποιητικού συστήματος (Κεφάλαιο 3). Στην υλοποίηση (Σχήμα 13), θεωρείται ότι υπάρχει σύνολο αντισωμάτων Ab που θα εκτεθεί σε ένα αντιγονικό ερέθισμα (αντικατοπτρίζεται ως μια βελτιστοποίηση της συνάρτησης κόστους) και θα επιλεγούν τα Ab υψηλότερης συγγένειας για τη δημιουργία πληθυσμού κλώνων. Κατά τη διάρκεια του πολλαπλασιασμού, λίγα από τα αντισώματα (Ab) θα υποστούν σωματική μετάλλαξη ανάλογη με τη τιμή συγγένειάς τους (χαμηλότερη τιμή συνάρτησης κόστους) και θα επιλεγούν οι κλώνοι με την υψηλότερη συγγένεια. Έτσι τα αντισώματα (Ab) χαμηλής συγγένειας αντικαθίστανται.

Τα βήματα που συνθέτουν έναν εξελικτικό αλγόριθμο (EA) ενσωματώνονται και στον CLONALG, επιτρέποντας να τον χαρακτηρίσουμε και αυτόν ως έναν εξελικτικό αλγόριθμο. Ωστόσο, ενώ οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (EA) χρησιμοποιούν ένα λεξιλόγιο δανεισμένο από τη φυσική γενετική και εμπνευσμένο από τη δαρβινική εξέλιξη, το προτεινόμενο CLONALG κάνει χρήση του φορμαλισμού σχήματος-χώρου, μαζί με την ανοσολογική ορολογία για την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων αντιγόνου-αντισώματος (Ag-Ab) και της κυτταρικής εξέλιξης, όπως συζητείται στο Κεφάλαιο III. Ο CLONALG εκτελεί την αναζήτησή του μέσω των μηχανισμών σωματικής μετάλλαξης και επεξεργασίας υποδοχέων, εξισορροπώντας την εκμετάλλευση των καλύτερων λύσεων με την εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης. Ουσιαστικά, το σχήμα κωδικοποίησής του δεν διαφέρει από αυτό των EA.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται οδηγούν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι αλγόριθμοι VO και CLONALG είναι ικανοί να βρουν την ασφαλή τροχιά ενός πλοίου σε καταστάσεις σύγκρουσης στη θάλασσα, γεγονός που επιβεβαιώθηκε από μελέτες προσομοίωσης με τη χρήση προσομοιώσεων καταστάσεων ναυσιπλοΐας.
- Ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου VO δεν υπερβαίνει το 1 λεπτό. Ο χρόνος εκτέλεσης του CLONALG είναι αρκετά μεγαλύτερος καθώς η λειτουργία του επαναλαμβάνεται για κάθε σημείο πλεύσης. Συνολικά από τον αλγόριθμο VO, εξήχθησαν 549 σημεία πλεύσης. Επομένως η διαδικασία υπολογισμού του ρίσκου και των παραμέτρων του μοντέλου κίνησης υπολογίζονται σε κάθε κίνηση. Εκτιμάται ότι η συγκεκριμένη διαδικασία θα ήταν γρηγορότερη χωρίς την γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων, γεγονός που κάνει το MATLAB αργό. Ωστόσο, ο υπολογισμός του απαιτούμενου χρόνου θα γίνει χωρίς την εκτύπωση των διαγραμμάτων.

Ωστόσο, υφίσταται ακόμη πρόσφορο έδαφος για αρκετές περαιτέρω βελτιώσεις. Η καταλληλότητα του συγκεκριμένου προγραμματιστικού περιβάλλοντος πρέπει να επανεξετασθεί. Ακόμη, ένα μελλοντικό μοντέλο για τον συνυπολογισμό της δυναμικής του πλοίου και κατά την αποφυγή σύγκρουσης και όχι μόνο κατά την χάραξη της πορείας, θα αποδεικνυόταν χρήσιμο στην κατεύθυνση της ακριβέστερης προσομοίωσης αποφυγής σύγκρουσης. Επιπλέον κρίνεται σημαντική η συμπερίληψη μεγαλύτερου αριθμού δυναμικών πλοίων σε ένα μελλοντικό μοντέλο. Η μοντελοποίηση των καιρικών συνθηκών όπως και η εκτίμηση των πιθανών συνεπειών επίσης, θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικά συνοδευτικά εργαλεία κατά την προσομοίωση της κυκλοφορίας. Προσθήκη αξία να αναφερθεί είναι και η μοντελοποίηση του TS ώστε να ακολουθεί ορισμένους κανόνες COLREGs με στόχο να εξετάζεται μια προσέγγιση πιο κοντά στη πραγματικότητα. Ειδικότερα, στην περίπτωση του Cross-Left, το OS θα έπρεπε να μην μεταβάλει την πορεία του ως Stand-On Ship και να περιμένει το TS να μεταβεί σε αποφυγή σύγκρουσης, με πολύ μικρές διαφοροποιήσεις στην κατεύθυνση και στις παραμέτρους μας, μόνο και μόνο για να εξασφαλίζεται η απόλυτη ασφάλεια.

