ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΠΜΣ «ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

Ανάλυση Ρίσκου στο Σύστημα Υπεράκτιας Πλωτής Εξέδρας – Πλοίου Εξυπηρέτησης κατά τη διάρκεια της πρόσδεσης με χρήση Δυναμικών Δένδρων Σφαλμάτων σε διάφορα επίπεδα αυτονομίας

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Γαζής Ζώης
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 08119803
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΙΙΙ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Νικόλαος Π. Βεντίκος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, 2022

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Π. Βεντίκο, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ που μου έδωσε την ευκαιρία να αναλάβω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και με την επιστημονική καθοδήγησή του με βοήθησε αρκετά από την αρχή ως το τέλος.

Επίσης, θα ήθελα να απευθύνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ, κύριο Αλέξανδρο Κοϊμτζόγλου, για τον χρόνο που διέθεσε καθ' όλη τη διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας, την αρμονική συνεργασία μας και τις πολύτιμες συμβουλές του.

Ομοίως, ευχαριστώ θερμά τον κύριο Ευάγγελο Μαμιό για την πολύτιμη βοήθεια του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την υπομονή και την συμπαράστασή τους σε όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πολυπλοκότητα των συστημάτων στη ναυτιλία αυξάνεται με ραγδαίους ρυθμούς. Σε αυτό το γεγονός έχει συμβάλλει σε πολύ μεγάλο βαθμό η ανάγκη για αυτοματοποίηση ορισμένων διαδικασιών τόσο πάνω στο πλοίο όσο και στο άμεσο και έμμεσο περιβάλλον του, κάτι που απορρέει σαφώς από την τάση των τελευταίων ετών για μια πλήρως αυτόνομη ναυτιλία. Η ομαλή λειτουργία ενός πλοίου και η διατήρηση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των συστημάτων του επομένως αποτελεί προτεραιότητα κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων αυτών. Ένα τέτοιο σύστημα είναι το σύστημα πηδαλιούχησης, το οποίο είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ορθή λειτουργία ενός πλοίου, αυτόνομου ή μη. Πιθανή αστοχία του συστήματος αυτού μπορεί να προκαλέσει σοβαρά ζητήματα, ειδικά όταν η λειτουργία του πλοίου απαιτεί συνεχείς χειρισμούς και ελιγμούς, όπως έχουμε στην περίπτωση προσέγγισης ενός πλοίου εξυπηρέτησης σε μια υπεράκτια πλωτή εξέδρα. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος για την μείωση της πιθανότητας αστοχίας είναι η προσθήκη εφεδρικών στοιχείων που σε περίπτωση δυσλειτουργίας θα αντικαταστήσουν τα πρωτότυπα. Μια μέθοδος που διευκολύνει την ανάλυση ασφαλείας είναι η μηχανική συστημάτων βάσει μοντέλων, μιας και επιτρέπει την αξιολόγηση και παρέμβαση στα συστήματα αυτά καθ΄ όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού. Με βάση τα μοντέλα που προκύπτουν και με διάφορα εργαλεία όπως η ανάλυση δένδρων σφαλμάτων διενεργείται η ζητούμενη ανάλυση ρίσκου στα κρίσιμα συστήματα αυτά.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι κατά βάση χωρισμένη σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η βιβλιογραφική επισκόπηση μέσα στην οποία αναφέρονται και αναλύονται αρχικά τα δύο βασικά μέρη του συστήματος: η υπεράκτια εγκατάσταση και το πλοίο εξυπηρέτησης. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η έννοια της αυτονομίας στη Ναυτιλία και κατά πόσο αυτό μπορεί να επηρεάσει τις εργασίες στις υπεράκτιες κατασκευές και έπειτα, γίνεται αναφορά στην έννοια της αποφυγής συγκρούσεων και της ανάλυσης ρίσκου. Παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα πηδαλιούχησης του πλοίου, το οποίο θα μελετηθεί στο πειραματικό μέρος. Γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στη μηχανική συστημάτων και στην MBSE και στην ενσωμάτωση αυτών με την ανάλυση ασφαλείας. Επίσης, παρουσιάζεται η γλώσσα μοντελοποίησης SysML και γίνεται μια σύντομη αλλά περιεκτική αναφορά στην έννοια του redundancy στα μηχανικά συστήματα. Τέλος, αναλύουμε τη βασική μεθοδολογία της FTA, τα δένδρα σφαλμάτων, υπογραμμίζοντας τις βασικές τους λειτουργίες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας πραγματοποιείται η πειραματική ανάλυση. Αρχικά, εισάγεται η έννοια του Redundancy Profile μέσω ενός μετα-μοντέλου προερχόμενο από τη UML και παρέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για τη μοντελοποίηση των εφεδρειών και την ενσωμάτωση τους στο μοντέλο του συστήματος που θα μελετήσουμε. Στην συνέχεια, παρατίθεται ένας προτεινόμενος αλγόριθμος δημιουργίας δυναμικών δένδρων σφαλμάτων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το μοντέλο της SysML που κατασκευάζουμε και το ενσωματωμένο σε αυτό Redundancy Profile. Στο τέλος, παρουσιάζουμε τη μοντελοποίηση σε SysML του κρίσιμου συστήματος που επιλέξαμε, το παλινδρομικό πηδάλιο με δύο έμβολα βυθίσεως, τόσο στις περιπτώσεις επανδρωμένου πλοίου, ημι-αυτόνομου και πλήρως αυτόνομου και αντίστοιχα προβάλλουμε τα δομικά διαγράμματα της

SysML, το internal block diagram και block definition diagram, ενημερωμένα με τις πληροφορίες εφεδρείας για την κάθε περίπτωση. Τα διαγράμματα αυτά δηλώνονται ως εντολές εισόδου στον αλγόριθμο για τη δημιουργία του δυναμικού δένδρου σφαλμάτων.

Λέξεις-κλειδιά: *Ανάλυση Ασφαλείας, Αυτονομία, Δένδρα Σφαλμάτων, Εφεδρεία, Μηχανική Συστημάτων, Μοντελοποίηση, Πηδάλιο, Πλοίο εξυπηρέτησης, Υπεράκτια Εξέδρα*

ABSTRACT

The complexity of systems in shipping is growing rapidly. The need to automate certain processes, both on the ship and in its direct and indirect environment, has greatly contributed to this, which is clearly in line with the trend of recent years for fully autonomous shipping. The smooth operation of a vessel and the maintenance of the safety and reliability of its systems is, therefore, a priority in the design phase of these systems. One such system is the vessel's steering gear system, which is directly connected to the proper operation of the ship, autonomous or not. A possible failure of this system could cause some serious problems, especially when the ship functions require constant handling and maneuvering, for example in case of an offshore support vessel approaching an offshore platform. The most common way to reduce the likelihood of failure is to add redundant components which will replace the primary system components in the event of a malfunction. A method which would facilitate the safety analysis is model-based systems engineering as it allows the evaluation and intervention to these systems during the whole design phase. The required risk analysis is performed in these critical systems based on the resulting models and various tools such as fault tree analysis.

This dissertation is basically divided into two parts. The first part is the bibliographic overview in which the two main components of the overall system are mentioned and analyzed first: the offshore installation and the offshore support vessel. Next, we present the concept of autonomy in Shipping and whether this concept could affect offshore construction work and reference is made to the concept of collision avoidance between an OSV and a platform. The steering gear system of the ship is presented in detail, and it will be studied in the experimental part. In addition, references are made to systems engineering and MBSE and their integration with safety analysis. The Systems Modeling Language (SysML) is also introduced, and a brief but comprehensive reference is made to the concept of redundancy of mechanical systems. Finally, we analyze the basic methodology of the FTA, the fault trees, highlighting their basic functions, advantages and disadvantages.

In the second part, the experimental analysis is performed. Firstly, the concept of Redundancy Profile is introduced through a meta-model derived from UML and all the necessary information is provided for the modeling of the redundant components and their integration in the system model we study. Subsequently, we state the suggested algorithm for the generation of dynamic fault trees which takes into consideration the derived SysML model and the built-in Redundancy Profile. In the end, we present the modeling in SysML of the critical system we have chosen: the double ram reciprocating steering gear system in case of manned, semi-autonomous and fully autonomous vessels and respectively we display the structural SysML diagrams: the internal block diagram and the block definition diagram, updated with redundancy information for each case. These diagrams are declared as input to the algorithm in order to create the dynamic fault tree.

Keywords: *Autonomy, Fault Trees, Offshore Support Vessel, Offshore Platform, Redundancy, Safety Analysis, Steering Gear, Systems Engineering*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ **2**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **3**

ABSTRACT **5**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ **7**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ **10**

1. ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ 10
2. ΠΛΟΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (OSVs) 14
3. ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ 16
   3.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΑ 22
   3.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ 24
   3.3. ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ 25
   3.4. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΓΙΑ OSVs 26
4. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ – ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΕΞΕΔΡΑΣ 28
5. ΤΟ ΠΗΔΑΛΙΟ 34

5.1. Μηχανικο Πηδαλιο 34
5.2. Ηλεκτρικο Πηδαλιο 35
5.3. Ηλεκτροϋδραυλικο Πηδαλιο 36
   5.3.1. Σύστημα τηλεκινήσεως 36
   5.3.2. Μηχάνημα κινήσεως του πηδαλίου 37
   5.3.3. Μηχανισμός στροφής του πηδαλίου 37

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ – MBSE 43
7. SYSML 45
8. REDUNDANCY 48
9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΝΔΡΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ – FAULT TREE ANALYSIS 49

ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ **55**

1. REDUNDANCY PROFILE 56
2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ DYNAMIC FAULT TREE 59
3. CASE STUDY 62

ΕΠΙΛΟΓΟΣ **66**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ **68**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά γενική ομολογία, οι μεταφορές που διενεργούνται δια θαλάσσης είναι αρκετά ασφαλείς, οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον. Το παγκόσμιο εμπόριο σε συντριπτικό ποσοστό, αφορά τις θαλάσσιες μεταφορές, γεγονός που σε συνδυασμό με διάφορες άλλες χρήσεις πλοίων, αυξάνει σημαντικά την κίνηση στις θαλάσσιες οδούς. Οι θαλάσσιες μεταφορές ωστόσο, δεν ανάγονται μόνο στη διακίνηση προϊόντων από μια περιοχή σε μια άλλη. Η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για υπεράκτιες εργασίες βαθέων υδάτων (deep-water off-shore operations) έχει οδηγήσει την περαιτέρω χρησιμοποίηση πλοίων με σκοπό την εξυπηρέτηση των αναγκών στις περιοχές που διενεργούνται οι εργασίες αυτές.

Οι εργασίες αυτές αφορούν στο μεγαλύτερο βαθμό τους την εξερεύνηση και εξόρυξη υδρογονανθράκων σε αρκετά μεγάλα βάθη στον ωκεανό. Για το λόγο αυτό διάφορες υπεράκτιες κατασκευές έκαναν την εμφάνισή τους στη θάλασσα με στόχο την κάλυψη της συνεχούς ανάγκης για ενέργεια. Για την καλύτερη εξυπηρέτηση των υπεράκτιων εγκαταστάσεων χρησιμοποιούνται πλοία. Τα πλοία αυτά, γνωστά και ως πλοία εξυπηρέτησης είναι πλοία που παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην διεκπεραίωση εργασιών σε θαλάσσιες περιοχές αρκετά απομακρυσμένες από την στεριά παρέχοντας είτε τεχνική υποστήριξη είτε ανθρώπινο δυναμικό και προμήθειες, όποτε είναι απαραίτητο.

Τα τελευταία χρόνια, μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η παγκόσμια - κυρίως εμπορική - ναυτιλία είναι η εισαγωγή στον κλάδο των αυτόνομων πλοίων. Τα πλοία αυτά θα έχουν τους ίδιους ακριβώς σκοπούς με ένα συμβατικό πλοίο, μόνο που θα λειτουργούν είτε με πλήρωμα που θα έχει χαρακτήρα διεκπεραιωτικό είτε πλήρως μη επανδρωμένα. Φυσικά, ένα αυτόνομο ή ημι-αυτόνομο πλοίο μπορεί να εξυπηρετήσει τις ανάγκες μιας υπεράκτιας εγκατάστασης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, εξαιτίας και της σχετικά σταθερής και εύκολης διαδρομής στεριά – υπεράκτια κατασκευή.

Εντούτοις, το μεγαλύτερο πρόβλημα που συναντάται από την «αλληλεπίδραση» μιας υπεράκτιας εγκατάστασης και ενός πλοίου εξυπηρέτησης είναι ο κίνδυνος της μεταξύ τους σύγκρουσης. Τα αίτια μιας τέτοιας σύγκρουσης μπορεί να είναι διάφορα: ανθρώπινα λάθη, καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες, μηχανικές αστοχίες κ.ά.. Ωστόσο και οι συνέπειες μπορεί να είναι από μηδαμινές έως αρκετά ζημιογόνες (π.χ. πλήρης κατάρρευση της εγκατάστασης, περιβαλλοντική καταστροφή κ.ά.). Για το λόγο αυτό η μελέτη των συνθηκών κατά των οποίων συμβαίνει η σύγκρουση αποκτά μεγάλη σημασία και κατά συνέπεια συντελεί στην αναγνώριση προληπτικών και διορθωτικών μέτρων.

Ειδικά για τα πλοία εξυπηρέτησης μιας υπεράκτιας εξέδρας, ο κίνδυνος σύγκρουσής τους με αυτή είναι αξιοσημείωτος αν αναλογιστούμε το πόσο συχνά τα πλοία αυτά προσεγγίζουν τέτοιες εγκαταστάσεις. Κατά την προσέγγιση ή πρόσδεση στην εξέδρα επομένως, το σύστημα του πηδαλίου του πλοίου είναι κρίσιμο σύστημα ασφαλείας όσον αφορά τις διαδικασίες χειρισμού του καθώς πιθανή αστοχία σε κάποιο από τα μέρη του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ελέγχου του πλοίου. Υπάρχουν τριών ειδών πηδάλια: μηχανικό, ηλεκτρικό και ηλεκτροϋδραυλικό. Το πρώτο δεν χρησιμοποιείται πλέον σε σύγχρονες κατασκευές, ενώ τα άλλα δύο συστήματα ανάλογα το είδος του πλοίου έχουν διαφορετικές κατασκευές και πολυπλοκότητα.

Η πολυπλοκότητα αυτή του πηδαλίου και γενικά των σύγχρονων μηχανικών συστημάτων καθιστά επιτακτική την ανάγκη για αναγνώριση, αξιολόγηση και αντιμετώπιση των όποιων κινδύνων μπορεί να προκύψουν κατά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των συστημάτων αυτών. Η διαχείριση των πολύπλοκων αυτών συστημάτων αποτελεί αρμοδιότητα ενός διεπιστημονικού κλάδου που ονομάζεται Μηχανική Συστημάτων (Systems Engineering) και στόχο έχει το παραγόμενο σύστημα να αποτελεί έναν συνδυασμό στοιχείων που λειτουργούν σε συνέργεια ώστε να εκτελούν συλλογικά και εύρυθμα μια χρήσιμη λειτουργία του. Φυσικά, στα πιο κρίσιμα συστήματα αναφορικά με την ασφάλεια των κατασκευών η μηχανική συστημάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αξιολόγηση ασφαλείας (safety analysis) και την ανάλυση ρίσκου (risk analysis). Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση ως προς τη μηχανική συστημάτων είναι η Μηχανική Συστημάτων βάσει μοντέλων (MBSE), η οποία προσφέρει εργαλεία μοντελοποίησης για την υποστήριξη των απαιτήσεων, του σχεδιασμού, της ανάλυσης και των δραστηριοτήτων επικύρωσης του συστήματος ξεκινώντας από τον σχεδιασμό του αλλά και σε όλο τον κύκλο ζωής του.

Στην πράξη, υπάρχει ένα κενό ανάμεσα στην MBSE και στην αξιολόγηση ασφαλείας καθώς η τελευταία λαμβάνει χώρα σε αρκετά προχωρημένο στάδιο στη διαδικασία σχεδιασμού. Με την ενσωμάτωση ανάλυσης ασφαλείας και MBSE διασφαλίζεται η συνέπεια μεταξύ του σχεδιασμού του συστήματος και των στοιχείων ασφαλείας. Η MBSE παρέχει μια πληθώρα εργαλείων για τη μοντελοποίηση των μηχανικών συστημάτων όπως η UML, η SysML, η LML και η AADL, μέσω των οποίων παράγονται τα απαιτούμενα μοντέλα στα οποία μπορούν να γίνουν διορθωτικές παρεμβάσεις ανά πάσα στιγμή. Πολύ σημαντικό κατά τη δημιουργία των μοντέλων είναι η ενσωμάτωση της διάστασης της ασφάλειας και της αξιοπιστίας, η οποία αντικατοπτρίζεται τις περισσότερες φορές στην έννοια της εφεδρείας (redundancy).

Έχοντας ενημερώσει το μοντέλο για όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με το προφίλ εφεδρείας (redundancy profile) του συστήματος, πραγματοποιείται η ανάλυση ρίσκου με βάση όποια μεθοδολογία επιλεγεί. Μία μέθοδος που χρησιμοποιείται παραδοσιακά είναι η Ανάλυση Δένδρων Σφαλμάτων (fault tree analysis - FTA), η οποία αποτελεί μια λογική γραφική αναπαράσταση της διάδοσης γεγονότων σφαλμάτων που έχει ως σκοπό την αναγνώριση πιθανών αιτιών που προκαλούν αστοχία στο σύστημα έτσι ώστε να καθοριστεί ο βέλτιστος τρόπος μείωσης των κινδύνων. Η ανάλυση αυτή βασίζεται στα δένδρα σφαλμάτων (fault trees), τα οποία είναι δύο ειδών: στατικά (static) και δυναμικά (dynamic).

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι κατά βάση χωρισμένη σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι η βιβλιογραφική επισκόπηση μέσα στην οποία αναφέρονται και αναλύονται αρχικά τα δύο βασικά μέρη του συστήματος: η υπεράκτια εγκατάσταση και το πλοίο εξυπηρέτησης. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η έννοια της αυτονομίας στη Ναυτιλία και κατά πόσο αυτό μπορεί να επηρεάσει τις εργασίες στις υπεράκτιες κατασκευές και έπειτα, γίνεται αναφορά στην έννοια της αποφυγής συγκρούσεων και της ανάλυσης ρίσκου. Παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα πηδαλιούχησης του πλοίου, το οποίο θα μελετηθεί στο πειραματικό μέρος. Γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στη μηχανική συστημάτων και στην MBSE και στην ενσωμάτωση αυτών με την ανάλυση ασφαλείας. Επίσης, παρουσιάζεται η γλώσσα μοντελοποίησης SysML και γίνεται μια σύντομη αλλά περιεκτική αναφορά στην έννοια του redundancy στα μηχανικά συστήματα. Τέλος, αναλύουμε τη βασική μεθοδολογία της FTA, τα

δένδρα σφαλμάτων, υπογραμμίζοντας τις βασικές τους λειτουργίες, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας πραγματοποιείται η πειραματική ανάλυση. Αρχικά, εισάγεται η έννοια του Redundancy Profile μέσω ενός μοντέλου προερχόμενο από τη UML και παρέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για τη μοντελοποίηση των εφεδρειών και την ενσωμάτωση τους στο μοντέλο του συστήματος που θα μελετήσουμε. Στην συνέχεια, παρατίθεται ένας προτεινόμενος αλγόριθμος δημιουργίας δυναμικών δένδρων σφαλμάτων, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το μοντέλο της SysML που κατασκευάζουμε και το ενσωματωμένο σε αυτό Redundancy Profile. Στο τέλος, παρουσιάζουμε τη μοντελοποίηση σε SysML του κρίσιμου συστήματος που επιλέξαμε, το παλινδρομικό πηδάλιο με δύο έμβολα βυθίσεως, τόσο στις περιπτώσεις επανδρωμένου πλοίου, ημι-αυτόνομου και πλήρως αυτόνομου και αντίστοιχα προβάλλουμε τα δομικά διαγράμματα της SysML, το internal block diagram και block definition diagram, ενημερωμένα με τις πληροφορίες εφεδρείας για την κάθε περίπτωση. Τα διαγράμματα αυτά δηλώνονται ως εντολές εισόδου στον αλγόριθμο για τη δημιουργία του δυναμικού δένδρου σφαλμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

1. ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ

Το 1891 περίπου, εγκαταστάσεις στηριζόμενες σε ξύλινους πασσάλους χρησιμοποιήθηκαν για την εξόρυξη πετρελαίου από πηγάδια στον πυθμένα της λίμνης Grand Lake St. Mary's στο Ohio των ΗΠΑ., τα οποία πηγάδια κατασκευάστηκαν από μικρές τοπικές εταιρίες όπως η Bryson, Riley Oil και Banker's Oil (Offshore Drilling: History and Overview, 2010). Η αναζήτηση για ενέργεια σε μεγάλα βάθη των ωκεανών χρονολογείται πάνω από 120 χρόνια. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη απόπειρα γίνεται το 1897, όπου ο H. L. Williams πιστώνεται την εξόρυξη πηγαδιού πετρελαίου μέσω μιας ξύλινης προβλήτας στο Κανάλι Santa Barbara της California. Χρησιμοποίησε την προβλήτα για την υποστήριξη μιας χερσαίας πλατφόρμας δίπλα σε ένα υπάρχον πεδίο. Πέντε χρόνια αργότερα, υπήρχαν ήδη 150 υπεράκτια πηγάδια στην περιοχή (PetroWiki, 2015).

Στις αρχές της δεκαετίας 1930, η Texas Co. (πλέον Chevron) κατασκεύασε τις πρώτες κινητές φορτηγίδες από χάλυβα με στόχο την γεώτρηση σε παράκτιες περιοχές του Κόλπου του Μεξικό. Το 1937, η Pure Oil (πλέον Chevron) σε συνεργασία με την Superior Oil (πλέον ExxonMobil) χρησιμοποίησαν μια σταθερή πλατφόρμα για την ανάπτυξη ενός πεδίου περίπου 1,5 χιλιόμετρο ανοικτά της Λουϊζιάνα και σε βάθος 4.300 μέτρων (Offshore Drilling: History and Overview, 2010). Με την έναρξη του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, όλες οι υπεράκτιες δραστηριότητες εξόρυξης σταμάτησαν. Μετά το τέλος του, οι πετρελαϊκές εταιρίες που έδρευαν στις ΗΠΑ αναζήτησαν νέες προοπτικές γεώτρησης με υψηλό δυναμικό αποθέματος εξαιτίας του γεγονότος ότι το μεγαλύτερο μέρος των «καλών» χερσαίων εκτάσεων ήταν ήδη μισθωμένο ύστερα από 50 χρόνια ερευνών για γεωτρήσεις (Schempf, 2004).

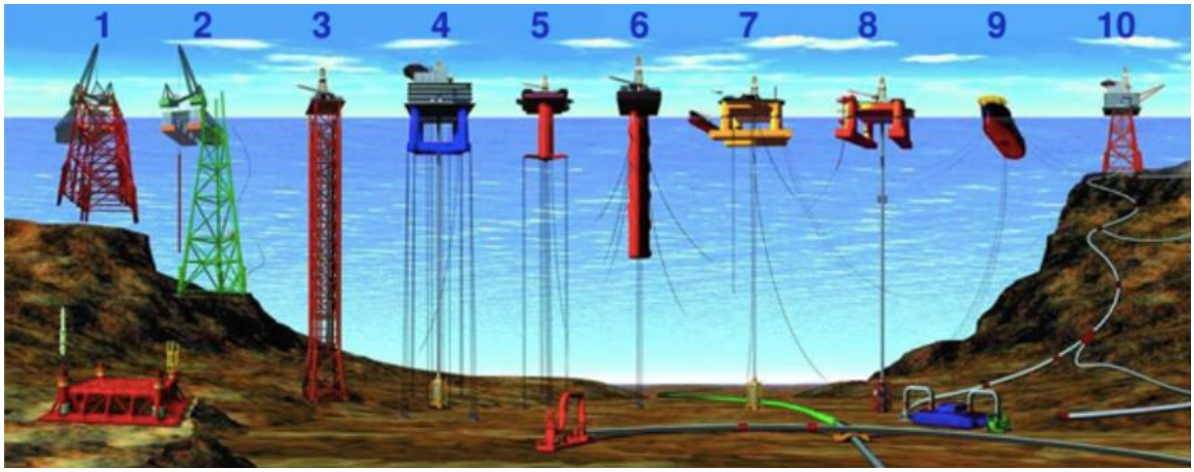
Κατά τα επόμενα χρόνια, κάποιες αρκετά αξιοσημείωτες ανακαλύψεις και καινοτομίες παρουσιάστηκαν κυρίως ανοικτά της Αμερικής και της Αγγλίας και χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι μέχρι το 2010 υπήρχαν πάνω από 620 διαθέσιμες κινητές υπεράκτιες μονάδες εξόρυξης (jack-up, ημι-βυθιζόμενα, γεωτρητικά σκάφη, φορτηγίδες) (Wikipedia, 2021).

Γενικά, μια *υπεράκτια εξέδρα (offshore platform)* εξόρυξης είναι μια μεγάλη κατασκευή με εγκαταστάσεις για γεώτρηση πηγαδιών για εξερεύνηση, εξαγωγή αποθήκευση και επεξεργασία πετρελαίου και φυσικού αερίου που βρίσκονται σε πετρώματα κάτω από τον θαλάσσιο βυθό. Οι περισσότερες πλατφόρμες παρέχουν τη δυνατότητα φιλοξενίας του εργατικού δυναμικού τους. Κατά κύριο λόγο, συναντώνται σε δραστηριότητες στην υφαλοκρηπίδα αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε λίμνες και χερσαία ύδατα (Wikipedia, 2021).

Οι υπεράκτιες αυτές κατασκευές είναι σχεδιασμένες για εγκατάσταση σε ανοιχτή θάλασσα, λίμνες και κόλπους αρκετά χιλιόμετρα από τις ακτογραμμές. Έτσι οι κατασκευές αυτές πρέπει να λειτουργούν με ασφάλεια με βάση την σχεδιαστική διάρκεια ζωής τους – 50 με 75 χρόνια για λιμάνια και 25 και άνω χρόνια για εξέδρες εξόρυξης – σε αρκετά δύσκολα θαλάσσια περιβάλλοντα. Μερικές σημαντικές θεωρήσεις κατά τον σχεδιασμό είναι τα μέγιστα φορτία που δέχονται από τους ανέμους και τα κύματα, τα φορτία κόπωσης από τα

κύματα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της πλατφόρμας και η κίνηση της πλατφόρμας. Κατασκευάζονται κυρίως από διάφορες ποιότητες χάλυβα, είναι πολύ βαριές και συγκαταλέγονται ανάμεσα στις πιο ψηλές κατασκευές στον κόσμο (Sadeghi, 2008).

Σήμερα, αξιοσημείωτα υπεράκτια πεδία γεωτρήσεων βρίσκονται στη Βόρεια Θάλασσα, στον Κόλπο του Μεξικό, στα λεκανοπέδια Campos και Santos ανοιχτά της Βραζιλίας, ορισμένα πεδία στα ανοιχτά της Δυτικής Αφρικής κυρίως δυτικά της Νιγηρίας και της Αγκόλας, όπως και επίσης υπεράκτια πεδία στην Νοτιοανατολική Ασία και στο Sakhalin στη Ρωσία (Offshore Drilling: History and Overview, 2010).



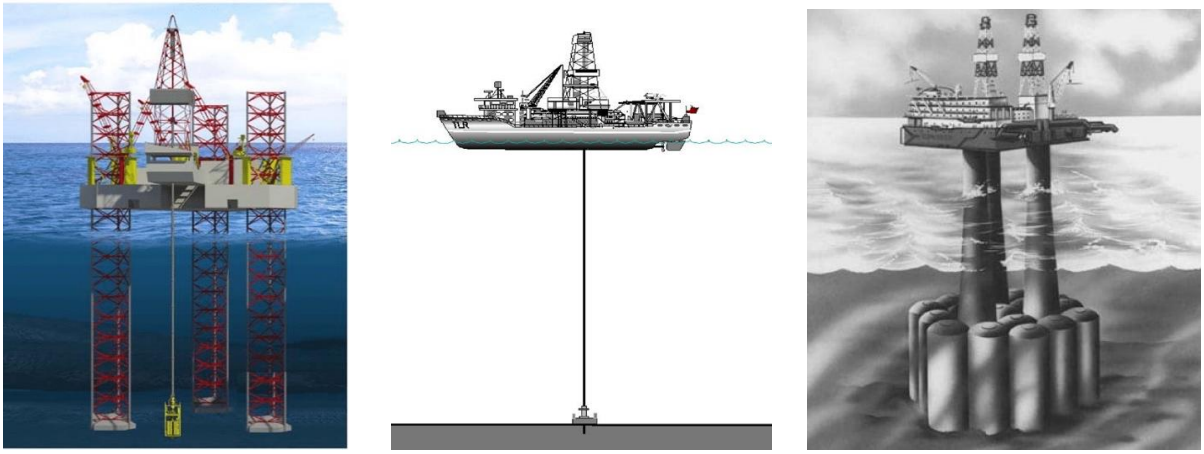
Εικόνα 1: *Υπεράκτιες πλατφόρμες και πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου (Πηγή: Wikipedia)*

Τα βασικότερα είδη υπεράκτιων εξεδρών, όπως φαίνονται και στην παραπάνω εικόνα είναι (Wikipedia, 2021):

1,2) Συμβατικές σταθερές πλατφόρμες (fixed platforms)
3) Συμβατός πύργος (compliant tower)
4,5) Πλατφόρμες με προεντεταμένα συρματόσχοινα (tension leg platforms – TLP)
6) Πλατφόρμα τύπου Spar (spar platform)
7, 8) Ημιβυθισμένες εξέδρες (semi-submersibles)
9) Εγκαταστάσεις FPSO (Floating production, storage and offloading)
10) Εγκατάσταση για sub-sea completion and tieback

Εκτός από τα παραπάνω, άλλοι τύποι τέτοιων εξεδρών είναι:

11) Πλατφόρμες τύπου jack-up (jack-up rigs)
12) Γεωτρητικά σκάφη (drilling ships)
13) Εξέδρες Βαρύτητας (gravity-based structures)
14) Μη επανδρωμένες εγκαταστάσεις (normally unmanned installations).



Εικόνα 2 *(από αριστερά προς δεξιά): Πλατφόρμα Jack-up – Γεωτρητικό σκάφος – Εξέδρα βαρύτητας*

(Πηγές: ResearchGate, Wikipedia, M2UKblog)

Προκλήσεις:

Οι εργασίες για εξόρυξη υδρογονανθράκων σε εξέδρα στον ωκεανό αντιμετωπίζουν κάποιες σοβαρές προκλήσεις. Αρχικά, οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις, σε αντίθεση με τις χερσαίες, λειτουργούν σε αρκετά απομακρυσμένα και σκληρά περιβάλλοντα, ορισμένες φορές με ακραίες καιρικές συνθήκες. Επίσης, σε αυτό συνυπολογίζονται τα φορτία από τους ισχυρούς κυματισμούς και ανέμους αλλά και οι υποθαλάσσιες πιέσεις στο κύριο σώμα της κατασκευής και στον πυθμένα. Τέλος, σημαντικές προκλήσεις είναι ο εφοδιασμός και το ανθρώπινο δυναμικό της εξέδρας. Ο εφοδιασμός και η μεταφορά απορριμμάτων γίνεται με πλοίο και πρέπει να είναι καλά σχεδιασμένη επειδή ο διαθέσιμος χώρος στις εγκαταστάσεις της εξέδρας είναι περιορισμένος. Οι καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες μπορεί πολύ συχνά να καθιστούν την προσέγγιση της εγκατάστασης από κάποιο πλοίο εξυπηρέτησης δύσκολη (Offshore Drilling: History and Overview, 2010).

Η υπεράκτια παραγωγή πετρελαίου εμπεριέχει ορισμένους κινδύνους για το περιβάλλον, κυρίως πετρελαιοκηλίδες από πετρελαιοφόρα ή από αγωγούς που μεταφέρουν πετρέλαιο από την εξέδρα σε χερσαίες εγκαταστάσεις ή από ατυχήματα στην εξέδρα. Επίσης επεξεργασμένο νερό παράγεται το οποίο αναδύεται είτε από παραγωγή ή γεώτρηση πηγαδιών και περιέχει ποικίλες ποσότητες πετρελαίου, γεωτρητικού υγρού ή άλλων χημικών που χρησιμοποιούνται ή παράγονται στην παραγωγή πετρελαίου. Σύμφωνα με την οργάνωση, Culture Change, περίπου 90.000 τόνοι γεωτρητικού υγρού και μετάλλων απορρίπτονται από μια εξέδρα στον Κόλπο του Μεξικό κατά τη διάρκεια όλων των χρόνων λειτουργίας της (Offshore Drilling: History and Overview, 2010).

Autonomous offshore platforms

Ακολουθώντας τη γενικότερη τάση αυτοματοποίησης, μη επανδρωμένες υπεράκτιες εξέδρες είναι υπό σχεδιασμό ώστε να λειτουργούν από απόσταση είτε από μια χερσαία εγκατάσταση είτε από γειτονική πλατφόρμα. Αδιαμφισβήτητα, η αυτοματοποίηση συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του ανθρώπινου λάθους αλλά και στη σημαντική μείωση του κόστους διαχείρισης τέτοιων υπεράκτιων πεδίων. Ωστόσο, εξαιτίας της απομακρυσμένης λειτουργίας της υπάρχει ο κίνδυνος για προβλήματα στην επικοινωνία μεταξύ πλατφόρμας και χερσαίας εγκατάστασης καθώς επίσης και ο κίνδυνος για επίθεση στον κυβερνοχώρο με στόχο την κατάρρευση του συστήματος επικοινωνίας. Επίσης, κατά κύριο λόγο, το προσωπικό της

εξέδρας αντικαθίσταται από αισθητήρες (sensors) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την συλλογή δεδομένων και πρέπει ανά πάσα στιγμή να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργεία τους, ειδικά κάτω από δυσμενείς συνθήκες. Τέλος, μια δυσλειτουργία στην εξέδρα σε συνδυασμό με την μη άμεση αντιμετώπιση λόγω απουσίας προσωπικού μπορεί να αποβεί μοιραία, τόσο για την ίδια την εξέδρα όσο και για το περιβάλλον (BureauVeritas, 2019).

2. ΠΛΟΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ (OSVs)

Από τα πρώτα κιόλας χρόνια των υπεράκτιων εργασιών πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα πλοία εξυπηρέτησης υπήρξαν ο θεμελιώδης σύνδεσμος σχετικά με την ενίσχυση της ανάπτυξης της βιομηχανίας υπεράκτιων δραστηριοτήτων (Guzmán, 2019). Η σημαντική επέκταση των βιομηχανιών πετρελαίου και φυσικού αερίου τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για υπεράκτια σκάφη εξυπηρέτησης ώστε να εκτελούνται διαφορετικές λειτουργίες που είναι απαραίτητες για τις εξέδρες γεώτρησης. Με άλλα λόγια, οι υπεράκτιες εξέδρες, από τη φύση τους, χρειάζονται τα πλοία εξυπηρέτησης (Wärtsilä, 2020).

Εικόνα 3: *Υπεράκτια πλοία εξυπηρέτησης (Πηγή: Wärtsilä)*

Γενικά, *υπεράκτια πλοία (offshore vessels)* είναι πλοία που εξυπηρετούν ειδικά λειτουργικούς σκοπούς όπως η εξερεύνηση πετρελαίου και οι κατασκευαστικές εργασίες στην ανοικτή θάλασσα. Υπάρχει ποικιλία υπεράκτιων τέτοιων πλοίων, τα οποία όχι μόνο βοηθούν στην εξερεύνηση και στη γεώτρηση πετρελαίου αλλά παρέχουν όλες τις απαραίτητες προμήθειες στις υπεράκτιες ανασκαφικές και κατασκευαστικές μονάδες. Επίσης, τα πλοία αυτά είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά από και προς τις περιοχές όπου πραγματοποιούνται οι εργασίες, αν και όταν αυτό είναι απαραίτητο (Chopra, 2019).

Από τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η έννοια του υπεράκτιου πλοίου είναι συλλογική και ως τέτοια περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πλοίων που εξυπηρετούν τον τομέα της ανοικτής θάλασσας. Κυρίως, μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες ομάδες (Chopra, 2019):

- Ερευνητικά και Γεωτρητικά Πλοία (Oil Exploration and Drilling Vessels)
- Υπεράκτια Πλοία Υποστήριξης (Offshore Support Vessels)
- Υπεράκτια Πλοία Παραγωγής (Offshore Production Vessels)
- Πλοία Κατασκευής / Ειδικού Σκοπού (Construction/Special Purpose Vessels)

Ορισμένα υπεράκτια πλοία παρέχουν το απαραίτητο ανθρώπινο δυναμικό και την απαιτούμενη τεχνική υποστήριξη έτσι ώστε οι λειτουργικές διαδικασίες στην ανοιχτή θάλασσα να συνεχίζονται ομαλά και χωρίς διακοπές. Αυτά τα πλοία είναι γνωστά ως

υπεράκτια πλοία υποστήριξης (offshore support vessels - OSVs). Από κατασκευαστικής άποψης, τα πλοία υποστήριξης μπορούν να κατασκευαστούν ειδικά για να ταιριάζουν τις λειτουργικές απαιτήσεις των εργασιών. Με την σειρά τους, τα OSV χωρίζονται στους παρακάτω βασικούς τύπους (Chopra, 2019):

- Anchor Handling Tug Vessels – AHTV
- Seismic Vessels
- Platform Supply Vessels – PSVs
- Well Intervention Vessels
- Accommodation Ships

Τα πλοία εφοδιασμού/εξυπηρέτησης εξέδρας (PSV) είναι το είδος αυτό των OSV το οποίο κυρίως χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του απαραίτητου εξοπλισμού και επιπρόσθετου ανθρώπινου δυναμικού με στόχο την ενίσχυση των λειτουργιών στην ανοιχτή θάλασσα. Ένα PSV σε μια πιο ευρεία και κυριολεκτική έννοια είναι ένα «αρκετά αναγκαίο πλοίο υποστήριξης». Έτσι αρκετά συχνά τα υπεράκτια πλοία υποστήριξης και τα πλοία εξυπηρέτησης εξέδρας *εννοιολογικά ταυτίζονται* και συνεπώς τα PSV αποκαλούνται κοινώς και OSV (Kaushik, 2019). Ένα τυπικό προφίλ λειτουργίας ενός PSV αποτυπώνεται ως εξής: το πλοίο ξοδεύει περίπου 25% του χρόνου του για φόρτωση – εκφόρτωση στο λιμάνι, 40% κατά τον απόπλου σε εύρος 14-16 κόμβων όντας σε υπηρεσία και 35% για φόρτωση – εκφόρτωση στη θάλασσα, αρκετά συχνά υπό ισχυρούς ανέμους και δυνατά ρεύματα (Wärtsilä, 2020).