Τέλος, η χρήση ρεαλιστικών δεδομένων μέσω του AIS θα αποτελούσε μία σημαντική αναβάθμιση στην εφαρμογή αποτυπώνοντας σε πιο πραγματικό βαθμό τα κυκλοφοριακά μοτίβα και παρέχοντας μία πιο ξεκάθαρη εικόνα όσον αφορά τις συνθήκες σε έναν τοπικό χάρτη. Ως αποτέλεσμα θα ήταν η δυνατότητα πιο άμεσης και πιο ορθής διερεύνησης της λειτουργικότητας της εφαρμογής (εφόσον πρόκειται για πραγματικά στοιχεία κυκλοφορίας) και λήψης προληπτικών μέτρων περιορισμού του κινδύνου. Το παρόν μοντέλο αποτελεί πάντως την απαραίτητη βάση και το σημείο εκκίνησης για την υλοποίηση όλων των παραπάνω προτάσεων.

Παράρτημα

Ανάλυση Ευαισθησίας

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος Χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	30	0.1	0.02	2.24E-16	5.99
Cross Right	30	30	0.1	0.13	2.24E-16	5.82

Ανάλυσης Ευαισθησίας σε σχέση με την παράμετρο N (Αριθμός Πληθυσμού)

Για αριθμό πληθυσμού N=15

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	15	30	0.1	0.29975	2.2E-16	5.61
Cross Right	15	30	0.1	0.13693	2.2E-16	5.80

Για αριθμό πληθυσμού N=60

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	60	30	0.1	0.21	2.24E-16	7.94
Cross Right	60	30	0.1	0.21	2.24E-16	5.91

Για αριθμό πληθυσμού N=90

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	90	30	0.1	0.22	2.2E-16	7.62
Cross Right	90	30	0.1	0.22	2.24E-16	9.41

Ανάλυση Ευαισθησίας σε σχέση με την παράμετρο Gen (Αριθμός γενεών)

Για Gen=15

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	15	0.1	0.16	2.24E-16	3.72
Cross Right	30	15	0.1	0.13	0.2	4.42

Για Gen=60

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	60	0.1	0.24	2.24E-16	15.34
Cross Right	30	60	0.1	0.13	0.003	15.11

Για Gen=90

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	90	0.1	0.17	2.24E-16	20.46
Cross Right	30	90	0.1	0.03	0.003	22.01

Ανάλυση Ευαισθησίας σε σχέση με την παράμετρο beta (Αναλογία κλώνων)

Για beta=0.5

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	30	0.5	0.29	2.24E-16	8.15
Cross Right	30	30	0.5	0.08	2.24E-16	5.94

Για beta=0.9

Scenario	N	Gen	Beta	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	30	0.9	0.07	2.24E-16	5.73
Cross Right	30	90	0.9	0.16	2.24E-16	5.66

Ανάλυση Ευαισθησίας σε σχέση με την πιθανότητα μετάλλαξης (Pm)

Για Pm=0.5 και beta=0.1

Scenario	N	Gen	Pm	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	30	0.5	0.22	2.24E-16	5.57
Cross Right	30	30	0.5	0.14	2.24E-16	5.47

Για Pm=0.9 και beta=0.1

Scenario	N	Gen	Pm	Ελάχιστο Συνάρτησης (Αρχικό)	Ελάχιστο Συνάρτησης (Κατά την αποφυγή)	Μέσος χρόνος υπολογισμού επανάληψης
Head On	30	30	0.9	0.21	2.24E-16	5.61
Cross Right	30	30	0.9	0.16	2.24E-16	5.49

Βιβλιογραφία

- Aickelin U, J. Greensmith, and J. Twycross, "Immune System Approaches to Intrusion Detection – a Review", In the Proceeding of the Third Int. Conf. on Artificial Immune Systems ,ICARIS-04, pp.316-329, 2004.
- Aickelin, Uwe. (2008). Artificial Immune Systems (AIS) - A New Paradigm for Heuristic Decision Making. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.2832018.
- Andrews P.S. and J. Timmis, "Inspiration for the next generation of artificial immune systems," in Proc. 4th Int. Conf. Artif. Immune Syst., ICARIS -05, Aug. 2005, vol. 3627, Lecture Notes in Computer Science, pp. 126–138,2005.
- Antoa, P. and C. G. Soares (2006). Fault-tree models of accident scenarios of ropax vessels. International Journal of Automation and Computing 2, 107-116
- Asariotis, R., Benamara, H., Hoffmann, J., Premti, A., Valentine, V., Youssef, F., (2016). Review of Maritime Transport, 2016.
- Baumann H. and J. Gauldie, "The acute response," Immunology Today, vol.15, no. 74, 1994.
- Bayar Nawel, Saber Darmoul, Sonia Hajri-Gabouj, Henri Pierreval, Fault detection, diagnosis and recovery using Artificial Immune Systems: A review, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 46, Part A, 2015, Pages 43-57, ISSN 0952-1976, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.08.006>.
- Bersini H., J. Carneiro (Eds.), Proceedings of the 5th International Conference on Artificial Immune Systems, vol. 4163, Springer, 2006.
- Bharadwaj H., Vinodh Kumar E,Comparative study of neural networks in path planning for catering robots,Procedia Computer Science,Volume 133,2018,Pages 417-423,ISSN 1877-0509,<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.051>.
- Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G. (1999) Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, Oxford.
- Bradley D.W. and A. M. Tyrrell , "Immuotronics – Hardware fault tolerance inspired by the immune system ,"in Proceedings of the 3rd International Conference on Evolvable Systems(ICES2000) ,vol. 1801,Springer-Verlag ,Inc., pp.11-20, 2000.
- Bradley D.W. and A. M. Tyrrell , "Immuotronics – Novel Finite-State-Machine Architectures With Built-in Self-Test Using Self–Nonself Differentiation ," IEEE Trans. on Evolutionary Computation ,vol. 6,issue 3 , pp.227-238,June ,2002.
- Brand M., M. Masuda, N. Wehner and Xiao-Hua Yu, "Ant Colony Optimization algorithm for robot path planning," 2010 International Conference On Computer Design and Applications, 2010, pp. V3-436-V3-440, doi: 10.1109/ICCD.2010.5541300.
- Bratić, Karlo & Pavić, Ivan & Vukša, Srđan & Stazić, Ladislav. (2019). Review of Autonomous and Remotely Controlled Ships in Maritime Sector. Transactions on Maritime Science. 8. 253-265. 10.7225/toms.v08.n02.011.