Προκειμένου να εμπεριέχουν έναν πιο ποικίλο και πολυλειτουργικό ρόλο, οι εγκαταστάσεις που τοποθετούνται πάνω σε ένα PSV έχουν φέρει επανάσταση, με συνέπεια να είναι από τα πλέον εξελιγμένα τεχνικά σκάφη εν ενεργεία (Wärtsilä, 2020). Η μοναδικότητα των πλοίων αυτών πηγάζει από πολλούς παράγοντες, χωρίς να συνυπολογίζουμε το μοναδικό του ρόλο στον υπεράκτιο κατασκευαστικό τομέα. Υπό μία πιο ευρύτερη σκοπιά, τα πλοία εξυπηρέτησης δεν μεταφέρουν μόνο τον βαρύ δομικό εξοπλισμό αλλά και άλλα δομικά και χημικά στοιχεία, χρήσιμα για τις υποθαλάσσιες εργασίες. Επιπροσθέτως, μεταφέρεται φαγητό και προμήθειες στο προσωπικό που εργάζεται στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις (Kaushik, 2019).

Επί του παρόντος, η ανάγκη για πλοία εξυπηρέτησης έχει αρχίσει να γίνεται όλο και πιο αισθητή σε σύγκριση με τα προηγούμενα χρόνια. Αυτό οφείλεται στην συνεχή αύξηση του αριθμού των δραστηριοτήτων στην ανοιχτή θάλασσα, η οποία με τη σειρά της συνετέλεσε στην πρόοδο της κατασκευής τέτοιων πλοίων. Η αυξανόμενη ζήτηση αυτή τροφοδότησε την ανάγκη για περισσότερα PSV, που σε συνδυασμό με τα οφέλη των σύγχρονων τεχνολογιών μπορεί εύκολα να θεωρηθεί ως μια θετική ώθηση ως προς ένα βιώσιμο και εξαιρετικά αναγκαίο μέσο λειτουργίας (Kaushik, 2019).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι όροι PSV και OSV εννοιολογικά ταυτίζονται στις περισσότερες των περιπτώσεων. Για τον λόγο αυτό, στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας θα χρησιμοποιήσουμε αποκλειστικά τον όρο OSV.

3. ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Από ένα ξύλινο αιγυπτιακό εμπορικό πλοίο το 1500 π.Χ. έως ένα LNG carrier κατασκευασμένο το 2019, ένα τουλάχιστον στοιχείο παραμένει κοινό: η ύπαρξη του ανθρώπινου παράγοντα πάνω στο πλοίο. Ωστόσο, το όραμα για μερική αλλά και ολική απουσία του ανθρώπου από το πλοίο φαίνεται πλέον να παίρνει σάρκα και οστά. Η ιστορία μέχρι και σήμερα έχει δείξει ότι κάθε εργασία που πραγματοποιείται από τον άνθρωπο, τείνει τελικά να αντικατασταθεί από τεχνολογικές εφευρέσεις. Οι εφευρέσεις αυτές, επειδή έχουν το χαρακτηριστικό ότι άλλαξαν το ρου της παγκόσμιας ιστορίας, είναι γνωστές ως βιομηχανικές - τεχνολογικές επαναστάσεις. Ο όρος αυτός είναι ένας όρος ομπρέλα που εμπεριέχει όλες τις αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στην τεχνολογία και στην οργάνωση της βιομηχανικές παραγωγής, προκαλώντας μεταβολές στις εργασιακές συνθήκες, τις συνθήκες διαβίωσης και τον οικονομικό πλούτο μιας κοινωνίας (Πεταρούδη, 2015).

Έως σήμερα τρία μεγάλα ανθρώπινα επιτεύγματα έχουν χαρακτηριστεί ως βιομηχανικές επαναστάσεις. Η Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση έλαβε μέρος στην Αγγλία τον 18^{ο} αιώνα με τη μεταβολή της εργασίας από γεωργική σε βιομηχανική μέσω της ατμομηχανής. Έναν αιώνα αργότερα, η εκτεταμένη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας και η αύξηση στην παγκόσμια παραγωγή σιδήρου και χάλυβα επιφέρουν τη Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση. Το 1971 θεωρείται η αρχή της Τρίτης Βιομηχανικής Επανάστασης έπειτα από την εφεύρεση του μικροτσίπ και της επακόλουθης αυτοματοποίησης της παραγωγής. Η παραγωγικότητα αυξάνεται, ενώ παράλληλα το κόστος εργασίας μειώνεται εξαιτίας της ευρείας χρήσης την υπολογιστών (Πεταρούδη, 2015).

Η επικείμενη Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση βασίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στην αμέσως προηγούμενη, ωστόσο διαφέρει σε τρία ουσιαστικά χαρακτηριστικά: τη μεγάλη ποσότητα δεδομένων (Big Data), την υπολογιστική δύναμη των σύγχρονων υπολογιστών και κυριότερα την τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence). Η έρευνα και ανάπτυξη τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης έχει ως στόχο την αυτοματοποίηση των ευφυών συμπεριφορών όπως την ικανότητα κριτικής σκέψης, τη συλλογή πληροφοριών, τον σχεδιασμό, την επικοινωνία, τον χειρισμό και την αντίληψη (Πεταρούδη, 2015).

Οι καινοτομίες αυτές που λαμβάνουν χώρα στα πλαίσια της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης έχοντας πλέον επηρεάσει σημαντικά την καθημερινότητα και τις δραστηριότητες των ανθρώπων στην στεριά, κάνουν την είσοδό τους σιγά σιγά και στον χώρο της Ναυτιλίας. Οι τεχνολογίες που αναδύονται όπως το Internet of Things, τα Big Data, το Cloud Computing και η ρομποτική είναι ικανές να αλλάξουν ριζικά τον τρόπο σχεδίασης, κατασκευής και λειτουργίας του πλοίου στο μέλλον (Πεταρούδη, 2015). Αξιοποιώντας τη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των πληροφοριών και επικοινωνιών (ITC), τα πλοία κατασκευάζονται με ανεπτυγμένες δυνατότητες ελέγχου, επικοινωνία και διεπαφές (interfaces) και στο εγγύς μέλλον θα διευθύνονται από απομακρυσμένες χερσαίες ή υπεράκτιες εγκαταστάσεις, οποτεδήποτε και οπουδήποτε απαιτείται. Αυτά τα συστήματα , προσφέρουν την προοπτική βελτίωσης της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της επίδοσης των ναυτιλιακών εταιριών, αλλά ταυτόχρονα θέτουν και διάφορες προκλήσεις και κινδύνους που πρέπει να αναγνωριστούν και να κατανοηθούν ώστε οι καινοτόμες τεχνολογίες να ενσωματωθούν με το σχέδιο και τη λειτουργία των πλοίων με στόχο την εξασφάλιση της ασφάλειας (Komianos, 2018).

Σύμφωνα με τον IMO (IMO, E-navigation, 2014), η ηλεκτρονική πλοήγηση ή e-navigation ορίζεται ως «η εναρμονισμένη συλλογή, ενσωμάτωση, ανταλλαγή, παρουσίαση και ανάλυση των θαλάσσιων πληροφοριών, μεταξύ των πλοίων και της ξηράς με χρήση ηλεκτρονικών μέσων για τη βελτίωση της πλοήγησης και των συναφών υπηρεσιών για την ασφάλεια στη θάλασσα και την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Παράλληλα, η Ευρώπη θέλοντας να διατηρήσει την ηγετική παγκόσμια θέση που κατέχει σε διάφορους θαλάσσιους τομείς, μέσω της Ευρωπαϊκής Πλατφόρμας για τις Πλωτές Τεχνολογίες (Waterborne TP),η οποία αποτελεί ένα cluster κορυφαίων ευρωπαϊκών ενδιαφερόμενων μερών σχετικά με την θάλασσα, δημιουργεί ένα όραμα για τη ναυτιλιακή βιομηχανία του 2020 με βάση τρεις βασικούς πυλώνες: ανταγωνιστικότητα, ασφάλεια και αλλαγές στα εμπορικά πρότυπα (Rødseth & Burmeister, 2012).

Με βάση αυτό το όραμα, η Waterborne TP αναγνώρισε και διατύπωσε δώδεκα αξιοποιήσιμες εκβάσεις κατά προτεραιότητα που θα μπορούσαν να συνδράμουν στην ανάπτυξη του ευρωπαϊκού θαλάσσιου τομέα στα πλαίσια των πυλώνων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Μία από αυτές, που είναι αρκετά σημαντική και για τους τρεις πυλώνες είναι το «Αυτόνομο Πλοίο». Το αυτόνομο πλοίο είναι ουσιαστικά το πλοίο που λειτουργεί με χρήση τεχνητής νοημοσύνης και ορίζεται ως (Rødseth & Burmeister, 2012):

«Πλοίο εξοπλισμένο με συστήματα ελέγχου και τεχνολογία επικοινωνίας που επιτρέπει την ασύρματη παρακολούθηση και τον έλεγχο, συμπεριλαμβανομένων των προηγμένων συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων και τις δυνατότητες για απομακρυσμένη ημι-αυτόνομη ή πλήρως αυτόνομη λειτουργία».

Τα αυτόνομα πλοία θα είναι εξοπλισμένα με συστήματα που θα επιτρέπουν την αυτο-κατεύθυνση μέσω της ανίχνευσης αντικειμένων όπως εμπόδια με τη βοήθεια αισθητήρων και θα είναι ικανά να λαμβάνουν αποφάσεις μόνα τους, όπως την αποφυγή συγκρούσεων με άλλα αντικείμενα. Αυτό θα επιτυγχάνεται μέσω τεχνικών συστημάτων πάνω στο πλοίο που θα κάνουν χρήση αλγορίθμων και δεδομένων προερχόμενων από τους αισθητήρες. Η εισαγωγή της ιδέας του αυτόνομου πλοίου στη ναυτιλιακή βιομηχανία θα μπορούσε να είναι το εφαλτήριο μιας νέας εποχής με θετικές εξελίξεις ως προς την οικονομική απόδοση, την αποφυγή ατυχημάτων και τους ανθρώπινους πόρους (Komianos, 2018).

Ο όρος «αυτόνομο πλοίο» (κατά τον IMO: Maritime Autonomous Surface Ship – MASS) χρησιμοποιείται κυρίως για την αναπαράσταση ενός αυτο-πλεούμενου μη επανδρωμένου πλοίου, αλλά επί της ουσίας υπάρχουν διάφοροι βαθμοί αυτονομίας. Ο νηογνώμονας Lloyd's Register ορίζει επτά επίπεδα αυτονομίας (Autonomy Level – AL) από AL0 ως AL6 (βλ. Πίνακα 1) τα οποία συνοψίζονται παρακάτω ως εξής (O' Brien & Maxwell, 2018):

- *Επανδρωμένο πλοίο:* πλοίο με πλήρωμα ως συνήθως και με έναν χειριστή πάνω σε αυτό, υπεύθυνο για τη λήψη αποφάσεων
- *Απομακρυσμένο πλοίο:* πλοίο ελεγχόμενο από έναν χειριστή στην στεριά
- *Αυτοματοποιημένο πλοίο:* πλοίο που λειτουργεί με προγραμματισμένο λογισμικό και μπορεί να λειτουργεί μόνο εντός του πεδίου εφαρμογής αυτού
- *Πλήρως αυτόνομο πλοίο:* το λειτουργικό σύστημα του πλοίου είναι σε θέση να υπολογίζει συνέπειες και κινδύνους και να λαμβάνει αποφάσεις μόνο του.

Παράλληλα, προκειμένου να υιοθετηθεί μια κοινή κατευθυντήρια γραμμή στην κατηγοριοποίηση των MASS, ο IMO ορίζει τα επίπεδα αυτονομίας ως εξής (IMO, 2018):

- *Βαθμός 1:* Πλοίο με αυτοματοποιημένες διαδικασίες και υποστήριξη αποφάσεων. Το πλήρωμα είναι πάνω στο πλοίο ώστε να ελέγχει και να λειτουργεί τα συστήματα του, αν και κάποιες λειτουργίες μπορεί να είναι αυτοματοποιημένες και χωρίς επιτήρηση ανά διαστήματα.
- *Βαθμός 2:* Πλοίο απομακρυσμένου ελέγχου με πλήρωμα. Το πλοίο ελέγχεται και λειτουργείται από άλλη τοποθεσία, ενώ το πλήρωμα είναι πάνω στο πλοίο ώστε αν χρειαστεί να αναλάβει τον έλεγχο της λειτουργίας του.
- *Βαθμός 3:* Πλοίο απομακρυσμένου ελέγχου χωρίς πλήρωμα. Το πλοίο είναι μη επανδρωμένο και ελέγχεται και λειτουργείται από άλλη τοποθεσία.
- *Βαθμός 4:* Πλήρως αυτόνομο πλοίο. Το λειτουργικό σύστημα του πλοίου είναι ικανό να λαμβάνει αποφάσεις και να καθορίζει δράσεις από μόνο του.

Στα συμβατικά εμπορικά πλοία σήμερα, αρκετά από τα συστήματα των μηχανοστασίων είναι αυτοματοποιημένα σε αρκετά μεγάλο βαθμό και λειτουργούν με περιοδικά μη επανδρωμένους χώρους κινητήρα. Επιπλέον, αυτοματοποιημένες ως ένα βαθμό θεωρούνται και οι λειτουργίες πλοήγησης καθώς τα πλοία είναι εξοπλισμένα με προηγμένα ραντάρ κατά των συγκρούσεων (Automatic Radar Plotting Aid – ARPA) και κοινά συστήματα αυτοματισμού όπως ο αυτόματος πιλότος και άλλα συστήματα συγκέντρωσης πληροφοριών από το περιβάλλον του πλοίου όπως το Αυτόματο Σύστημα Αναγνώρισης (Automatic Identification System – AIS) και το σύστημα Αναγνώρισης και Παρακολούθησης Μεγάλης Εμβέλειας (Long Range Identification and Tracking – LRIT). Παρ' όλα αυτά, τα πλοία είναι απαραιτήτως επανδρωμένα για την εκτέλεση εργασιών συντήρησης και την παρακολούθηση των λειτουργιών (Mogens, Henriques, & Bang, 2017).

Η αυτοματοποίηση σε ένα πλοίο διακρίνεται ανάλογα με τον βαθμό που κάποιες απαιτητικές λειτουργίες του πλοίου εκτελούνται από προηγμένα συστήματα αυτοματισμού χωρίς ανθρώπινη αλληλεπίδραση. Από την άλλη μεριά, αυτονομία είναι το αποτέλεσμα εφαρμογής συστημάτων τεχνητής νοημοσύνης σε ένα πλοίο ώστε αυτό να ασκεί κάποια μορφή αυτοδιοίκησης, δηλαδή είναι ένας συνδυασμός αυτοματισμού και αυτοδιαχείρισης (Πεταρούδη, 2015).

Η λειτουργία ενός τηλεχειριζόμενου πλοίου ελέγχεται από ένα κέντρο ελέγχου στην ξηρά αλλά χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό αυτοματισμού, όπου το σύστημα αναμένεται να λειτουργεί με ασφάλεια από μόνο του. Οι ενέργειες που εκτελούνται βασίζονται σε μια προγραμματισμένη ακολουθία, ενώ σε περίπτωση που το πλοίο έρθει αντιμέτωπο με κάποια ανεπιθύμητη κατάσταση ή ολοκληρωθεί μια αυτόματη λειτουργία ζητείται η ανθρώπινη παρέμβαση. Το περιορισμένα αυτόνομο πλοίο δύναται να λειτουργεί πλήρως αυτόματα και ταυτόχρονα να έχει μια προκαθορισμένη επιλογή για επίλυση κοινώς απαντημένων προβλημάτων όπως η αποφυγή συγκρούσεων. Αντίθετα, το πλήρως αυτόνομο πλοίο, διαχειρίζεται όλες τις καταστάσεις μόνο του κάνοντας χρήση προηγμένων συστημάτων πληροφορικής και αισθητήρων χωρίς ανθρώπινη αλληλεπίδραση (Πεταρούδη, 2015).

Πίνακας 1: *Επτά Επίπεδα Αυτονομίας από Lloyd's Register* (IMO, Autonomous Shipping, 2018)

	Επίπεδο Αυτονομίας (AL)	Περιγραφή
AL0	Χειροκίνητο (Manual)	Καμία αυτόνομη λειτουργία, όλες οι ενέργειες και οι λήψεις αποφάσεων πραγματοποιούνται χειροκίνητα.
AL1	Υποστήριξη αποφάσεων εντός πλοίου (On-board decision support)	Όλες οι ενέργειες εκτελούνται από έναν χειριστή, αλλά η λήψη αποφάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί/ επηρεαστεί από τα συστήματα πάνω στο πλοίο.
AL2	Υποστήριξη αποφάσεων εντός και εκτός πλοίου (On&offboard decision support)	Όλες οι ενέργειες εκτελούνται από έναν χειριστή, αλλά η λήψη αποφάσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί/ επηρεαστεί από τα συστήματα εντός η εκτός του πλοίου.
AL3	Ενεργός άνθρωπος στον βρόγχο (Active human in the loop)	Οι αποφάσεις και ενέργειες εκτελούνται με ανθρώπινη επιτήρηση. Τα δεδομένα παρέχονται από συστήματα είτε εντός είτε εκτός πλοίου.
AL4	Άνθρωπος στον βρόγχο, χειριστής/επιτηρητής (Human on the loop, operator/supervisory)	Οι αποφάσεις και οι ενέργειες γίνονται αυτόνομα με ανθρώπινη επιτήρηση. Οι αποφάσεις με σημαντικό αντίκτυπο λαμβάνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η ανθρώπινη παρέμβαση.
AL5	Πλήρως αυτόνομο (Fully autonomous)	Τμηματικά επιτηρούμενη λειτουργία, οι αποφάσεις λαμβάνονται από τα συστήματα.
AL6	Πλήρως αυτόνομο (Fully autonomous)	Λειτουργία χωρίς επιτήρηση όπου οι αποφάσεις λαμβάνονται και εκτελούνται αποκλειστικά από τα συστήματα.

Γίνεται εμφανές δηλαδή ότι υπάρχουν δύο γενικές εναλλακτικές που συνδυάζονται στη λειτουργία ενός αυτόνομου πλοίου: η «απομακρυσμένη λειτουργία» όπου τα καθήκοντα της λειτουργίας του πλοίου εκτελούνται από έναν απομακρυσμένο μηχανισμό ελέγχου, όπως λόγου χάρη ένας άνθρωπος σε ένα κέντρο στην ξηρά και η «αυτοματοποιημένη λειτουργία» όπου προηγμένα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων πάνω στο πλοίο αναλαμβάνουν όλες τις λειτουργικές αποφάσεις ανεξάρτητα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Υπάρχουν ήδη ορισμένα μικρά στο μέγεθος μη επανδρωμένα και αυτόνομα σκάφη στον ναυτιλιακό τομέα τα οποία χρησιμοποιούνται για επιφανειακή πλοήγηση, έρευνα και επιστημονικές δραστηριότητες, υποθαλάσσιες επιχειρήσεις και σε συγκεκριμένες στρατιωτικές δραστηριότητες. Έχοντας αποδειχθεί ασφαλή, τα πλοία αυτά θεωρούνται το μονοπάτι προς την εξάλειψη του ανθρώπινου λάθους και συνεπώς της ελαχιστοποίησης των θαλάσσιων ατυχημάτων (Komianos, 2018).

Αδιαμφισβήτητα, πολύ σημαντικό ρόλο στην ύπαρξη και λειτουργία ενός αυτόνομου πλοίου, δεδομένης της αρκετά περιορισμένης έως εντελώς ανύπαρκτης ανθρώπινης παρέμβασης, παίζουν τα διάφορα συστήματα που υπάρχουν πάνω σε αυτό και συλλέγουν δεδομένα και πληροφορίες για το περιβάλλον του συμβάλλοντας στην ασφαλή πλοήγηση και επίσης έχουν τη δυνατότητα να ενεργοποιούν τις απαιτούμενες διαδικασίες σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η αντίληψη των στοιχείων στο περιβάλλον εντός ενός όγκου χώρου και χρόνου, η κατανόηση της σημασίας τους και η προβολή της κατάστασής τους στο εγγύς μέλλον αποκαλούνται κοινώς με τον όρο *επίγνωση της κατάστασης (situational awareness - SA)*. Από τη ναυτιλιακή σκοπιά, η επίγνωση της κατάστασης περιλαμβάνει ακριβή ανίχνευση αντικειμένων, δυνατότητα παρατήρησης καιρικών φαινομένων και την συνολική αίσθηση του πλοίου. Φυσικά, όσον αφορά την ασφάλεια στην πλοήγηση, η SA είναι ζωτικής σημασίας (Kampantais, 2016).

Στην παραδοσιακή «επανδρωμένη» ναυτιλία, η επίγνωση της κατάστασης κατά κύριο λόγο επιτυγχάνεται από τον ανθρώπινο παράγοντα επί του πλοίου. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση των επανδρωμένων πλοίων, η ανθρώπινη αντίληψη συμπληρώνεται ως ένα βαθμό από τεχνολογικές υποδομές όπως τον εξοπλισμό Radar και το Αυτόματο Σύστημα Αναγνώρισης (AIS) (Kampantais, 2016). Τα Radar και το AIS μαζί με διάφορα άλλα ναυτιλιακά συστήματα όπως το GPS, το ARPA (Automatic Radar Plotting Aid), την πυξίδα, τους ηλεκτρονικούς χάρτες κλπ. αποτελούν τα Ηλεκτρονικά Συστήματα Απεικόνισης Χαρτών και Πληροφοριών (Electronic Chart Display and Information Systems – ECDIS), τα οποία συμπεριλαμβάνονται σε μια κεντρική οθόνη για την απεικόνιση όλων των βασικών στοιχείων του πλου ενώ παράλληλα συμβάλλει στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, παρέχοντας τη δυνατότητα λήψεως άμεσων και σωστών αποφάσεων (Bhattacharjee, 2020). Σημαντικό ρόλο επίσης στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος του πλοίου και την συγκέντρωση πληροφοριών παίζουν και συστήματα καμερών που είναι εγκατεστημένα στο πλοίο αλλά και το σύστημα LIDAR (Light Detection & Ranging).

Η αυτονομία θεωρείται ως μια δυνατότητα για τις θαλάσσιες μεταφορές ώστε να ανταπεξέλθουν στην ανταγωνιστικότητα, την ασφάλεια και τις προκλήσεις βιωσιμότητας του σήμερα αλλά και του αύριο. Οι τεχνολογίες, κυρίως αυτές των αισθητήρων, που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση των αυτόνομων εμπορικών πλοίων υπάρχουν ήδη. Το πιο σημαντικό είναι η εύρεση του βέλτιστου τρόπου ώστε να συνδυαστούν οι τεχνολογίες αυτές αποτελεσματικά από άποψη αξιοπιστίας και κόστους. Οι αλγόριθμοι λήψης αποφάσεων, που θα βοηθούν τα πλοία να αποφασίζουν τι ενέργεια θα κάνουν υπό το φως των πληροφοριών που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, τελειοποιούνται. Αυτό, φυσικά, απαιτεί μια ερμηνεία των κανονισμών και νόμων της θάλασσας, κάτι που οδηγεί τον προγραμματιστή σε προκλήσεις διερμηνείας. Η δημιουργία συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων πρόκειται για μια σταδιακή και επαναληπτική διαδικασία που υπόκειται σε εκτενείς δοκιμές και προσομοιώσεις (Jokioinen, et al., 2016).Τα τελευταία χρόνια, στα πλαίσια της έρευνας γύρω από την υλοποίηση των αυτόνομων πλοίων, εκπονήθηκαν διάφορα έργα από οργανισμούς ή εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον χώρο της εμπορικής ναυτιλίας, μερικά από τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- **MUNIN** (Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks)

Το έργο αυτό χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και διενεργήθηκε από το 2012 ως το 2015 με σκοπό να διερευνήσει αν πληρούνται τα τεχνικά, οικονομικά και νομικά ζητήματα που αφορούν τη δημιουργία μη επανδρωμένων και αυτόνομων εμπορικών πλοίων. Εκτός αυτού, είχε ως στόχο την ανάπτυξη των επιμέρους συστατικών του αυτόνομου πλοίου κατά τρόπο ώστε να τοποθετηθούν εκ νέου σε ήδη υπάρχοντα πλοία, βελτιώνοντας την τεχνική απόδοση και την απόδοση ναυσιπλοΐας. Ωστόσο, τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του MUNIN περιλαμβάνουν την ικανότητα του πλοίου να είναι υπό τη λειτουργία αυτόνομου ναυτιλιακού συστήματος επί του πλοίου, την ικανότητα ελαχιστοποίησης του κινδύνου σύγκρουσης και συμμόρφωσης με την Σύμβαση για τους Διεθνείς Κανόνες για την Αποφυγή Συγκρούσεων στη Θάλασσα (COLREG) και τέλος, το γεγονός ότι οι αισθητήρες ασφάλειας και λειτουργίας του πλοίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξερεύνηση αντικειμένων (MUNIN, 2016).

- **AAWA** (Advanced Autonomous Waterborne Applications)

Το AAWA (2015-2017) ξεκίνησε από την Rolls Royce ενώ για την υλοποίηση του συνεργάστηκαν πανεπιστήμια, σχεδιαστές πλοίων, κατασκευαστές εξοπλισμού και νηογνώμονες και στόχευε στην έρευνα των οικονομικών, κοινωνικών, νομικών, ρυθμιστικών και τεχνολογικών παραγόντων, οι οποίοι πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε τα αυτόνομα πλοία να γίνουν πραγματικότητα. Η πρώτη φάση του έργου εξέτασε την τρέχουσα κατάσταση της ναυτιλιακής βιομηχανίας και τι μπορεί να αξιοποιηθεί από άλλες βιομηχανίες – από αεροσκάφη και αυτοκίνητα χωρίς οδηγό μέχρι τα κινητά τηλέφωνα. Οι επόμενες φάσεις βασίστηκαν στα ευρήματα της πρώτης φάσης ώστε να αναπτυχθούν όλες οι τεχνικές, νομικές και οι σχετικές με την ασφάλεια προδιαγραφές του έργου. Στο πλαίσιο του AAWA, δημιουργήθηκε ένα σύστημα ένα σύστημα ελέγχου πλοίων, το οποίο ήταν ενσωματωμένο με ένα δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα ελέγχου αλλά και με χερσαία συστήματα ώστε να επιτρέπεται η βέλτιστη αξιοποίηση των υφιστάμενων τεχνολογιών επικοινωνίας για ένα αυτόνομο πλοίο. Η πρόβλεψη της Rolls Royce ήταν ότι μακροπρόθεσμα, ένα κέντρο ελέγχου με 7 ως 14 άτομα θα είναι σε θέση να ελέγχει και παρακολουθεί έναν ολόκληρο στόλο εμπορικών πλοίων σε ολόκληρο τον κόσμο (Jokioinen, et al., 2016).

- **ReVolt**

Πρόκειται για μια μελέτη πάνω στα μη επανδρωμένα αυτόνομα πλοία, την οποία οραματίστηκε ο νορβηγικός νηογνώμονας DNV GL το 2013. Η ιδέα γεννήθηκε στα πλαίσια του Νορβηγικού Σχεδίου Μεταφορών 2014-2023 (Norwegian Transport Plan) έπειτα από την αναδυόμενη ανάγκη για μεταφορά του χερσαίου όγκου φορτίων στη θάλασσα. Το έργο αυτό αφορά την κατασκευή ενός ομώνυμου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μήκους 60 μέτρων και χωρητικότητας 100 TEU, ενώ αντί για συμβατικά καύσιμα θα τροφοδοτείται αποκλειστικά από μπαταρίες 3000 KWh. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος του περιβάλλοντος του πλοίου επιτυγχάνεται από συνδυασμό παραδοσιακών μέσων όπως GPS, RADAR, AIS και ECDIS με τις προσθήκες καμερών και LIDAR. Προκειμένου να αναπτυχθούν και να ελεγχθούν κρίσιμα συστήματα επί του πλοίου για αυτόνομη πλοήγηση, κυρίως ο συνδυασμός των αισθητήριων δεδομένων (sensor fusion) και η αποφυγή συγκρούσεων, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο κλίμακας 1:20 σε συνεργασία με το Νορβηγικό Πανεπιστήμιο Επιστημών και Τεχνολογίας (AutonomousShipsHQ, 2017).

- **Yara Birkeland**

Το έργο Yara Birkeland πρόκειται για μια συνεργασία των εταιριών Yara και Kongsberg για την κατασκευή του πρώτου αυτόματου και με μηδενικές εκπομπές ρύπων πλοίου εμπορευματοκιβωτίων παγκοσμίως. Το φιλόδοξο αυτό project ξεκίνησε το 2017 και η λειτουργία του θα ακολουθήσει τρία στάδια: κατά την παράδοση από το ναυπηγείο θα είναι ένα επανδρωμένο πλοίο, στην συνέχεια θα ακολουθούσε η λειτουργία απομακρυσμένου ελέγχου και τέλος η πλήρως αυτόνομη λειτουργία. Το πλοίο θα είναι πλήρως ηλεκτρικό και θα αντί για τις κλασσικές δεξαμενές έρματος (ballast tanks) θα χρησιμοποιεί τις μπαταρίες ως μόνιμα ballast tanks, ενώ θα έχει σύστημα αυτόματης πρόσδεσης. Η παράδοση του πλοίου στη Yara έγινε τις αρχές του 2020, ωστόσο τα στάδια αυτοματοποίησης του καθυστέρησαν λόγω της πανδημίας. Έτσι, το Yara Birkeland θα ξεκινήσει τη λειτουργία του μέσα στο 2021 και θα λειτουργεί πλήρως αυτόνομα το 2022. Για την συλλογή δεδομένων και τον έλεγχο του περιβάλλοντος του πλοίου θα χρησιμοποιούνται RADAR, LIDAR, AIS,

κανονικές κάμερες και κάμερες υπερύθρων IR (KONGSBERG, Autonomous Ship Project, Key Facts About Yara Birkeland, 2017).

Εικόνα 4, Πηγή: Freight Waves

Εικόνα 5, Πηγή: Offshore Energy

- **AUTOSHIP**

Το AUTOSHIP είναι ένα έργο τετραετούς ορίζοντα του 2020 που ξεκίνησε από το νορβηγικό θαλάσσιο cluster, του οποίο είναι μέρος και η Kongsberg και χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Το project περιλαμβάνει την εγκατάσταση και τον έλεγχο αυτόνομης τεχνολογίας σε δύο πλοία σε διαφορετικά λειτουργικά περιβάλλοντα, το πρώτο στη νορβηγική ακτή και σε περιοχές φιόρδ μεταφέροντας τροφές σε ιχθυοτροφία και το δεύτερο σε ευρωπαϊκά κανάλια μεταφέροντας αγαθά από και προς λιμάνια εμπορευματοκιβωτίων. Ο στόχος του έργου αυτού είναι να δοκιμάσει και να αναπτύξει περαιτέρω τη βασική τεχνολογία που συνδέεται με τα πλήρως αυτόνομα συστήματα πλοήγησης, έξυπνα συστήματα μηχανημάτων, αυτοδιαγνωστικά, προγνωστικά και προγραμματισμό λειτουργίας, όπως επίσης και τεχνολογία επικοινωνίας που θα αποφέρει ένα διακεκριμένο επίπεδο ασφάλειας του κυβερνοχώρου (cyber security) και ενσωμάτωση των πλοίων σε μια εκσυγχρονισμένη ηλεκτρονική υποδομή (Chambers, 2020).

- **a-Nav**

Το a-Nav είναι ένα σύστημα τηλεχειρισμού και αυτόνομης πλοήγησης της εταιρίας JSC Kronshtadt Technologies, το οποίο έχει λάβει Έγκριση επί της Αρχής από τον ρωσικό νηογνώμονα. Το συγκεκριμένο σύστημα, είναι εγκατεστημένο σε τρία πλοία του ρωσικού νηογνώμονα, που μετέχουν σε θαλάσσιες δοκιμές αυτόνομων πλοίων που πραγματοποιούνται υπό την αιγίδα της ρωσικής σημαίας. Το a-Nav αποτελείται από ένα αυτόνομο σύστημα πλοήγησης, ένα σύστημα οπτικής παρακολούθησης και ανάλυσης δεδομένων και μια κεντρική μονάδα σταθερού ή κινητού τηλεχειρισμού. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να περιλαμβάνεται ένα σύστημα ελέγχου κίνησης και ελιγμών αλλά και σύστημα ελέγχου και επίβλεψης των βοηθητικών μηχανημάτων και του συστήματος πρόωσης (Isalos, 2021).

3.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΑ

Παρά το γεγονός ότι η έρευνα σχετικά με την αυτονομία στη ναυτιλία έχει κάνει σημαντικά βήματα προόδου τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη πλοίων που θα λειτουργούν πλήρως αυτόνομα είναι σε πρώιμα στάδια, το οποίο σημαίνει ότι η συνολική γνώση σχετικά με την αρχιτεκτονική των συστημάτων ενός τέτοιου πλοίου είναι αρκετά περιορισμένη. Ωστόσο,

εμφανείς ομοιότητες και κοινά σημεία υπάρχουν με υπάρχουσες τεχνολογικές λύσεις στην τεχνολογία αυτονομίας. Παρακάτω αναφέρονται τρία βασικά μέρη της αρχιτεκτονικής ενός αυτόνομου συστήματος του πλοίου: το αυτόνομο σύστημα πλοήγησης, το δυναμικό σύστημα εύρεσης θέσης και το σύστημα παρακολούθησης περιβάλλοντος (Νεοφύτου, 2020).

Το αυτόνομο σύστημα πλοήγησης αποτελείται από όλες εκείνες τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες για να επιτευχθεί η αυτονομία στη λειτουργία του πλοίου όπως μεταξύ άλλων ο σχεδιασμός της πορείας, η παρακολούθηση της κατάστασης του πλοίου, η αντίληψη των καταστάσεων και του περιβάλλοντος και η αποφυγή συγκρούσεων. Στόχος είναι το αυτόνομο σύστημα να μπορεί να επεξεργαστεί και χρησιμοποιήσει την κάθε πληροφορία που λαμβάνει από τα επιμέρους συστήματα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το σύστημα σχεδιασμού της πορείας είναι μια σημαντική λειτουργία για συστήματα σχεδιασμού ελέγχου το οποίο υλοποιείται σε πολύ αρχικά στάδια και χρησιμοποιεί δεδομένα καθοδήγησης από το σύστημα χαρτογράφησης και δεδομένα ταχύτητας. Παράλληλα, η λειτουργία αποφυγής συγκρούσεων αποσκοπεί στην αξιολόγηση κι αποφυγή έκτακτων και δυναμικών εμποδίων και περιλαμβάνει δύο βασικές λειτουργίες: αξιολόγηση του κινδύνου πιθανής σύγκρουσης και καθοδήγηση του πλοίου με ασφάλεια σε κάποιο λιμάνι ή σημείο της θάλασσας (Νεοφύτου, 2020).

Το δυναμικό σύστημα εύρεσης θέσης παρέχει τη δυνατότητα στο πλοίο να διατηρεί τη θέση και την κατεύθυνσή του, προσαρμόζοντάς τες όποτε αυτό καθίσταται αναγκαίο, με χρήση μονάδων προώθησης. Κύριες αιτίες που μπορεί να προκαλέσουν τέτοια ενέργεια είναι μεταξύ άλλων ο άνεμος, τα θαλάσσια ρεύματα και η κίνηση κυμάτων. Το συγκεκριμένο σύστημα διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση ασφαλών και αποτελεσματικών λειτουργιών στη ναυτιλία, στον περιορισμό του κόστους αλλά και των ρύπων και συμβάλλει στη βέλτιστη λειτουργία ενέργειας και προώθησης. Μέσω του δυναμικού συστήματος εύρεσης θέσης επιτυγχάνονται αυτόνομα επιμέρους λειτουργίες του πλοίου όπως η αυτόματη πρόσδεση σε λιμάνι ή εξέδρα, η οποία απαιτεί υψηλή ακρίβεια ελιγμών. Το σύστημα, τέλος, χρησιμοποιεί δεδομένα από τοπικά ή παγκόσμια ναυτικά και δορυφορικά συστήματα γεωγραφικής θέσης, αισθητήρες αλλά επίσης και το δικό του σύστημα μέτρησης αδράνειας του πλοίου (Νεοφύτου, 2020).