- Bretscher P, Cohn M, A theory of self-nonself discrimination, *Science* 169, 1042-1049, 1970
- Cabán-Fernández, Pedro & Masters, Forrest & Phillips, Brian. (2018). Predicting Roof Pressures on a Low-Rise Structure From Freestream Turbulence Using Artificial Neural Networks. *Frontiers in Built Environment*. 4. 10.3389/fbuil.2018.00068.
- Cayzer Steve and U. Aickelin, "A Recommender System based on Idiotypic Artificial Immune Networks," *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, vol.4,no. 2, pp 181-198, 2005.
- Chauvin, Christine & Lardjane, Salim & Morel, Gaël & Clostermann, Jean-Pierre & Langard, Benoît. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accident; analysis and prevention*. 59C. 26-37. 10.1016/j.aap.2013.05.006.
- Chen Pengfei , Yamin Huang, Eleonora Papadimitriou, Junmin Mou, P.H.A.J.M. van Gelder, An improved time discretized non-linear velocity obstacle method for multi-ship encounter detection, *Ocean Engineering*, Volume 196, 2020, 106718, ISSN 0029-8018
- Chen Q, U Aickelin, "Movie recommendation systems using an artificial immune system," *Proceedings of ACDM -04*, Bristol, UK, 2004
- Chen, P., Huang, Y., Mou, J., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2019). Probabilistic risk analysis for ship-ship collision: State-of-the-art. *Safety Science*, 117, 108-122. doi:10.1016/j.ssci.2019.04.014
- Chin, H. C., & Debnath, A. K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, 47(10), 1410-1416. doi:10.1016/j.ssci.2009.04.004
- Chen, P.F.; Huang, Y.M.; Eleonora, P.; Mou, J.M.; van Gelder, P.H.A.J.M. Global path planning for autonomous ship: A hybrid approach of fast marching square and velocity obstacles methods. *Ocean Eng.* 2020, 214, 107793. [CrossRef]
- Chentoufi A., A. El Fatmi, A. Bekri, S. Benhlima, and M. Sabbane, "Genetic algorithms and dynamic weighted sum method for rna alignment," in *2017 Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- Cherubini A., F. Chaumette, "A redundancy-based approach for obstacle avoidance in mobile robot navigation," in *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, pp. 5700–5705, Taipei, October 2010.
- Chiang, Hao-Tien Lewis & Tapia, Lydia. (2018). COLREG-RRT: A RRT-based COLREGS-Compliant Motion Planner for Surface Vehicle Navigation. *IEEE Robotics and Automation Letters*. PP. 1-1. 10.1109/LRA.2018.2801881.
- Chib, Reetika & Singh, Amandeep. (2016). A design and analysis of EOM for energy saving and effective routing protocol: AODV and AOMDV. *Indian Journal of Science and Technology*. 9. 10.17485/ijst/2016/v9i19/92831.
- Coldwell, T.G. (1983), Marine traffic behavior in restricted waters, *The Journal of Navigation*, Vol. 36, pp. 431–444.
- Coutinho A., "The self non-self discrimination and the nature and acquisition of the antibody repertoire," *Annals of Immunology*, vol. 131, 1980.
- Cruz-Cortes N., F. Rodriguez-Henriquez and C. A. Coello Coello, "An Artificial Immune System Heuristic for Generating Short Addition Chains," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 12, no 1, pp.1-24,2008.