Το σύστημα παρακολούθησης του περιβάλλοντος παίζει με την σειρά του σημαντικό ρόλο στην ομαλή αυτόνομη λειτουργία ενός πλοίου και έχει ως σκοπό την αντίληψη και παρακολούθηση αντικειμένων από το περιβάλλον περί του πλοίου και παράλληλα αξιολογεί την επικινδυνότητά τους συνεισφέροντας έτσι στην ασφάλεια του πλοίου και των λειτουργιών του. Το σύστημα αποτελείται από 3 βασικά τμήματα: την αντίληψη των στοιχείων του περιβάλλοντος, την κατανόηση της υπάρχουσας κατάστασης και την πρόβλεψη της μελλοντικής πορείας του πλοίου. Γενικά, η αντίληψη της κατάστασης του περιβάλλοντος κρίνεται απαραίτητη για όλα τα οχήματα που λειτουργούν υπό απομακρυσμένο έλεγχο και επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας αισθητήρων. Τα δύο κυριότερα συστήματα αισθητήρων είναι οι οπτικές κάμερες και τα ραντάρ. Οι κάμερες αποτελούν ένα θεμελιώδες σύστημα παρακολούθησης του περιβάλλοντος του πλοίου παρέχοντας σχετικές πληροφορίες σε μορφή εικόνων με καλή ανάλυση. Τα ραντάρ είναι ένας άλλος παραδοσιακός τρόπος εντοπισμού της θέσης αντικειμένων και εμποδίων γύρω από το πλοίο με χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, αν και η ικανότητα αυτή είναι

περιορισμένη. Παρόμοιοι με τα radar, με τη διαφορά όμως της χρήσης μιας δέσμης laser αντί για Η/Μ κύματα, είναι οι αισθητήρες LIDAR, οι οποίοι εντοπίζουν φωτεινές πηγές και υπολογίζουν της απόστασή τους. Έχει διαπιστωθεί πως λόγω του ότι ένας αισθητήρας σχεδιάζεται για συγκεκριμένο σκοπό με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τους υπόλοιπους, η χρήση ενός συνδυασμού αισθητήρων (sensor fusion) σε ένα αυτόνομο πλοίο θα μπορούσε να προσφέρει ένα καλό επίπεδο αντίληψης του περιβάλλοντος, κάτι το οποίο έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στα αυτοκίνητα (Νεοφύτου, 2020).

3.2. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ-ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Τα αυτόνομα ή έξυπνα ή μη επανδρωμένα πλοία όπως αποκαλούνται αναμένεται να είναι πιο ασφαλή, πιο αποδοτικά και πιο οικονομικά ως προς τη λειτουργία τους. Σύμφωνα με μια έρευνα της γερμανικής ασφαλιστικής εταιρίας Allianz το 2012, τα ατυχήματα στη θάλασσα προέρχονται από ανθρώπινο λάθος σε ποσοστά που κυμαίνονται από 75% ως 96%, εξαιτίας κυρίως της εργασιακής κούρασης των πληρωμάτων. Συνεπώς η χρήση μη επανδρωμένων πλοίων θα ελαττώσει τον κίνδυνο τέτοιων λαθών που θέτουν σε κίνδυνο τόσο τους ναυτικούς (τραυματισμοί, θάνατος) αλλά και το ίδιο το πλοίο. Επίσης, ένα αυτόνομο πλοίο λόγω της απουσίας των χώρων διαμονής του πληρώματος θα είναι πιο «ελαφρύ», θα έχει μειωμένη κατανάλωση καυσίμων, μειωμένα κατασκευαστικά και λειτουργικά έξοδα αλλά και μεγαλύτερη χωρητικότητα μεταφοράς φορτίου. Άλλο ένα θετικό είναι ότι η δημιουργία έξυπνων πλοίων, σύμφωνα με τους προγραμματιστές τους, θα βοηθήσει τους πλοιοκτήτες να ανταποκριθούν στην υποφαινόμενη και συνεχώς αυξανόμενη έλλειψη ναυτικών (TheNavalArch, 2019).

Ωστόσο, τη δεδομένη στιγμή σύμφωνα με την οπτική βετεράνων ναυτικών αναφορικά με τις μεταβολές που επιφέρει η αυτονομία των πλοίων συνολικά, τα αρνητικά υπερτερούν σε σχέση με τα θετικά. Μια σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζει η ναυτιλιακή βιομηχανία αναφορικά με τα αυτόνομα πλοία είναι οι απαιτούμενες ρυθμιστικές και νομοθετικές αλλαγές ώστε αυτά τα πλοία να λειτουργούν με ασφάλεια. Οι διεθνείς ναυτιλιακοί κανονισμοί είναι ασαφείς σχετικά με το που θα επιτρέπεται να λειτουργούν αυτά τα πλοία, πως θα ασφαλίζονται και ποιοι θα είναι νομικά υπεύθυνοι σε περίπτωση ενός ατυχήματος. Οι μεγαλύτεροι κίνδυνοι όμως είναι οι επιθέσεις στον κυβερνοχώρο (cyber attacks) και η πειρατεία. Όλα τα μηχανογραφημένα και δικτυακά συστήματα είναι πιθανοί στόχοι μιας «ηλεκτρονικής» επίθεσης. Παρότι βασικός στόχος των πειρατών κυρίως είναι το πλήρωμα ενός πλοίου, πλέον είναι σε θέση να επινοήσουν τις δικές τους μεθόδους ώστε να χτυπήσουν τα συστήματα. Οι συνέπειες μιας τέτοιας επίθεσης μπορεί να είναι καταστροφικές: από απόκλιση της πορείας του πλοίου από την προγραμματισμένη μέχρι σύγκρουση του πλοίου με άλλα πλοία, υπεράκτιες εξέδρες πετρελαίου/φυσικού αερίου ή με υπεράκτια αιολικά πάρκα. Τέλος, ένα άλλο στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο χρόνος απόκρισης σε καταστάσεις όπως πχ φωτιά στο πλοίο και περιβαλλοντικά θέματα εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν θα υπάρχει η δυνατότητα ανθρώπινης παρέμβασης (TheNavalArch, 2019).

3.3. ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΑ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι εξαιτίας των πιο προκαθορισμένων διαδρομών που εκτελούν τα υπεράκτια πλοία εξυπηρέτησης σε σχέση με κάποιο εμπορικό πλοίο, η αυτονομία, μερική ή πλήρης, στα πλοία αυτά θα ήταν πιο εύκολα εφαρμόσιμη και αρκετά ωφέλιμη. Τα οφέλη από τη χρησιμοποίηση μη επανδρωμένων υπεράκτιων πλοίων εξυπηρέτησης είναι μεταξύ άλλων η μείωση κινδύνων προς τους εργαζόμενους στα υπεράκτια πεδία, η εξάλειψη των ανθρώπινων λαθών και η ελαχιστοποίηση των λειτουργικών εξόδων.

Στο πλαίσιο αυτό, το 2016, η νορβηγική Kongsberg Maritime σύναψε μνημόνιο συνεργασίας (Memorandum of Understanding – MoU) με την αγγλική εταιρία Automated Ships Ltd. για την κατασκευή του πρώτου πλήρως αυτόνομου πλοίου για υπεράκτιες λειτουργίες. Το πλοίο αυτό ονομάστηκε «Hrönn» και η κατασκευή του ξεκίνησε το 2017 με σκοπό να τεθεί σε λειτουργία το 2018. Ο νηογνώμονας DNV GL συνεργάστηκε με την Kongsberg στο έργο ώστε να ξεπεραστούν τα όποια θεσμικά εμπόδια υπήρχαν (KONGSBERG, 2016). Στο συγκεκριμένο project, συμμετείχε επίσης η Bourbon, κορυφαία εταιρία στην παροχή υπεράκτιων υπηρεσιών με στόχο την αξιοποίηση της εμπειρίας στην κατασκευή και λειτουργία ενός τυποποιημένου στόλου ώστε να παρέχει λεπτομερή δεδομένα στην ανάπτυξη του Hrönn και στην εξασφάλιση ευελιξίας, αξιοπιστίας και αποδοτικότητας κόστους για ασφαλή και αποτελεσματική λειτουργία στο απαιτητικό υπεράκτιο περιβάλλον (MarineInsight, 2017).

Το Hrönn είναι αυτόνομο υπεράκτιο πλοίο εξυπηρέτησης ελαφρού τύπου το οποίο παρέχει υποστήριξη στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου/φυσικού αερίου, στην επιστημονική/υδρογραφική βιομηχανία και στις υπεράκτιες ιχθυοκαλλιέργειες. Οι προοριζόμενες χρήσεις του, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνουν: πλοίο έρευνας (research vessel), πλοίο απομακρυσμένης λειτουργίας (remotely operated vehicle – ROV) και αυτόνομο υποβρύχιο πλοίο (autonomous underwater vehicle – AUV) ενώ θα μπορούσε να συμβάλλει στη διατροπική παράδοση ελαφρών φορτίων, στην παράδοση προμηθειών στις υπεράκτιες εγκαταστάσεις και στην υποστήριξη ιχθυοτροφείων. Παράλληλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εφεδρικό πλοίο, ικανό να παρέχει πυροσβεστική υποστήριξη σε μια υπεράκτια εξέδρα σε συνεργασία με επανδρωμένα πλοία (KONGSBERG, 2016).

Αναφορικά με τα συστήματα που θα χρησιμοποιηθούν στο αυτόνομο OSV, ο project manager της Kongsberg, Peter Due, είχε δηλώσει στο ηλεκτρονικό περιοδικό NauticExpo το 2017: «Η αρμοδιότητα της Kongsberg περιλαμβάνει όλα τα συστήματα για τη δυναμική τοποθέτηση και πλοήγηση, τη δορυφορική αναφορά και αναφορά θέσης, τη θαλάσσια αυτοματοποίηση και επικοινωνία. Τα συστήματα μας για τον έλεγχο πλοίου, όπως K-Pos dynamic positioning, K-Chief automation και K-Bridge ECDIS & radar, θα υπάρχουν ως ακριβή αντίγραφα και στο κέντρο ελέγχου στην ξηρά. Σε πρώτη φάση το OSV θα είναι υπό απομακρυσμένη λειτουργία από το κέντρο αυτό, έπειτα θα ακολουθήσει η πλήρως αυτοματοποιημένη φάση και τελικά μόλις αναπτυχθούν οι αλγόριθμοι ελέγχου θα λειτουργεί αυτόνομα» (Slinn, 2017).

Πιο πρόσφατα, η γαλλική εταιρία ενέργειας Seaowl εξέφρασε το όραμά της για την εφαρμογή της αυτόνομης ναυτιλίας στον τομέα των υπεράκτιων υπηρεσιών. Υποστηριζόμενη από το γαλλική Γραμματεία Περιβαλλοντικής και Ενεργειακής Διαχείρισης,

η Seaowl αποσκοπεί στη δημιουργία ενός πρωτοτύπου πλοίου απομακρυσμένου ελέγχου που θα τροφοδοτείται αποκλειστικά από μπαταρία. Ο διευθύνων σύμβουλος της εταιρίας, Vincent Boutteau, ανέφερε ότι «τα βασικά πλεονεκτήματα είναι η μείωση της έκθεσης σε κίνδυνο για το πλήρωμα και των εκπομπών ρύπων, η αύξηση της ευελιξίας των υπηρεσιών και η ελάττωση κόστους». Συμπλήρωσε ότι «εξαιτίας του συστήματος τροφοδοσίας του, το πλοίο θα λειτουργεί κοντά σε πλωτές ενεργειακές εγκαταστάσεις, όπως μια πλωτή μονάδα LNG ή μια μονάδα FPSO». Επίσης για την εξάλειψη της πιθανότητας απώλειας της σύνδεσης πλοίου – κέντρου ελέγχου, κάτι που θα έθετε αυτόματα το πλοίο εκτός ελέγχου, η Seaowl συνεργάστηκε με την Marlink για την παροχή συστήματος σύνδεσης VSAT υψηλής ταχύτητας στο έργο. Σημαντικές προσπάθειες όμως αφιερώθηκαν και στη δημιουργία ισχυρής αρχιτεκτονικής ασφαλείας στον κυβερνοχώρο. Σύμφωνα με τον Boutteau, στόχος είναι το πλοίο να είναι έτοιμο το 2022 και εφόσον κριθεί εμπορικά και τεχνικά βιώσιμο, η Seaowl σκοπεύει να κατασκευάσει ακόμη 20 τέτοια πλοία μεταξύ 2023 και 2028 (Lin, 2020).

3.4. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΓΙΑ OSVs

Τον Μάρτιο του 2021, δύο εταιρίες με έδρα το Ηνωμένο Βασίλειο, η Hydrosurv και η ORE Catapult, ανακοίνωσαν την ανάπτυξη δύο αυτόνομων ερευνητικών πλοίων, των “REAV-16” και “REAV-40”, στα πλαίσια του χρηματοδοτούμενου από το Ηνωμένο Βασίλειο προγράμματος για MASS χωρίς πλήρωμα. Τα πλοία αυτά θα χρησιμοποιούν ένα εύρος αισθητήρων και ωφέλιμων φορτίων με στόχο διένεργεια επαρκούς έρευνας και ελέγχου σε υπεράκτια αιολικά πάρκα. Η Νορβηγική Kongsberg Maritime συμφώνησε στην παράδοση τεσσάρων MASS στο Ινστιτούτο Θαλάσσιας Έρευνας της Νορβηγίας και πιο συγκεκριμένα, δύο USV με ηχοβολιστές και δύο AUV για περιβαλλοντικό έλεγχο και χαρτογράφηση του βυθού. Και τα τέσσερα αυτά πλοία θα ελέγχονται με μία μοναδική διεπαφή (interface) με στόχο τη διευκόλυνση της απομακρυσμένης λειτουργίας των οργάνων, την απεικόνιση των πληροφοριών και την έξυπνη διαχείριση των ωκεανογραφικών και μετεωρολογικών πληροφοριών. Τέλος, το Πανεπιστήμιο του Κιέλου έλαβε αρκετά εκατομμύρια ευρώ από το γερμανικό Υπουργείο Μεταφορών ως χρηματοδότηση για την ανάπτυξη του «Καθαρού Αυτόνομου Δικτύου Δημοσίων Μεταφορών (Clean Autonomous Public Transport Network – CAPTN)». Η πρωτοβουλία αυτή σε πρώτη φάση περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός αυτόνομου ηλεκτρικού ferry ονόματι “VAIRO”. Παρά το ότι οι τεχνικές λεπτομέρειες του έργου είναι περιορισμένες, γίνεται κατανοητό ότι το ferry θα είναι αυτο-πιλοτούμενο και θα χρησιμοποιεί ένα σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης για ένα ταξίδι απελευθερωμένο από θορύβους και περιβαλλοντικούς ρύπους (HFW, 2021).

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, γενικά τα αυτόνομα πλοία παρουσιάζουν μια σημαντική ευκαιρία ώστε να μειωθούν τα διάφορα ατυχήματα στη θάλασσα. Χαρακτηριστικά είναι τα στοιχεία που παρουσίασε το Ευρωπαϊκό Πρακτορείο Θαλάσσιας Ασφάλειας που αφορούν την περίοδο 2011 ως 2016 και στα οποία αναδεικνύεται ο ανθρώπινος παράγοντας ως η αιτία που προκαλεί το 62 τοις εκατό των συμβάντων με πλοία που φέρουν σημαία κράτους της ΕΕ στο διάστημα αυτό. Για παράδειγμα, οι εργασίες πρόσδεσης έχουν 5 με 16 φορές μεγαλύτερη επικινδυνότητα συγκριτικά με τις εργασίες που διενεργούνται στην στεριά (Horne, 2021).

Τα διάφορα επίπεδα αυτονομίας ενός πλοίου επομένως, συντελούν δραστικά στη μείωση θαλάσσιων ατυχημάτων όπως είναι οι συγκρούσεις μεταξύ πλοίων ή πλοίου με υπεράκτιες εξέδρες. Στα ατυχήματα αυτά σε ένα επανδρωμένο πλοίο, ο άνθρωπος παίζει σημαντικό ρόλο καθώς είναι αυτός που είναι υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων. Επίσης, τέτοια ατυχήματα συμβαίνουν και λόγω της έλλειψης προσοχής ή αμέλειας του πληρώματος. Φυσικά, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που συντελούν σε ένα τέτοιο ατύχημα. Όλα αυτά αναλύονται στην επόμενη παράγραφο, όπου εξετάζεται η περίπτωση σύγκρουσης ενός πλοίου OSV με μια υπεράκτια πλατφόρμα.

4. ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ – ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ ΕΞΕΔΡΑΣ

Τον Ιούλιο του 2005, ένα πλοίο εξυπηρέτησης πολλαπλών χρήσεων έχασε τον έλεγχο και προσέκρουσε στην πλατφόρμα Mumbai High North (MHN) στο υπεράκτιο πεδίο στη δυτική ακτή της Ινδίας. Η σύγκρουση αυτή προκάλεσε σοβαρή φωτιά και δύο ώρες αργότερα όλη η κατασκευή κατέρρευσε με αποτέλεσμα μόνο το μεταλλικό δικτύωμα (jacket) να παραμείνει πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το πλοίο επίσης έπιασε φωτιά και τέσσερις μέρες αργότερα βυθίστηκε. Στο συμβάν αυτό, 362 άτομα διασώθηκαν, ωστόσο 22 έχασαν τη ζωή τους. Το ατύχημα MHN υποδεικνύει την καταστροφική δυναμική μιας πιθανής σύγκρουσης μεταξύ υπεράκτιων εγκαταστάσεων και προσερχόμενων σε αυτές πλοίων (Oltedal, 2012). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) φαίνονται κάποια σημαντικά ατυχήματα που προκλήθηκαν από σύγκρουση πλοίου με υπεράκτια εξέδρα.

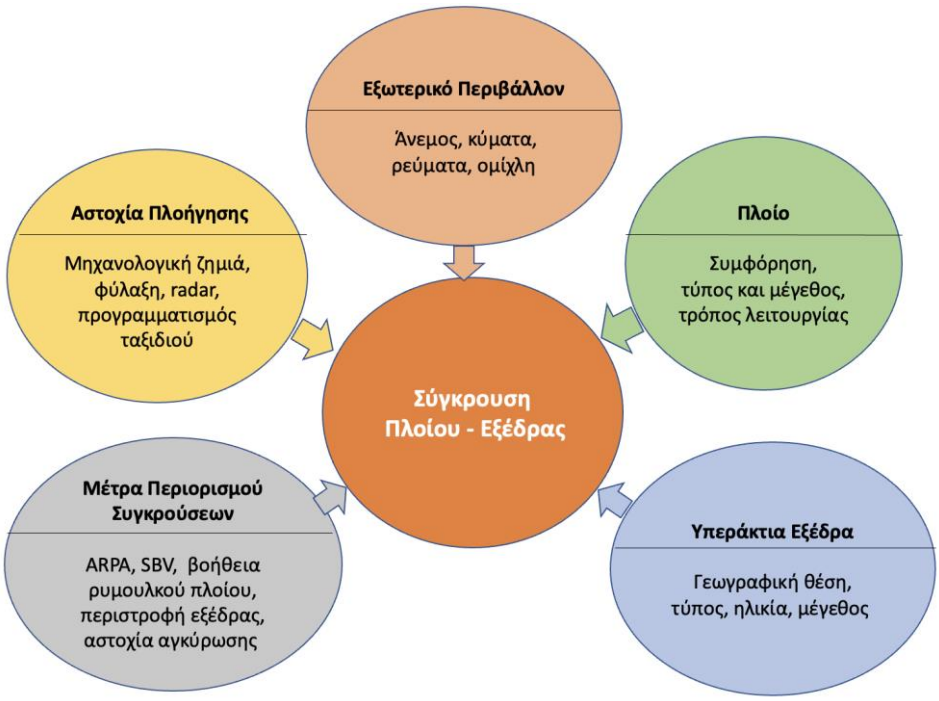
Πίνακας 2: *Διακεκριμένα ατυχήματα υπεράκτιων εξεδρών εξαιτίας συγκρούσεων*
(Pengfei, Minghua, Rajagopal, & Retouniotis, 2016)

Όνομα	Έτος	Τοποθεσία	Ζημιά - Συνέπειες
Ατύχημα Mumbai High north – σύγκρουση με το πλοίο εξυπηρέτησης MV Samudra Suraksha	2005	Αραβική θάλασσα (ανοικτά της Ινδικής ακτής)	Πολλαπλές φωτιές και εκρήξεις, 22 θάνατοι, η εξέδρα MHN και ένα ελικόπτερο καταστράφηκαν εντελώς, το πλοίο βυθίστηκε
Καταστροφή της εξέδρας jack up Usumacinta	2007	Κόλπος του Μεξικό	Φωτιές στην εξέδρα, 22 θάνατοι
Σύγκρουση με το πλοίο εξυπηρέτησης MV Celeste Ann	2013	Κόλπος του Μεξικό	Βύθιση του πλοίου
Σύγκρουση στην πλατφόρμα Forties Echo	2015	Βόρεια θάλασσα	Παύση στην παραγωγή, 15 άτομα προσωπικού εγκατέλειψαν την πλατφόρμα

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, οι υπεράκτιες εξέδρες βασίζονται στα υπεράκτια πλοία εξυπηρέτησης για διάφορες προμήθειες όπως φαγητό, χημικές ουσίες και εξοπλισμό αλλά και για τη μεταφορά του προσωπικού από και προς την εξέδρα. Συνεπώς, είναι αρκετά επιρρεπείς σε ατυχήματα συγκρούσεων κατά την προσέγγιση του πλοίου, τις εργασίες μεταφοράς ή κατά την αναχώρηση του πλοίου. Ο κίνδυνος που διατρέχει μια εξέδρα αναφορικά με πιθανά ατυχήματα ορίζεται ως το γινόμενο της πιθανότητας εμφάνισης του κινδύνου αυτού και των σχετιζόμενων με αυτόν συνέπειες. Κρίνοντας το είδος των συνεπειών, τρία είδη κινδύνου υπάρχουν: κίνδυνος περιουσιακού στοιχείου (εξέδρα, πλοίο), κίνδυνος ανθρώπινης ζωής και περιβαλλοντικός κίνδυνος. Σε γενικές γραμμές, η σύγκρουση ενός πλοίου εξυπηρέτησης με μια σταθερή υπεράκτια πλατφόρμα έχει μικρές συνέπειες, όπως σημαντική ζημιά στην υποδομή της πλατφόρμας (π.χ. ράγισμα ενός ποδιού ή μιας στήριξης), όμως το οικονομικό κόστος επισκευής των τμημάτων που έχουν υποστεί ζημιά διέπει τις συνέπειες αυτές (Mujeeb-Ahmed & Paik, Quantitative collision risk assessment of a fixed-type offshore platform with an offshore supply vessel, 2020).

Με βάση τώρα το μέγεθος της ζημιάς που προκαλείται στις κατασκευές γενικότερα, ένα συμβάν σύγκρουσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως μείζων ή ελάσσων. Μια ελάσσων σύγκρουση χαρακτηρίζεται από επιδιορθώσιμες ζημιές στην κατασκευή και πιθανόν δεν θα προκαλέσει παύση της λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, μια μείζων σύγκρουση θα προκαλέσει καθολική ζημιά στην εξέδρα και με μεγάλη πιθανότητα θα υπάρξει παύση της λειτουργίας της (Mujeeb-Ahmed, Seo, & Paik, 2018).

Ο σχεδιασμός μιας εξέδρας με στόχο την αντοχή σε μείζονες συγκρούσεις έτσι ώστε αυτή να παραμένει σε λειτουργία φαντάζει οικονομικά ασύμφορος. Επομένως, για την επίλυση προβλημάτων υπεράκτιων συγκρούσεων τόσο πρακτικά όσο και οικονομικά, η πιθανότητα μιας μείζονος σύγκρουσης θα πρέπει να διατηρείται σε χαμηλό επίπεδο με τον καθορισμό κατάλληλων προληπτικών μέτρων, ενώ οι ελάσσονες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο στάδιο σχεδιασμού της εξέδρας. Αυτή είναι η σχεδιαστική ιδέα των υπεράκτιων κατασκευών κατά των συγκρούσεων που έχει υιοθετηθεί από πολλούς νηογνώμονες (Mujeeb-Ahmed, Seo, & Paik, 2018).



Εικόνα 6: *Βασικά στοιχεία σε μια σύγκρουση πλοίου-εξέδρας (Πηγή: Ocean Engineering, Ιδία επεξεργασία)*

Η παραπάνω εικόνα αποτυπώνει τα κύρια στοιχεία που εμπλέκονται σε μια σύγκρουση πλοίου – εξέδρας. Μεταξύ άλλων αυτά είναι η γεωγραφική θέση, η ηλικία και ο τύπος της εξέδρας, η πυκνότητα και τρόπος λειτουργίας του συγκρουόμενου πλοίου, τα μέτρα αποφυγής συγκρούσεων όπως τα ραντάρ ARPA και RACON (RAdar beaCON), ο έλεγχος κυκλοφορίας πλοίων (vessel traffic service – VTS) και τα πλοία SBV, οι εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως ο άνεμος, τα κύματα και η ορατότητα και τέλος, οι αστοχίες στην πλοήγηση όπως ένα ανθρώπινο λάθος ή κάποια μηχανολογική αστοχία. Αυτές οι παράμετροι δεν είναι πάντα ανεξάρτητες. Για παράδειγμα, μια σύγκρουση μπορεί να προκύψει από κάποιο σφάλμα στην επικοινωνία μεταξύ της εξέδρας και του πληρώματος του πλοίου αλλά και εξαιτίας κακής ορατότητας, η οποία οδηγεί σε αποτυχία φύλαξης (watchkeeping failure). Η πιθανότητα σύγκρουσης που προέρχεται από αστοχία στις λειτουργίες ανάκτησης πλοίου είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την αντίστοιχη των λειτουργιών ανάκτησης εξέδρας, καθώς τα πλοία είναι σε δυναμική κίνηση, ενώ οι εξέδρες είναι είτε αγκυρωμένες είτε σταθερές σε ένα μέρος (Mujeeb-Ahmed, Seo, & Paik, 2018). Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα πλοία εξυπηρέτησης προσεγγίζουν την εξέδρα ώστε να ολοκληρώσουν τις λειτουργίες τους, ως κύρια αίτια σύγκρουσης θεωρούνται μεταξύ άλλων μια μηχανολογική αστοχία, αστοχία κατά τη διαδικασία πρόσδεσης του πλοίου, οι καιρικές

και περιβαλλοντικές συνθήκες (πχ. άνεμος, κύματα, ρεύματα) και εν γένει το ανθρώπινο λάθος.

Παράλληλα, η πιο συχνή μορφή σύγκρουσης μεταξύ ενός OSV και μιας υπεράκτιας εγκατάστασης είναι αυτή που συμβαίνει κατά τις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης κατά μήκος της πλευράς του πλοίου. Σύμφωνα με μια παλαιότερη αξιολόγηση του Underwater Engineering Group (UEG) προέκυψαν δύο σημαντικά στοιχεία. Πρώτον, οι γερανοί (cranes) με μικρότερη έκταση δεν επιτρέπουν στα πλοία εξυπηρέτησης να λειτουργούν επαρκώς μακριά από την εξέδρα κατά την εκφόρτωση και μαζί με την κούραση του πληρώματος του πλοίου μπορούν να αποτελέσουν, ξεχωριστά, συντελεστικούς παράγοντες σε κάποια ατυχήματα. Όσο μεγαλύτερη είναι μάλιστα η απόσταση της υπεράκτιας κατασκευής από την ξηρά, τόσο μεγαλύτερη ενδέχεται να είναι η κούραση αυτή. Υπογραμμίζεται επίσης ότι αρκετές συγκρούσεις αφορούν κινητές εγκαταστάσεις, μιας και λάθη σε κρίση και αποφάσεις από το πλήρωμα είναι πιο πιθανόν να συμβούν όταν η πλατφόρμα κινείται και αυτή (Kenny, 1988).

Οι μέθοδοι τοποθέτησης ενός πλοίου εξυπηρέτησης ως προς την εξέδρα συνοψίζονται ως εξής (Kenny, 1988):

- Πρόσδεση
- Χειροκίνητη οδήγηση, δηλαδή τοποθέτηση του πλοίου με συστήματα ατομικής πρόωσης και πηδαλίων
- Δυναμική τοποθέτηση, δηλαδή ελέγχου με joystick ολόκληρου του συστήματος τοποθέτησης
- Αυτόματη δυναμική τοποθέτηση, δηλαδή ενεργοποίηση του συστήματος μέσω αισθητήρων.

Το πλοίο εξυπηρέτησης θα προσεγγίσει την εξέδρα σε πολύ κοντινή απόσταση, θα λάβει ένα ή δύο σχοινιά στο κατάστρωμα, θα τα προσδέσει και θα τα σφίξει με τη βοήθεια της κύριας μηχανής ή των προωθητών. Με βάση τη διεύθυνση του καιρού και τον επιθυμητό προσανατολισμό του πλοίου ως προς την εξέδρα, το OSV μπορεί εναλλακτικά να τοποθετηθεί παράλληλα ή υπό κάποια γωνία ως προς την πλευρά της εξέδρας. Επίσης, ορισμένες κατασκευές παρέχουν μια μόνιμη σημαδούρα αγκύρωσης (Kenny, 1988).

Αρκετές φορές, δεν χρησιμοποιούνται καθόλου αγκυρώσεις ενώ η θέση διατηρείται από συνεχείς ελιγμούς. Το πλοίο μανουβράρεται από τον καπετάνιο με τη βοήθεια των πηδαλίων και προωθητών ώστε να επιτύχει και να διατηρήσει μια θέση που θεωρεί κατάλληλη για την εκάστοτε λειτουργία. Το έργο αυτό απαιτεί συνεχή συγκέντρωση και συχνές προσαρμογές στους ελέγχους ενώ υπάρχουν μερικές υπεράκτιες κατασκευές που παρέχουν σχέδια και ειδικό πεδίο, κατεύθυνση και σημεία αναφοράς διέλευσης ώστε να βοηθήσουν τον καπετάνιο του πλοίου να διατηρήσει την καλύτερη θέση με ελάχιστη πίεση (Kenny, 1988).

Μία εναλλακτική επίσης στο χειροκίνητο μανουβράρισμα είναι η δυναμική τοποθέτηση. Το πρώτα βήμα της εγκατάστασης των συστημάτων δυναμικής τοποθέτησης είναι η σύζευξη των συστημάτων ελιγμών του πλοίου με ένα μονό joystick, έτσι ώστε ο καπετάνιος να μην είναι απαραίτητο να ελέγχει το βήμα της έλικας, τα πηδάλια και τους προωθητές

ανεξάρτητα. Ένα δεύτερο στάδιο, που δεν είναι διαθέσιμο σε όλα τα πλοία, είναι το πλήρως αυτόνομο σύστημα δυναμικής τοποθέτησης που διατηρεί το πλοίο σε θέση, η οποία ορίζεται από επιλεγμένους αισθητήρες. Πιθανές αστοχίες στο σύστημα δυναμικής τοποθέτησης και στις γραμμές αγκύρωσης φέρουν την ευθύνη για ένα σημαντικό αριθμό ατυχημάτων σύγκρουσης στα οποία εμπλέκονται πλοία εξυπηρέτησης (Kenny, 1988).

Οι Διεθνείς Κανόνες για Αποφυγή Συγκρούσεων στη Θάλασσα (1972) (International Regulations for Preventing Collisions at Sea – COLREGs) έχουν διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της ασφάλειας της πλοήγησης και λειτουργίας των πλοίων. Ωστόσο, οι υπεράκτιες εξέδρες εξόρυξης εξαιρούνται από το σύστημα. Με τον αριθμό των υπεράκτιων κατασκευών αυτών να αυξάνεται, είναι δεδομένο ότι πρέπει να εξεταστεί σοβαρά πώς θα αποφεύγονται οι συγκρούσεις μεταξύ υπεράκτιων εξεδρών και πλοίων (Pengfei, Minghua, Rajagopal, & Retouniotis, 2016). Ορισμένοι κώδικες και κανονισμοί που παρέχουν περιεκτική καθοδήγηση ως προς την εξάλειψη των κινδύνων που αντιμετωπίζονται κατά την διάρκεια εργασιών μεταξύ εξέδρας-πλοίου εξυπηρέτησης, κυρίως των πλοίων διάσωσης (emergency response & rescue vessel – ERRV) είναι (Oil&GasUK, Emergency Response & Rescue Vessel Management Guidelines, 2018):

1. Οδηγίες για τη Διαχείριση των Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης – Oil & Gas UK
2. Οδηγίες Έρευνας για Πλοία Έκτακτης Ανάγκης και Διάσωσης (ERRV) – Oil & Gas UK, IADC, EERVA, BROA
3. Πρότυπα Έκτακτης Ανάγκης εγκεκριμένα από την OPITO (Offshore Petroleum Industry Training Organization) για το πλήρωμα ενός ERRV
4. Κανονισμός No. 853 της 16^{ης} Οκτωβρίου 1991 του NMD (Norwegian Maritime Directorate) που αφορούν Πλοία Αναμονής και τον εξοπλισμό και οδηγίες επάνδρωσης των ERRV
5. Νορβηγικό Πρότυπο για Λειτουργίες των ERRV (OLF 016 – Rev 1 – 01 December 2005)
6. Οδηγία No. 6 της NOGEPA (Netherlands Oil & Gas Exploration and Production Association) – Κώδικας Ασφάλειας για Πλοία Αναμονής

Οι ζημιές που προκαλούνται εξαιτίας ενός μόνο συμβάντος σύγκρουσης που εμπλέκεται μια εξέδρα άντλησης πετρελαίου μπορεί να είναι οδυνηρές. Αυτό οφείλεται πρώτον, στον αυξημένο κίνδυνο για τις ανθρώπινες ζωές που υπάρχουν τόσο στην εξέδρα όσο και στα πλοία εξυπηρέτησης και δεύτερον, στον επιπρόσθετο κίνδυνο έκρηξης εξαιτίας των αρκετά εύφλεκτων αερίων στην κατασκευή και στις επακόλουθες απώλειες λόγω της απώλειας παραγωγής (Pengfei, Minghua, Rajagopal, & Retouniotis, 2016).

Η ακριβής μοντελοποίηση του κινδύνου των συγκρούσεων πλοίου-εξέδρας αποτελεί μια πρόκληση για τη βιομηχανία πετρελαίου για πάνω από 20 χρόνια. Ορισμένοι οργανισμοί στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ξεκίνησαν μια προσπάθεια να ποσοτικοποιήσουν τους κινδύνους ατυχημάτων μεταξύ πλοίων-εξεδρών. Κυρίως, οι έρευνες που διενεργήθηκαν αφορούσαν αξιολόγηση κινδύνου συγκρούσεων διερχόμενων πλοίων και υπεράκτιων κατασκευών, όπως αυτή που ανατέθηκε στην εταιρία Technica από το Υπουργείο Ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου στην αγγλική υφαλοκρηπίδα το 1981. Ωστόσο, το θεωρητικό μοντέλο που δημιουργήθηκε με το όνομα CRASH, δεν επέφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα ως προς τον περιορισμό των ατυχημάτων. Οι υπάρχοντες κανόνες και κανονισμοί σχετικά με την αποφυγή συγκρούσεων και τα αποτελέσματα τους θα χρησιμοποιηθούν από τους σχετικούς

με το ζήτημα οργανισμούς που ασχολούνται με την ανάλυση ρίσκου παρέχοντας οδηγίες για την ασφαλή πλοήγηση (Pengfei, Minghua, Rajagopal, & Retouniotis, 2016).

Ένας ανώτερος διαχειριστής πλοίου εξήγησε σε μια συνέντευξη: «Η διαχείριση κινδύνου είναι κάτι που οι ναυτικοί πάντα έκαναν. Οι ναυτικοί είναι πολύ συγκεντρωμένοι αλλά οι ναυτικοί μπορεί να είναι απρόσεκτοι, κουρασμένοι και άπειροι». Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πλειοψηφία των ατυχημάτων στη θάλασσα οφείλεται στο ανθρώπινο λάθος σε ποσοστά 75-96%. Ένα ανθρώπινο λάθος περιγράφεται μια λανθασμένη απόφαση, μια ακατάλληλα εκτελεσμένη πράξη ή κάποιο είδος απραξίας. Επομένως, η μη επίγνωση της θέσης της εξέδρας ή κάποιο λάθος στον χειρισμό του Συστήματος Πληροφοριών Θαλάσσιας Κυκλοφορίας (VTIS) αποτελούν ανθρώπινα λάθη (Pengfei, Minghua, Rajagopal, & Retouniotis, 2016). Παρόλο που το ανθρώπινο λάθος αφορά κυρίως την αλληλεπίδραση επανδρωμένων πλοίων και υπεράκτιων εξεδρών, τα μερικώς ή πλήρως μη επανδρωμένα πλοία δεν εξαιρούνται καθώς λάθη και αστοχίες μπορούν να συμβούν και από τα κέντρα ελέγχου στην ξηρά, όπως κάποιο λάθος στη λήψη αποφάσεων ή προβλήματα στο σύστημα επικοινωνίας πλοίου-κέντρου. Αστοχίες μπορεί επίσης να συμβούν και στα Συστήματα Ανίχνευσης και στους αισθητήρες, κάτι που στην περίπτωση των αυτόματων/αυτόνομων πλοίων αποκτά μεγαλύτερη αξία λόγω της μη ύπαρξης πληρώματος επί του πλοίου. Ορισμένα τέτοια συστήματα που χρησιμοποιούνται στην αποφυγή συστημάτων συγκρούσεων είναι (Oil&GasUK, 2010):

- Civil Marine Radar – Vessel Radar (CMR)
- Hybrid Radar Systems
- Radar Early Warning Systems (REWS)
- ECDIS και πιο ειδικά το AIS

Το CMR έχει περιορισμένο εύρος εξαιτίας του ύψους του σαρωτή και της κίνησης του πλοίου και επίσης μπορεί το σήμα του να αποσπάται από εργασίες φορτοεκφόρτωσης ή άλλες εργασίες. Τα Συστήματα Υβριδικών Ραντάρ χρησιμοποιούν σαρωτές επί της εξέδρας και έχουν πιο αποτελεσματικό εύρος, όμως από τα μειονεκτήματά τους είναι η ανάγκη για υψηλή αξιοπιστία του συστήματος και για εκπαίδευση στην παρακολούθηση των εισερχόμενων δεδομένων χωρίς παρενόχληση από άλλα καθήκοντα. Εξειδικευμένα συστήματα όπως τα REWS πολύ υψηλά πρότυπα εξοπλισμού και συντήρησης. Το AIS παρέχει αναλυτικές πληροφορίες για τα πλοία που προσεγγίζουν την εξέδρα, αν και ο παρατηρητής δεν έχει έλεγχο ως προς την ποιότητα ή τη μη ύπαρξη δεδομένων. Η πιο σωστή αξιοποίηση του AIS γίνεται μέσω του συστήματος ECDIS (Oil&GasUK, 2010).