- Cucinotta, F., Guglielmino, E., Sfravara, F., (2017). Frequency of ship collisions in the strait of Messina through regulatory and environmental constraints assessment. *J. Navig.* 70, 1002–1022.
- Dasgupta D., “Advances in Artificial Immune Systems,” *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, pp.40 – 49, Nov. 2006.
- Dasgupta D., *Artificial Immune Systems and their Applications*, Springer-Verlag, 1999.
- Dasgupta D., K. KrishnaKumar, D. Wong, and M. Berry, “Negative selection algorithm for aircraft fault detection,” in *Proc. 3rd Int. Conf. on Artificial Immune System, ICARIS 2004*, pp. 13–16. 2004.
- de Castro L.N., F.J. Von Zuben, H. Knidel (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Artificial Immune Systems*, in: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4628, Springer, 2007
- de Castro L.N., J. Timmis, *An Introduction to Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Paradigm*, Springer-Verlag, 2002.
- de Castro L.N., J. Timmis, *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*, Springer, 2002
- de Castro L.N. and J. Timmis , “An Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization ,”*IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC’02)*, vol. 1,pp.699-674,May ,Hawaii,2002.
- de Castro L.N. and J. V. Zuben , “Learning and Optimization using Clonal Selection Principle ,” *IEEE Trans on Evolutionary Computation ,Special issue on Artificial Immune Systems*, vol. 6,issue 3 , pp.239-251,2002.
- Demirel E., Bayer D.: The Further Studies On The COLREGs (Collision Regulations). *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 9, No. 1, doi:10.12716/1001.09.01.02, pp. 17-22, 2015
- Dorigo, Marco & Stützle, Thomas. (2006). *The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances*. 10.1007/0-306-48056-5_9.
- Douthwaite, James & Zhao, Shiyu & Mihaylova, Lyudmila. (2019). Velocity Obstacle Approaches for Multi-Agent Collision Avoidance. *Unmanned Systems*. 07. 10.1142/S2301385019400065.
- Dubins LE. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *Am J Math* 1957;79: 497–517.
- Eason C., *IMO scoping study on autonomous ships unlikely to result in new regulations until the 2030's despite member states seeking to be technology market leaders (2021)* <https://fathom.world>
- European Maritime Safety Agency (2019) *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2019*. Technical report, European Maritime Safety Agency.
- EMSA, (2020). *Preliminary annual overview of marine casualties and incidents 2014- 2019*.
- Eriksen & Jacob, Pelland, Noel & Bennett, James & Steinberg,, Charles. (2018). Automated Glider Tracking of a California Undercurrent Eddy Using the Extended Kalman Filter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 35. 10.1175/JTECH-D-18-0126.1.
- Esponda F., S. Forrest and P. Helman , “A formal framework for positive and negative detection,” *IEEE Trans. Syst., Man Cybernet.*,nol.34,pp.357–373, 2004.

- Farmer J.D., N.H. Packard, A.S. Perelson, The immune system, adaptation, and machine learning, *Physica D* 22 (1986) 187–204.
- Fiorini, P.; Shiller, Z. (July 1998). "Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles". *The International Journal of Robotics Research*. 17 (7): 760–772. CiteSeerX 10.1.1.56.6352. doi:10.1177/027836499801700706. ISSN 0278-3649
- Forrest S. and S. A. Hofmeyr, "Immunology as information processing," in *Design Principles for the Immune System and Other Distributed Autonomous Systems*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, L. A. Segel and I. Cohen, Eds. Oxford, U.K. Oxford Univ. Press, pp. 361–387, 2000.
- Forrest S., A.S. Perelson, L. Allen and R. Cherukuri, "Self-Nonself Discrimination in a Computer," In *Proceedings of the 1994 IEEE Symposium on*
- Forrest S., S. Hofmeyr, A. Somayaji, and T. A. Longstaff, "A sense of self for unix processes," in *Proc. IEEE Symp. Comput. Security Privacy*, pp. 120–128, 1996.
- Fossen, Sindre & Fossen, Thor. (2018). *Extended Kalman Filter Design and Motion Prediction of Ships Using Live Automatic Identification System (AIS) Data*. 10.1109/EECS.2018.00092.
- David Franco (2022). CLONALG - Clonal Selection Algorithm for Optimization Problems (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67010-clonalg-clonal-selection-algorithm-for-optimization-problems>), MATLAB Central File Exchange.
- Freitas A., J. Timmis, Revisiting the foundations of artificial immune systems for data mining, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 11 (4) (2007) 521–540.
- GA (United Nations) 70/1. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015: Goal 14. Conserve and sustainably use the oceans, seas, and marine resources for sustainable development.
- Gia Huy Dinh, Nam-kyun Im, The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area, *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, Volume 4, 2016, Pages 97-108, ISSN 2405-5352, <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.009>.
- Global Autonomous Ship and Ocean Surface Robot Market Focus on Mode of Operation, Subsystem, End User, and Application – Analysis and Forecast, 2018-2028, 2018
- Gong, Maoguo & Jiao, Licheng & Zhang, Lining & Du, Haifeng. (2009). Immune secondary response and clonal selection inspired optimizers. *Progress in Natural Science - PROG NAT SCI*. 19. 237-253. 10.1016/j.pnsc.2008.05.026.
- Gonzalez-Fabio, "A study of artificial immune systems to anomaly detection," Ph.D thesis, University of Memphis, 2003.
- Goodwin, E.M. (1975), A statistical study of ship domains, *The Journal of Navigation*, Vol.28, pp. 329–341.
- Greensmith, J., Aickelin, U., Cayzer, S. (2005). Introducing Dendritic Cells as a Novel Immune-Inspired Algorithm for Anomaly Detection. In: Jacob, C., Pilat, M.L., Bentley, P.J., Timmis, J.I. (eds) *Artificial Immune Systems. ICARIS 2005. Lecture Notes in Computer Science*, vol 3627. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11536444_12