Βασικό στοιχείο της μελέτης αποφυγής συγκρούσεων στη θάλασσα είναι ανάλυση ρίσκου ενός τέτοιου ατυχήματος. Μεγάλος αριθμός μελετών χρησιμοποιεί πιθανοτική προσέγγιση για την πρόβλεψη ατυχημάτων που εμπεριέχουν πλοία και υπεράκτιες κατανομές. Η πιθανοτική μέθοδος κατασκευάζει ένα λογικό σενάριο σύγκρουσης μέσω της εφαρμογής μιας πιθανοτικής μεθόδου σε κάθε μία μεταβλητή όλων των πιθανών σεναρίων του συμβάντος. Βασισμένη στην κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για κατάλληλο εύρος και μεταβλητότητα, η διαδικασία επιλογής ενός αξιόπιστου σεναρίου για το σύστημα εξέδρα – πλοίο εξυπηρέτησης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (βλ. Εικόνα 7) (Oil&GasUK, 2010):

Εικόνα 7: *Διαδικασία για υπολογισμό κινδύνου σύγκρουσης πλοίου – υπεράκτιας κατασκευής (Πηγή: Oil & Gas UK, Ιδία επεξεργασία)*

Το πιο πρόσφατο περιστατικό σύγκρουσης υπεράκτιου πλοίου εξυπηρέτησης με υπεράκτια εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου συνέβη στη Μαλαισία τον Οκτώβριο του 2020. Συγκεκριμένα, το πλοίο εξυπηρέτησης πολλαπλών χρήσεων Dayang Topaz βυθίστηκε έπειτα από σύγκρουση με την εγκατάσταση της Μαλαισιανής πετρελαϊκής εταιρίας Petronas υπό άσχημες καιρικές συνθήκες, 14 χιλιόμετρα από την ακτή, μια σύγκρουση που είχε τον τραγικό απολογισμό των θανάτων δύο εργαζομένων. Το περιστατικό αυτό επισημαίνει τα ζητήματα ασφαλείας σχετικά με την πρόσδεση και τα σχοινιά αγκύρωσης, καθώς η άγκυρα του Dayang Topaz έσπασε εξαιτίας των ισχυρών ρευμάτων σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Σύμφωνα με την επίσημη ανακοίνωση της Petronas, 187 άτομα υπήρχαν πάνω στο πλοίο την ώρα του ατυχήματος, από τα οποία τα 125 πήδηξαν στη θάλασσα και τελικά διασώθηκαν από ανταποκριτές εκτάκτου ανάγκης. Προκλήθηκαν επίσης ζημιές σε υπεράκτιο γερανό και διάφορα άλλα σχετικά αντικείμενα και τελικά το πλοίο βυθίστηκε (Wingrove, 2020).

Αδιαμφισβήτητα, η υπεράκτια βιομηχανία πετρελαίου και αερίου απαιτεί για την εύρυθμη λειτουργία της θαλάσσια υποστήριξη και επομένως είναι απαραίτητο για τα πλοία εξυπηρέτησης (OSVs) να προσεγγίζουν και να εκτελούν εργασίες σε αρκετά κοντινή απόσταση από τις πλωτές εξέδρες. Το μέγεθος, η δύναμη και το εκτόπισμα των πλοίων εξυπηρέτησης συνεχώς αυξάνονται και επίσης είναι φανερή πλέον η τάση για αυτονομία αρκετών λειτουργιών των πλοίων αυτών (ημι-αυτονομία ή πλήρης αυτονομία). Γίνεται σαφές επομένως ότι βασικό ρόλο στο να συμβεί κάποιο ατύχημα κατά την προσέγγιση ενός τέτοιου πλοίου προς μια πλωτή εξέδρα παίζουν ο τρόπος που πραγματοποιείται η προσέγγιση και υπό ποιες συνθήκες πραγματοποιείται (Oil&GasUK, 2010).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η τοποθέτηση ενός πλοίου σε σχέση με μια εξέδρα γίνεται με διάφορους τρόπους όπως πρόσδεση, έλεγχο με joystick (δυναμική τοποθέτηση), με σύστημα αισθητήρων (αυτόματη δυναμική τοποθέτηση) και μέσω συστημάτων πηδαλίων (χειροκίνητη οδήγηση). Όσον αφορά, τώρα, τα συστήματα πηδαλιούχησης, υπάρχει η πεποίθηση ότι δεν παρουσιάζουν κάποια βασική πολυπλοκότητα και δεν αστοχούν εύκολα, οπότε δεν συντηρούνται καταλλήλως. Στην περίπτωση αστοχίας του πηδαλίου για παράδειγμα εξαιτίας ανεπαρκούς συντήρησης, μπορούν να προκληθούν σοβαρά προβλήματα, καθώς αυτό συνεπάγεται ολική απώλεια ελέγχου του πλοίου. Η αστοχία του συστήματος πηδαλιούχησης συνεπώς θα πρέπει να θεωρείται ως μια κατάσταση εκτάκτου ανάγκης και θα πρέπει να ακολουθούνται άμεσες ενέργειες ώστε να αποφευχθούν ανθρώπινες ή περιουσιακές απώλειες (Safety4Sea, 2018). Στην επόμενη ενότητα γίνεται μια παρουσίαση του πηδαλίου και γενικότερα των διαφόρων συστημάτων πηδαλίων, αναφέρονται πιθανές αιτίες αστοχίας αυτών και ορισμένα μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος αυτού.

5. ΤΟ ΠΗΔΑΛΙΟ

Η αλλαγή της πορείας των πλοίων επιτυγχάνεται μέσω του μηχανισμού πηδαλίου (steering gear), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την περιστροφή του πηδαλίου. Οι εντολές αλλαγής της πορείας δίνονται από την γέφυρα (bridge) και εκτελούνται από τον θάλαμο μηχανισμού πηδαλίου (steering gear room) που βρίσκεται στον χώρο πίσω από το μηχανοστάσιο του πλοίου. Εξωτερικά της γάστρας του πλοίου και κάτω από τον μηχανισμό του πηδαλίου υπάρχει το πτερύγιο πηδαλίου (rudder). Θεωρητικά, το σύστημα πηδαλιούχησης αποτελείται από τρία υποσυστήματα: το σύστημα ελέγχου (control equipment), το σύστημα παραγωγής ισχύος (power unit) και το σύστημα μεταφοράς της απαιτούμενης ροπής στον άξονα του πηδαλίου (transmission to the rudder stock). Το σήμα για την περιστροφή του πηδαλίου παράγεται από το σύστημα ελέγχου στη γέφυρα του πλοίου ενεργοποιώντας στην συνέχεια το σύστημα παραγωγής ισχύος και τελικά δημιουργείται η απαιτούμενη ροπή από το σύστημα μεταδόσεως έτσι ώστε να στραφεί το πηδάλιο κατά την επιθυμητή γωνία (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017).

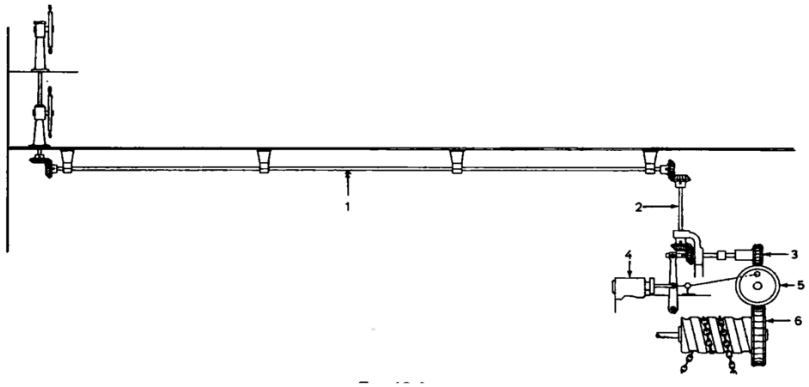
Διακρίνουμε τρεις τύπους εγκατεστημένων μηχανισμών πηδαλίου σε πλοία:

A. Το μηχανικό πηδάλιο (mechanical rudder)
B. Το ηλεκτρικό πηδάλιο (electric rudder)
C. Το ηλεκτροϋδραυλικό πηδάλιο (electro-hydraulic system-telemotor)

Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει το οιακοστρόφιο ή τιμόνι (rudder wheel) που όπως αναφέραμε βρίσκεται στη γέφυρα και ανάλογα με τον τύπο του συστήματος πηδαλίου διακρίνεται και αυτό με την σειρά του σε μηχανικό και ηλεκτρικό ή ηλεκτροϋδραυλικό. Στα περισσότερα πλοία σήμερα, ανεξαρτήτως του μεγέθους τους, είναι αρκετά διαδεδομένη η εφαρμογή του ηλεκτροϋδραυλικού συστήματος κινήσεως του πηδαλίου (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017). Συνεπώς, στην συνέχεια θα γίνει μια πιο λεπτομερής αναφορά του συστήματος αυτού παρουσιάζοντας τα υποσυστήματά του και μια πιο σύντομη περιγραφή των άλλων δύο συστημάτων, κυρίως για βιβλιογραφικούς λόγους.

5.1. Μηχανικό Πηδάλιο

Η χρήση του σε μεγάλα πλοία ήταν αρκετά διαδεδομένη πριν την ανάπτυξη του ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου. Το σήμα κίνησης του τιμονιού μεταβιβάζεται μέσω συστήματος γραναζιών στον τυμπανοφόρο άξονα και μέσω αυτού με τη βοήθεια αλυσίδας επιτυγχάνεται η μεταφορά της δυνάμεως στρέψεως από το τιμόνι στον οίακα, που βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον άξονα του πηδαλίου στο διαμέρισμα πηδαλίου. Σε πολλές περιπτώσεις, όπου η απόσταση από τη γέφυρα μέχρι το διαμέρισμα του πηδαλίου είναι μεγάλη, η μηχανική μετάδοση όπως αναφέρθηκε νωρίτερα δυσχεραίνεται και έτσι έχει αντικατασταθεί από την τηλεκίνηση με υδραυλικό σύστημα. Η ροπή στρέψεως του πηδαλίου μεταφέρεται στον άξονα του πηδαλίου μέσω παλινδρομικού ή περιστροφικού συστήματος (ram type / rotary vane). Η μεταφορά της υδραυλικής πίεσης από το τιμόνι της γέφυρας στο σύστημα στρέψης του πηδαλίου γίνεται μέσω υδραυλικού δικτύου λαδιού. Το πιο διαδεδομένο υδραυλικό σύστημα είναι η πατέντα της εταιρείας Brown Bros Co. του 1919 (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017).



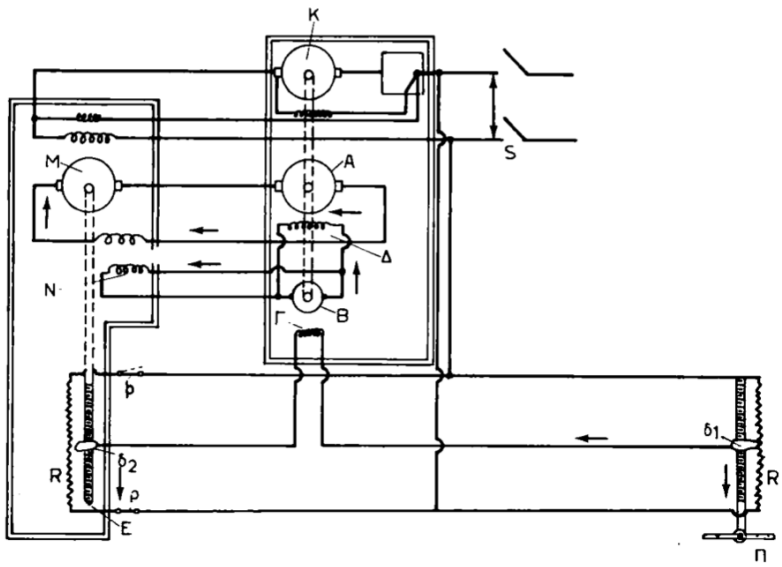
1) Οριζόντια ράβδος κινήσεως. 2) Κατακόρυφη ράβδος κινήσεως. 3) Ατέρμονας τροχός επαναφοράς στη μέση θέση του διαφορικού σύρτη. 4) Διαφορικός σύρτης οριζόντιου μηχανήματος. 5) Ατέρμονας στροφαλοφόρου άξονα του μηχανήματος. 6) Ατέρμονας τροχός του τυμπάνου του αλυσέλικτρου κινήσεως του άξονα του πηδαλίου.

Εικόνα 8: *Σύστημα μηχανικής μετάδοσης ατμοκίνητου πηδαλίου*
(Πηγή: Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, Ίδρυμα Ευγενίδου)

5.2. Ηλεκτρικό Πηδάλιο

Τα ηλεκτρικά πηδάλια χρησιμοποιούνται σε συστήματα πηδαλιούχησης που περιλαμβάνουν ηλεκτρική διάταξη στο σύστημα ελέγχου του πηδαλίου στη γέφυρα, ηλεκτρική μετάδοση από τις θέσεις πηδαλιουχίας προς τον μηχανισμό πηδαλίου και τέλος ηλεκτρικές μονάδες ισχύος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την περιστροφή του πηδαλίου. Οι δύο κύριοι εκπρόσωποι των συστημάτων ηλεκτρικής πηδαλιούχησης είναι το σύστημα Ward-Leonard και το σύστημα άμεσου μονού κινητήρα (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017).

Το σύστημα Ward-Leonard δύσκολα συναντάται πλέον σε σύγχρονα πλοία. Αποτελείται από το οιακοστρόφιο, δύο ροοστάτες, τη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τον κινητήρα της, τη διεγέρτρια γεννήτρια και τον κινητήρα του πηδαλίου με το σύστημα γραναζιών για τη μετάδοση της κινήσεως στο πηδάλιο. Από την άλλη πλευρά, σε ένα σύστημα άμεσου μονού κινητήρα , η παροχή ρεύματος για να κινηθεί το πηδάλιο είναι απόρροια του κύριου κυκλώματος τροφοδοσίας ρεύματος του πλοίου μέσω διακόπτη εκκινήσεως. Ο κινητήρας λειτουργεί στη μέγιστη ταχύτητα μέχρι να σταματήσει η λειτουργία του από το σύστημα ελέγχου ύστερα από τη διακοπή του ρεύματος. Το πηδάλιο παραμένει ακίνητο μέσω ενός συστήματος φρένου (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017).



Εικόνα 9: *Ηλεκτρικό πηδάλιο Donkin-Scott κατά Ward-Leonard*
(Πηγή: Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, Ίδρυμα Ευγενίδου)

5.3. Ηλεκτροϋδραυλικό Πηδάλιο

Σήμερα, στα περισσότερα πλοία εφαρμόζεται το ηλεκτροϋδραυλικό σύστημα κινήσεως πηδαλίου. Βασικοί λόγοι για την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων σε πλοία είναι η αξιοπιστία τους, η γρήγορη ανταπόκριση των επιθυμητών κινήσεων και η ανθεκτική κατασκευή τους. Η εγκατάσταση ενός συστήματος ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου αποτελείται από τρία μέρη (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006):

1. Το *σύστημα τηλεκινήσεως (remote control)*, όπου με τη βοήθεια αυτού επιτυγχάνεται από τη γέφυρα η μετάδοση των κινήσεων του πηδαλίου, με άλλα λόγια ο έλεγχος του μηχανήματος από τον πηδαλιούχο.
2. Το *μηχάνημα κινήσεως του πηδαλίου*, το οποίο στρέφει τον άξονα του πηδαλίου λαμβάνοντας τις αντίστοιχες κινήσεις του οιακοστροφίου.
3. Το *μηχανισμό στροφής του πηδαλίου*, ο οποίος με τη βοήθεια κατάλληλης διάταξης μεταφέρει τη ροπή στρέψης στο πτερύγιο του πηδαλίου.

5.3.1. Σύστημα τηλεκινήσεως

Το σύστημα τηλεκινήσεως μπορεί να είναι (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006):

- Μηχανικό, με σύστημα ράβδων και κωνικών τροχών.
- Υδραυλικό, όπως τα συστήματα τηλεκινητήρων μεταδότη-δέκτη τύπου Brown.
- Ηλεκτρικό, το οποίο διακρίνεται σε δύο τύπους: με οδηγό κινητήρα συνεχούς ρεύματος και με σύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

5.3.2. Μηχάνημα κινήσεως του πηδαλίου

Το βασικό στοιχείο του μηχανήματος του ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου είναι η χρήση μία ή κατά κανόνα δύο αντλιών που μπορούν να εργάζονται χωριστά ή και ταυτόχρονα εν παραλλήλω. Οι αντλίες αυτές είναι τύπου με περιστρεφόμενο σώμα κυλίνδρων και εμβόλων, τα οποία έμβολα αυτά κινούνται είτε αξονικά (axial piston pumps) τύπου Waterburry είτε ακτινικά (radial piston pumps) τύπου Hele-Shaw. Η αντλία του μηχανήματος συνδέεται με το μηχανισμό στρέψεως του πηδαλίου με 2 σωλήνες, οι οποίοι λειτουργούν άλλοτε ως αναρροφητικοί και άλλοτε ως καταθλιπτικοί του λαδιού. Η αντλία στρέφεται συνεχώς από κατάλληλο ηλεκτροκινητήρα (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006).