- Harmer P. K., P. D. Williams, G. H. Gunsch, and G. B. Lamont, "An artificial immune system architecture for computer security applications," *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 3, pp. 252–280, Jun. 2002.
- Hart, Emma & Timmis, Jon. (2005). Application areas of AIS: The past, the present and The Future. *Applied Soft Computing - ASC*. 8. 483-497. 10.1016/j.asoc.2006.12.004.
- Hart, Nilsson, Raphael (1967). A formal basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths.
- He, J.; Hao, Y.; Wang, X.Q. An interpretable aid decision-making model for flag state control ship detention based on SMOTE and XGBoost. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 156. [CrossRef]
- Hofmeyr S., S. Forrest and A. Somayaji, "Intusion Detection Using Sequences of System Calls", *Journal of Computer Security*, vol. 6, pp.151-180,1998.
- Hofmeyr S.A., "An interpretative introduction to the immune system," Design principle for the immune system and other distributed autonomous systems, I. Cohen and L. Segel, Eds. New York: Oxford University Press, 2000.
- Holland, J. H. (1960). On Iterative Circuit Computers Constructed of Microelectronic Components and Systems. In *Proceedings of the 1960 Western Joint Computer Conference (WJCC) – Session on the Design, Programming, and Sociological Implications of Microelectronics*, National Joint Computer Committee, IEE
- Holland J. H., *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.
- Hong-Wei Ge , L Sun, Y.C. Liang and F. Qian , "An effective PSO and AIS- Based hybrid Intelligent Algorithm for Job Shop Scheduling," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A*, vol. 38, issue 2, pp. 358–368, 2008.
- Hu, Q., Yang, C., Chen, H., & Xiao, B. (2008). Planned Route Based Negotiation for Collision Avoidance Between Vessels. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2(4).
- Hucaihui (2018), *ShipLocalPathPlanning* algorithm, Velocity Obstacle, MIT Liscene, Copyright (c) 2018 GiantChestnutBread, <https://github.com/hucaihui/ShipLocalPathPlanning>
- Huang, Yamin & Chen, Linying & Chen, Pengfei & Negenborn, R.R. & Gelder, P.H.A.J.M.. (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*. 121. 10.1016/j.ssci.2019.09.018.
- I. M. Organization, Colreg, 1972. [Online]. Available: [http:// www. imo. org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/COLREG.aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/COLREG.aspx).
- ICARIS, 2005, *Proceeding of the Fourth Int. Conf. on Artificial Immune Systems ,ICARIS-05*, pp.234-247, 2005.
- IMO, *Introduction to International Maritime Organization*. See the web site IMO (2021) <https://www.imo.org>
- Jacob C., M. Pilat, P. Bentley, J. Timmis, *Proc. of the 4th International Conference on Artificial Immune Systems, ICARIS*, in: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3627, Springer, 2005.
- James A. Douthwaite, Shiyu Zhao and Lyudmila S. Mihaylova *Unmanned Systems* Vol. 07, No. 01, pp. 55-64 (2019)

- James, M. (1986). Modelling the Decision Process in Computer Simulation of Ship Navigation. *Journal of Navigation*, 39(1), 32-48. doi:10.1017/S0373463300014211
- Janeway C.A., "How the immune system recognizes invaders," *Scientific American*, vol.269, no. 3, pp. 72-79, 1993.
- Janeway C.A., P.Travers, S. Hunt and M. Walport, *Immunobiology: the immune system in health and disease*, Garland Pub., 1997.
- Jerne N.K., "Clonal selection in a lymphocyte network," *Cellular selection and regulation in the immune response*, Raven Press, pp.39-48, 1974.
- Jerne N.K., "Towards a network theory of immune system," *Annals of Immunology*, vol. 125, 1974.
- Ji. Z. and D. Dasgupta, "Applicability issues of the real-valued negative selection algorithms," *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, pp. 111–118, July 8–12, 2006.
- Jie Ji, Amir Khajepour, William Melek, and Yan-Jun Huang, 2016, *Path Planning and Tracking for Vehicle Collision Avoidance based on Model Predictive Control with Multi-constraints*
- Jiri de Vos, Robert G. Hekkenberg, Osiris A. Valdez Banda, *The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis*, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 210, 2021, 107558, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107558>.
- Kao, S., Lee, K., Chang, K., & Ko, M. (2007). A Fuzzy Logic Method for Collision Avoidance in Vessel Traffic Service. *Journal of Navigation*, 60(1), 17-31. doi:10.1017/S0373463307003980
- Kappler J., N. Roehm and P. Marrack, " T Cell Tolerance by Clonal Elimination in the Thymus," *Cell*, no. 49, pp.273-280, 1987.
- Karaman, Sertac & Walter, Matthew & Perez, Alejandro & Frazzoli, Emilio & Teller, Seth. (2011). Anytime Motion Planning using the RRT*. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1478-1483. 10.1109/ICRA.2011.5980479.
- Karr, Charles & Nishita, K. & Graham, Kenneth. (2005). Adaptive Aircraft Flight Control Simulation Based on an Artificial Immune System. *Appl. Intell.* 23. 295-308. 10.1007/s10489-005-4614-z.
- Kijima, Katsuro & Furukawa, Yoshitaka. (2003). Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area. *IFAC Proceedings Volumes*. 36. 223-228. 10.1016/S1474-6670(17)37811-4. Kijima, Katsuro & Furukawa, Yoshitaka. (2003). Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area. *IFAC Proceedings Volumes*. 36. 223-228. 10.1016/S1474-6670(17)37811-4.
- Kim J., and P. Bentley, "Evaluating negative selection in an artificial immune systems for network intrusion detection," *Proc. Genetic and Evolutionary Comp. Conf.*, pp. 1330–1337,2001.
- Kim J., and P. Bentley, " Towards an artificial immune systems for network intrusion detection: an investigation of dynamic clonal selection," *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation 2002*, pp. 1015– 1020, 2002.
- Kim, D. G., Hirayama, K., & Park, G. K. (2014). Collision Avoidance in Multiple-Ship Situations by Distributed Local Search. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 18(5), 839-848. doi:10.20965/jaciii.2014.p0839

- Kim, D., Hirayama, K., & Okimoto, T. (2017). Distributed Stochastic Search Algorithm for Multi-ship Encounter Situations. *Journal of Navigation*, 70(4), 699-718. doi:10.1017/s037346331700008x
- Ko, N.Y., Simmons, R.G. & Kim, K.S. A lane based obstacle avoidance method for mobile robot navigation. *KSME International Journal* 17, 1693–1703 (2003). <https://doi.org/10.1007/BF02983599>
- Koponen, Timo Vice President, Processing Solutions, Wärtsilä Marine Solutions, 3 (2010) <https://wwwcdn.imo.org>
- Kubi J., Kubi Immunology, 5th Ed., Freeman, San Francisco, 2002.
- Kuby J., Immunology, 3rd Ed., W. H. Freeman and Co., 1997.
- Kuffner, James & LaValle, Steven. (2000). RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning.. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2. 995-1001. 10.1109/ROBOT.2000.844730.
- Kufoalor, D.K.M., Johansen, T.A., Brekke, E.F., Hepsø, A., Trnka, K., (2019). Autonomous maritime collision avoidance: Field verification of autonomous surface vehicle behavior in challenging scenarios. *Journal of Field Robotics*.
- Künsch, Hans. (2013). Particle filters. *Bernoulli*. 19. 10.3150/12-BEJSP07.
- Lamini Chaymaa, Said Benhlime, Ali Elbekri, Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning, *Procedia Computer Science*, Volume 127, 2018, Pages 180-189, ISSN 1877-0509, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.113>.
- LaValle, Steven M.. “Rapidly-exploring random trees : a new tool for path planning.” *The annual research report* (1998)
- Lay, Nicholas & Bate, Iain. (2008). Improving the reliability of real-time embedded systems using innate immune techniques. *Evolutionary Intelligence*. 1. 113-132. 10.1007/s12065-008-0009-5.
- Lazarowska, Agnieszka. (2019). Research on algorithms for autonomous navigation of ships. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 18. 10.1007/s13437-019-00172-0.
- Lemon N., Autonomous shipping from a regulatory perspective Australian Government. Australian Maritime Safety Authority (AMSA) (2018) <https://www.iala-aism.org>
- Li, M., Mou, J., Chen, L., He, Y., & Huang, Y. (2021). A rule-aware time-varying conflict risk measure for MASS considering maritime practice. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 215, 107816. maritime practice. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021, 215, 107816. [CrossRef]
- Li, Mengxia & Mou, Junmin & Chen, Linying & Huang, Yamin & Chen, Pengfei. (2021). Comparison between the collision avoidance decision-making in theoretical research and navigation practices. *Ocean Engineering*. 228. 108881. 10.1016/j.oceaneng.2021.108881.
- Liu, Yuanchang & Bucknall, Richard. (2016). The angle guidance path planning algorithms for unmanned surface vehicle formations by using the fast marching method. *Applied Ocean Research*. 59. 327-344. 10.1016/j.apor.2016.06.013.
- Lyu, D.S.; Chen, Z.W.; Cai, Z.S.; Piao, S.H. Robot path planning by leveraging the graph-encoded floyd algorithm. *Future Gener. Comput. Syst.* 2021, 122, 204–208. [CrossRef]

- Mac T. T., C. Copot, D. T. Tran, and R. De Keyser, "Heuristic approaches in robot path planning: A survey," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 86, pp. 13–28, 2016.
- Macrae, C. (2009). Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions. *Maritime Policy & Management* 36(1), 21-38.
- Mahini, Farshad & DiWilliams, Leonard & Burke, Kevin & Ashrafiuon, H.. (2013). An experimental setup for autonomous operation of surface vessels in rough seas. *Robotica*. 31. 10.1017/S0263574712000720.
- Mane, Sunil & Vhanale, Sharan. (2019). Genetic Algorithm Approach for Obstacle Avoidance and Path Optimization of Mobile Robot: Proceedings of ICCASP 2018. 10.1007/978-981-13-1513-8_66.
- Maoguo Gong, Licheng Jiao, Ling Wang, Haifeng Du, "An Artificial Immune System Algorithm for CDMA Multi-user Detection over Multi-Path Channels," *Proceedings of conference on Genetic and evolutionary computation*, pp. 2105 - 2111 , 2005.
- Marin-Plaza, P.; Hussein, A.; Martin, D.; Escalera, A.D.L. Global and local path planning study in a ROS-based research platform for autonomous vehicles. *J. Adv. Transp.* 2018, 2018, 6392697.
- Martin Drozda, Sven Schaust, Helena Szczerbicka, "AIS for Misbehavior Detection in Wireless Sensor Networks: Performance and Design Principles." *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'07)*, pp.3719-3726, 2007.
- Mathew, Geethu Elizebeth. "Direction based heuristic for pathfinding in video games." *Procedia Computer Science* 47 (2015): 262-271.
- Matzinger P., "The Danger Model: a Renewed Sense of Self", *Science*, vol.296, pp.301-304, 2002.
- Matzinger P., "Tolerance, Danger and the Extended Family", *Annual Review in Immunology*, vol.12, pp.991-1045, 1994.
- Michelan, Roberto & Von Zuben, Fernando. (2002). Decentralized control system for autonomous navigation based on unevolved artificial immune network. *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, CEC 2002*. 2. 1021-1026. 10.1109/CEC.2002.1004383.
- Miller, F. S.; Everett, A. F. (1903). *Instructions for the Use of Martin's Mooring Board and Battenberg's Course Indicator*. Authority of the Lords of Commissioners of the Admiralty.
- Mocholi, Jose A., et al. "An emotionally biased ant colony algorithm for pathfinding in games." *Expert Systems with Applications* 37.7 (2010): 4921-4927.
- Mohanty, P.K., Kodapurath, A.A. & Singh, R.K. A Hybrid Artificial Immune System for Mobile Robot Navigation in Unknown Environments. *Iran J Sci Technol Trans Electr. Eng.* 44, 1619–1631 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40998-020-00314-8>
- Naeem Wasif, Sable C Henrique, Liang Hu, A Reactive COLREGs-Compliant Navigation Strategy for Autonomous Maritime Navigation, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 49, Issue 23,2016
- Naukowe, Zeszyty & Miller, Anna. (2014). Model Predictive Control of the ship's motion in presence of wind disturbances. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 39. 107-115.
- Nicosia G., V. Cutello, P. Bentley, J. Timmis, *Proc. of the 3rd International Conference on Artificial Immune Systems, ICARIS*, in: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3239, Springer, 2004.

- Ozcelik, Sel & Sukumaran, S.. (2011). Implementation of An Artificial Immune System on a Mobile Robot. *Procedia CS*. 6. 317-322. 10.1016/j.procs.2011.08.058.
- Park Jong-Wook, Hwan-Joo Kwak, Young-Chang Kang, and D. W. Kim, "Advanced Fuzzy Potential Field Method for Mobile Robot Obstacle Avoidance," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2016, Article ID 6047906, pp. 1–13, 2016.
- Paul Sawers, The role of autonomous ships in a world wary of pandemics, 2020, <https://venturebeat.com/2020/08/17/the-role-of-autonomous-ships-in-a-world-wary-of-pandemics/>.
- Perelson A. S., Immune network theory, *Immunological Reviews* 110 (1989) 5–36.
- Purcaru C., R. Precup, D. Ierican, L. Fedorovici, and R. David, "Hybrid PSO-GSA robot path planning algorithm in static environments with danger zones," in *Proceedings of the 2013 17th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pp. 434–439, Sinaia, Romania, October 2013.
- Rehman Ur, Atta & Awuah-Offei, Kwame & Baker, D. & Bristow, Douglas. (2019). EMERGENCY EVACUATION GUIDANCE SYSTEM FOR UNDERGROUND MINERS.
- Research in Security and Privacy, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1994.
- Roitt I., "Specific acquired immunology," *Essential immunology*, 9th Ed. Black- well Science, pp.22-39, 1997.
- Rolls-Royce, Rolls-Royce and Finferries demonstrate world's first Fully Autonomous Ferry, 2018, www.rolls-royce.com/media/press-releases/2018/03-12-2018-rr-and-finferries-demonstrate-worlds-first-fully-autonomous-ferry.aspx
- Sabri A. N., N. H. M. Radzi and A. A. Samah, "A study on Bee algorithm and A* algorithm for pathfinding in games," 2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), 2018, pp. 224-229, doi: 10.1109/ISCAIE.2018.8405474.
- Saeidi, Shahram & Mahdavi, Iraj. (2022). USING ANT COLONY META-HEURISTIC APPROACH FOR CELLULAR MANUFACTURING SYSTEM.
- Scheepens, R., van de Wetering, H., & van Wijk, J. J. (2014). Contour based visualization of vessel movement predictions. *International Journal of Geographical Information Science*, 28(5), 891-909. doi:10.1080/13658816.2013.868466
- Serrat, (2012). Maritime traffic, safety and penalties. Available at: <http://www.barcelonaworldrace.org/en/news/articles/maritime-traffic-safety-and- penalties>
- Shaobo, Wang & Yingjun, Zhang & Lianbo, Li. (2020). A collision avoidance decision-making system for autonomous ship based on modified velocity obstacle method. *Ocean Engineering*. 215. 107910. 10.1016/j.oceaneng.2020.107910.
- Sirisanyalak B., O.Sornil , "An artificial immunity based spam detection system " *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'07)*, pp.3392-3398, 2007.
- Smierzchalski, R. Evolutionary trajectory planning of ships in navigation traffic areas. *J Mar Sci Technol* 4, 1–6 (1999). <https://doi.org/10.1007/s007730050001>

- Statheros, Thomas & Howells, Gareth & McDonald-Maier, Klaus. (2008). Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques. *Journal of Navigation*. 61. 129 - 142. [10.1017/S037346330700447X](https://doi.org/10.1017/S037346330700447X). Naeem et al., 2012a;
- Stepney S., R. Smith, J. Timmis, A. Tyrrell, M. Neal, A. Hone, Conceptual frameworks for artificial immune systems, *International Journal of Unconventional Computing* 1 (3) (2005) 315–338
- Tarakanov A. et. al., *Immunocomputing: Principles and Applications*, Springer, Berlin, 2003.
- Timmis J. and M.J. Neal, “A resource limited artificial immune system for data analysis,” in *Research and development in intelligent systems XVII*, proceedings of ES2000, Cambridge, UK, pp.19-32, 2000.
- Timmis J., “Artificial immune systems: a novel data analysis technique inspired by the immune network theory,” Ph. D thesis, University of Wales, 2000.
- Timmis J., A. Hone, T. Stibor, E. Clark, Theoretical advances in artificial immune systems, *Theoretical Computer Science*, Volume 403, Issue 1, 2008, Pages 11-32, ISSN 0304-3975, <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2008.02.011>.
- Timmis J., P. Bentley, E. Hart, *Proc. of the 2nd International Conference on Artificial Immune Systems, ICARIS*, in: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2787, Springer, 2003.
- Timmis J., P. Bentley, *Proc. of the 1st International Conference on Artificial Immune Systems*, University of Kent Printing Unit, 2002.
- Timmis, J., Andrews, P. & Hart, E. On artificial immune systems and swarm intelligence. *Swarm Intell* 4, 247–273 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11721-010-0045-5>.
- Tzannatos, E. (2010). Human element and accidents in greek shipping. *Journal of Navigation* 63(1), 119-127.
- Varela F., A. Coutinho, B. Dupire and N. Vaz, “Cognitive networks: immune and neural and other wise,” *Theoretical Immunology : Part Two*, SFI Studies in the science of complexity, pp.359-371, 1988.
- Ventikos Nikolaos P., Louzis Konstantinos, Stab, *Introduction to Artificial Immune Systems: A literature review on autonomous navigation applications*, 2021
- Watkins Andrew B., “Exploiting immunological metaphors in the development of serial, parallel, and distributed learning algorithms,” Ph. D thesis, University of Kent, 2005.
- Wu, B., Cheng, T., Yip, T. L., Wang, Y., (2020). Fuzzy logic based dynamic decision-making system for intelligent navigation strategy within inland traffic separation schemes. *Ocean Engineering*, 197, 106909.
- Xia, Xuhui & Zhu, Huixian & Zhang, Zelin & Liu, Xiang & Wang, Lei & Cao, Jianhua. (2020). 3D-based multi-objective cooperative disassembly sequence planning method for remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 106. [10.1007/s00170-020-04954-2](https://doi.org/10.1007/s00170-020-04954-2).
- Xu Qingyang, Collision avoidance strategy optimization based on danger immune algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 76, 2014, Pages 268-279, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.08.010>.

- Yan, X.P.; Wang, S.W.; Ma, F.; Liu, Y.C.; Wang, J. A novel path planning approach for smart cargo ships based on anisotropic fast marching. *Expert Syst. Appl.* 2020, 159, 113558.
- Zaccone, R., Martelli, M., Figari, M., (2019). A COLREG-Compliant Ship Collision Avoidance Algorithm. 2019 18th European Control Conference (ECC).
- Zeng Nianyin, Hong Zhang, Yanping Chen, Binqiang Chen, Yurong Liu, 2016, *Assembly Automation*, Path planning for intelligent robot based on switching local evolutionary PSO algorithm
- Zeng, N., Zhang, H., Chen, Y., Chen, B. and Liu, Y. (2016), "Path planning for intelligent robot based on switching local evolutionary PSO algorithm", *Assembly Automation*, Vol. 36 No. 2, pp. 120-126. <https://doi.org/10.1108/AA-10-2015-079>
- Zhao, J., Wu, Z. and Wang, F. (1993), Comments on ship domains, *The Journal of Navigation*, Vol. 46, pp. 422–436.
- Zhang Zhanying, Ziping Zhao, 2014, A Multiple Mobile Robots Path planning Algorithm Based on A-star and Dijkstra Algorithm.
- Zhang Zhuhong , Tu Xin, "Immune Algorithm with Adaptive Sampling in Noisy Environments and Its Application to Stochastic optimization Problems," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, pp. 29-40, 2007.
- Zhang, J. F., Zhang, D., Yan, X. P., Haugen, S., & Soares, C. G. (2015). A distributed anti-collision decision support formulation in multi-ship encounter situations under COLREGs. *Ocean Engineering*, 105, 336-348. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.06.054
- Zheng, H., Negenborn, R. R., & Lodewijks, G. (2017). Closed-loop scheduling and control of waterborne AGVs for energy-efficient Inter Terminal Transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 105, 261-278. doi:10.1016/j.tre.2016.07.010
- Zidane, Issa & Ibrahim, Khalil. (2018). Wavefront and A-Star Algorithms for Mobile Robot Path Planning. 69-80. 10.1007/978-3-319-64861-3_7.