Αν η λεκάνη της αντλίας Waterburry στραφεί υπό γωνία ή η στεφάνη της αντλίας Hele-Shaw μετατεθεί σε εκκεντρική θέση, τότε η αντλία αναρροφά λάδι από τη μία σωλήνωση και καταθλίβει προς την άλλη. Αν η λεκάνη στραφεί κατ΄ αντίθετη γωνία ή η στεφάνη μετατεθεί σε αντίθετη εκκεντρική θέση τότε η λειτουργία των σωληνώσεων θα είναι αντίστοιχα αντίθετη. Έτσι ο μηχανισμός στροφής του πηδαλίου θα στρέφεται άλλοτε προς τη μια φορά και άλλοτε προς την αντίστροφη. Το πηδάλιο παραμένει ακίνητο όταν δεν συμβαίνει ούτε αναρρόφηση ούτε κατάθλιψη λαδιού, δηλαδή αν η λεκάνη ή η στεφάνη της αντλίας μετατεθεί στη μέση θέση. Η αλλαγή θέσης της λεκάνης ή της στεφάνης καθορίζεται από τον πηδαλιούχο μέσω του συστήματος τηλεκινήσεως στρέφοντας το οιακοστρόφιο το οποίο επενεργεί στο μοχλό ελέγχου της θέσης της λεκάνης ή της στεφάνης (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006).

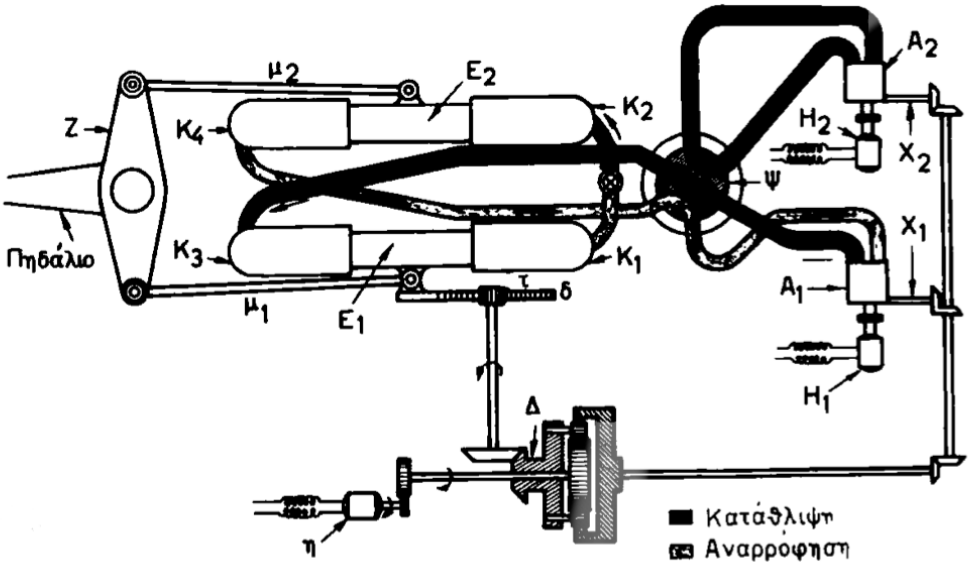
Το πηδάλιο θα κινηθεί όταν ο μοχλός ενεργήσει έτσι, ώστε να καταθλίψει η αντλία και αντίστοιχα η κίνηση του πηδαλίου με σύστημα διαφορικό ή σύστημα μοχλοβραχιόνων επαναφοράς προκαλεί ισόποση ανάστροφη κίνηση του μοχλού. Όταν ο πηδαλιούχος σταματά την κίνηση του τιμονιού, η ενέργεια της αντλίας σταματά και το πηδάλιο παραμένει υπό γωνία όπως είχε καθοριστεί από τον πηδαλιούχο και αντίστοιχα αν το οιακοστρόφιο στραφεί εκ νέου τότε θα λειτουργήσουν πάλι οι αντλίες και το πηδάλιο στα στραφεί σε νέα μεγαλύτερη ή μικρότερη γωνία και θα σταματήσει με τον ίδιο με πριν τρόπο (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006).

5.3.3. Μηχανισμός στροφής του πηδαλίου

Διακρίνεται σε υδραυλικής ενέργειας *παλινδρομικός εμβολοφόρος και περιστροφικός*: ο παλινδρομικός εμβολοφόρος αποτελείται από δύο κυλίνδρους με ένα ή δύο έμβολα βυθίσεως (single or double ram hydraulic gear), όπου μέσα σε αυτά επενεργεί η αναρρόφηση και κατάθλιψη της αντλίας του μηχανήματος πηδαλίου με αποτέλεσμα τη μετακίνηση των εμβόλων. Η μετακίνηση αυτή των εμβόλων μεταδίδεται μέσω βραχιόνων ή ζυγώματος στον κορμό του πηδαλίου και το στρέφει. Αντίστοιχα, ο περιστροφικός μηχανισμός αποτελείται από κυλινδρικούς δακτυλιοειδείς τομείς, στους οποίους βρίσκονται πτερύγια που απέχουν θέση εμβόλων. Τα πτερύγια αυτά μετακινούνται γωνιακά ή περιστρέφονται εξαιτίας της ενέργειας αναρρόφησης και κατάθλιψης από την αντλία του μηχανήματος πηδαλίου και έτσι ο μηχανισμός αυτός καλείται και με περιστροφικά πτερύγια (rotary vane hydraulic gear) (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006).

Ακολουθούν οι περιγραφές των εγκαταστάσεων των δύο παραπάνω συστημάτων μηχανισμού στροφής που χρησιμοποιούνται συνήθως.

5.3.3.1. Παλινδρομικό ηλεκτροϋδραυλικό πηδάλιο με έμβολα βυθίσεως



Εικόνα 10: *Διάταξη παλινδρομικού ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου με δύο έμβολα βυθίσεως (Πηγή: Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, Ίδρυμα Ευγενίδου)*

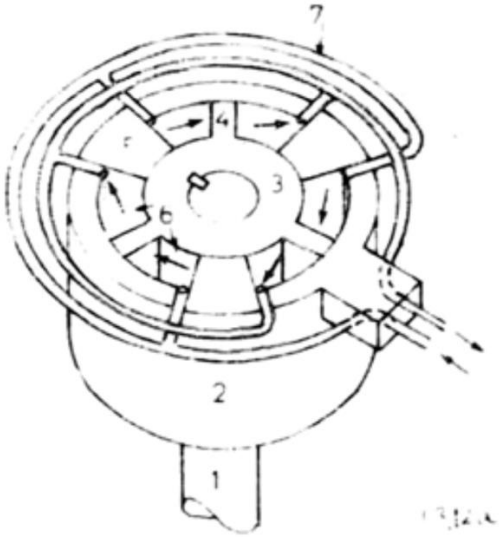
Στην Εικόνα 10 παρατίθεται η διάταξη του πηδαλίου με δύο κυλίνδρους, δύο έμβολα βυθίσεως (double ram) και ηλεκτρική τηλεκίνηση. Ο ηλεκτροκινητήρας η δέχεται με ηλεκτρικούς αγωγούς την κίνηση που εκτελεί ο πηδαλιούχος στη γέφυρα και με τη βοήθεια οδοντωτών τροχών και ράβδων περιστρέφει σε ορισμένη θέση τους άξονες X_1 και X_2 των αντλιών λαδιού. Οι αντλίες λαδιού A_1 , A_2 με περιστρεφόμενους κυλίνδρους στρέφονται συνεχώς από τους ηλεκτροκινητήρες H_1 και H_2. Σε λειτουργία είναι μόνο η μία αντλία, ενώ η άλλη είναι έτοιμη για λειτουργία σε περίπτωση που συμβεί κάποια αστοχία στην πρώτη. Και οι δύο αντλίες λειτουργούν ταυτόχρονα για χειρισμούς σε λιμάνια ή για διέλευση σε δύσκολες περιοχές. Στην παραπάνω εικόνα, η A_1 είναι σε λειτουργία, ενώ η A_2 αργεί (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006).

Η αντλία A_1 στρέφεται με σταθερή ταχύτητα και όσο το οιακοστρόφιο παραμένει ακίνητο δεν αναρροφά ούτε καταθλίβει λάδι, ενώ όταν το οιακοστρόφιο αρχίσει να στρέφει τον άξονα X_1, τότε μεταβάλλεται η θέση της λεκάνης των διωστήρων των εμβόλων και έτσι ξεκινά η αναρρόφηση ή η κατάθλιψη. Στην Εικόνα 10, η αντλία A_1 αναρροφά λάδι από τους κυλίνδρους K_1, K_4 και καταθλίβει στους κυλίνδρους K_2, K_3. Έτσι πραγματοποιείται η κίνηση του εμβόλου E_1 προς τα δεξιά και του E_2 προς τα αριστερά και με τη βοήθεια των μοχλοβραχιόνων μ_1, μ_2 θα στραφεί ο ζυγός Z του άξονα του πηδαλίου και το πηδάλιο προς τα δεξιά. Η κίνηση του πηδαλίου με τη βοήθεια του οδοντωτού κανόνα δ, του τροχού τ και του διαφορικού Δ προκαλεί αντίστροφη περιστροφή του άξονα X_1, που ελέγχει τη θέση της λεκάνης των διωστήρων με αποτέλεσμα η λεκάνη να έρχεται στη μέση της θέση και το

πηδάλιο σταματά στη θέση που όρισε ο πηδαλιούχος. Η εναλλαγή μεταξύ των αντλιών A_1 και A_2 γίνεται μέσω του διανομέα ψ (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006).

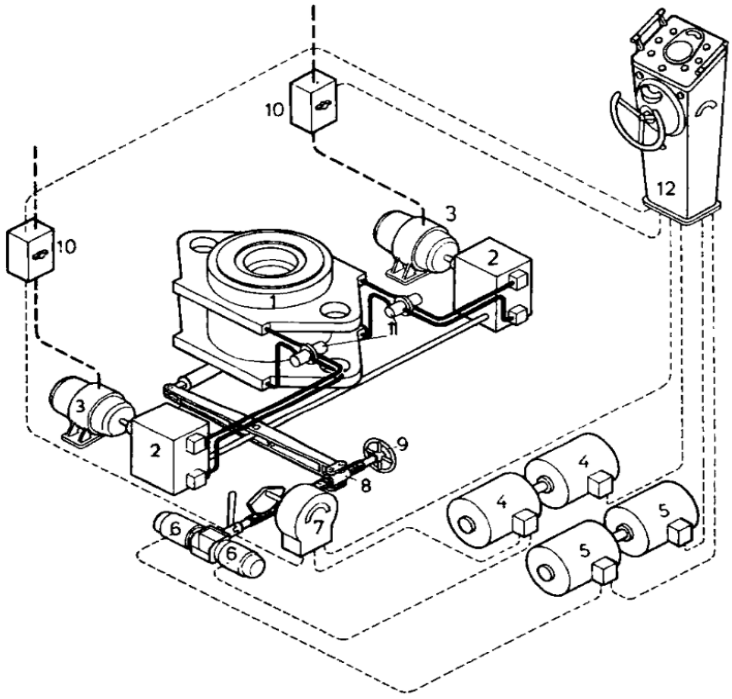
5.3.3.2. Περιστροφικό πτερυγιοφόρο ηλεκτροϋδραυλικό πηδάλιο

Αποτελεί την τελειότερη μορφή ηλεκτροϋδραυλικών πηδαλίων με ευρύτατη εφαρμογή στις σύγχρονες κατασκευές. Ένα τέτοιο είδος πηδαλίου είναι το περιστροφικό πτερυγιοφόρο πηδάλιο A.E.G. του ομώνυμου γερμανικού οίκου.



Εικόνα 11: *Πτερυγιοφόρο συγκρότημα πηδαλίου τύπου A.E.G.*
(Πηγή: Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, Ίδρυμα Ευγενίδου)

Στην Εικόνα 11, διακρίνεται ο κορμός 1 του άξονα του πηδαλίου και σταθερά με αυτό συνδεδεμένο το κιβώτιο 2 του υδραυλικού μηχανισμού, μέσα στο οποίο υπάρχει η πλήμνη 3 των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Τα περιστρεφόμενα πτερύγια 4 με τους διαχωριστικούς τομείς 5 του κελύφους σχηματίζουν τους θαλάμους πιέσεως 6 του υγρού σε μορφή δακτυλιοειδών κυλίνδρων σε τμήματα τόξου της όλης περιφέρειας. Οι θάλαμοι αυτοί συνδέονται με δύο περιφερειακούς αγωγούς ή συλλέκτες 7 του λαδιού. Οι θάλαμοι συνδέονται με τους συλλέκτες 7 προς τα 2 άκρα της αντλίας τύπου Waterburry ή Hele-Shaw για την στροφή προς τα αριστερά ή δεξιά. Όταν από την αντλία καταθλίβεται λάδι στον ένα από τους 2 συλλέκτες, τα πτερύγια ενεργούν ως έμβολα και μετακινούνται γωνιακά υπό την πίεση του λαδιού, περιστρέφοντας έτσι τον άξονα του πηδαλίου. Η ίδια ποσότητα λαδιού εξάγεται από τον αντίθετο ημιθάλαμο και αναρροφάται από την αντλία (Δανιήλ & Μιμηκόπουλος, 2006). Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται διαγραμματικά ολόκληρη η εγκατάσταση A.E.G. με ηλεκτρική τηλεκίνηση από τη γέφυρα.



1) Πτερυγιοφόρο συγκρότημα. 2) ΑΡ και ΔΕ αντλία λαδιού. 3) ΑΡ και ΔΕ ηλεκτροκινητήρες αντλιών λαδιού. 4) Μετατροπέας Ι ελέγχου συστήματος παρακολουθήσεως. 5) Μετατροπέας ΙΙ ελέγχου συστήματος πηδαλίου (σύστημα παρακολουθήσεως εκτός). 6) Κινητήρες παρακολουθήσεως Ι και ΙΙ. 7) Ενδείκτης στροφής πηδαλίου. 8) Ρυθμιστικός μοχλός. 9) Σφόνδυλος επιτόπιου χειροκίνητου χειρισμού. 10) Εκκινητές κινητήρων. 11) Βαλβίδες. 12) Κολόνα οιακοστροφίου.

Εικόνα 12: *Εγκατάσταση τύπου A.E.G. με ηλεκτρική τηλεκίνηση*
(Πηγή: Βιβλιοθήκη του Ναυτικού, Ίδρυμα Ευγενίδου)

Ανεξάρτητα από τον τύπο του μηχανισμού πηδαλίου που επιλέγεται να εγκατασταθεί σε ένα πλοίο, ο ΙΜΟ μέσω της Διεθνούς Συνθήκης για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα (Safety Of Life At Sea – SOLAS) ορίζει τις ελάχιστες απαραίτητες προϋποθέσεις και τους κανονισμούς που πρέπει να διέπουν τη λειτουργία του μηχανισμού αυτού των πλοίων. Οι βασικοί κανόνες της SOLAS είναι (Δαγκίνης & Γλύκας, 2017):

α) Ύπαρξη ενός πλήρους βοηθητικού μηχανισμού πηδαλίου αντίστοιχης ιπποδύναμης με τον κύριο μηχανισμό, το οποίο θα μπορεί να τεθεί σε λειτουργία σε περίπτωση βλάβης του κύριου συστήματος.
β) Η σχεδίαση του πηδαλίου και του συστήματος μηχανισμού πηδαλίου πρέπει να είναι τέτοια ώστε αυτά να αντέχουν υδραυλικές πιέσεις και δυνάμεις στο 125% των συνθηκών σχεδίασης.
γ) Η γωνία στροφής του πηδαλίου πρέπει να είναι μεταξύ -35° και +35° (σύνολο 70°) και στο βύθισμα σχεδιάσεως του πλοίου ο χρόνος στροφής δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 28 δευτερόλεπτα.
δ) Ο άξονας του πηδαλίου πρέπει να έχει ελάχιστη διάμετρο 120 mm, εκτός εάν το πλοίο εκτελεί διαδρομές σε θάλασσα με πάγους, που τότε πρέπει να είναι μεγαλύτερη.

ε) Τα δεξαμενόπλοια (Δ/Ξ) άνω των 10.000 κόρων ολικής χωρητικότητας (κοχ) πρέπει να έχουν δύο ανεξάρτητα συστήματα ελέγχου στη γέφυρα.
στ) Αντίστοιχα, σε όλους τύπους πλοίων άνω των 70.000 κοχ και ειδικά σε Δ/Ξ άνω των 70.000 κοχ πρέπει να υπάρχουν δύο όμοια κύρια συστήματα παραγωγής ισχύος.
ζ) Σε ενδεχόμενη αστοχία του κύριου συστήματος μηχανισμού πηδαλίου, πρέπει να υπάρχει οπτική και ηχητική ειδοποίηση στη γέφυρα και εντός 45 δευτερολέπτων πρέπει να τίθεται σε λειτουργία το βοηθητικό σύστημα.
η) Ύπαρξη συστήματος επικοινωνίας μεταξύ γέφυρας και θαλάμου συστήματος πηδαλιούχησης.

Γενικά, υπάρχει η πεποίθηση ότι τα συστήματα πηδαλίων δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και δεν αστοχούν αρκετά εύκολα και συνεπώς δεν συντηρούνται όπως θα έπρεπε. Στην περίπτωση όμως μιας αστοχίας του μηχανισμού του πηδαλίου, η οποία μπορεί να προκληθεί για παράδειγμα από ανεπαρκή συντήρηση ή κάποιο προηγούμενο ατύχημα, αρκετά σοβαρά προβλήματα μπορεί να προκύψουν, καθώς αυτό συνεπάγεται ολική απώλεια του ελέγχου του πλοίου. Από αυτή την σκοπιά, οι αστοχίες στο σύστημα του πηδαλίου θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως κατάσταση έκτακτης ανάγκης και θα πρέπει να λαμβάνονται ενέργειες άμεσα ώστε να αποτραπούν ανθρώπινες ή περιουσιακές απώλειες (SAFETY4SEA, 2018).

Η περιοδική συντήρηση και οι έλεγχοι είναι επομένως εξαιρετικά σημαντικοί για την ομαλή λειτουργία του συστήματος πηδαλιούχησης. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ορισμένα θέματα που μπορεί να προκύψουν ακόμα και όταν έχουν ληφθεί οι κατάλληλες προφυλάξεις. Κάποια από αυτά τα θέματα ακολουθούν παρακάτω (Wankhede, 2021):

1) *Διαρροή λαδιού από τον μηχανισμό πηδαλίου*, η οποία είναι από τα πιο συνηθισμένα προβλήματα στα πλοία και συναντάται κατά κύριο λόγο και παρατηρείται κυρίως στις φραγές (seals) των εμβόλων σε υδραυλικό παλινδρομικό μηχανισμό πηδαλίου και στις φραγές των θαλάμων μιας αντλίας με περιστροφικά πτερύγια.
2) *Διαφορά στην πραγματική γωνία του πηδαλίου και στην επιθυμητή από τον πηδαλιούχο γωνία*, κάτι που συμβαίνει εξαιτίας της λανθασμένης ή ανεπαρκούς ρύθμισης του μοχλού ελέγχου και επαναφοράς.
3) *Μη ικανοποιητική πηδαλιούχηση*, που κυρίως οφείλεται σε δυσλειτουργία των βαλβίδων ασφαλείας ή διέλευσης στο σύστημα. Αυτό μπορεί να συμβεί και λόγω κάποιου προβλήματος στον μοχλό ελέγχου και επαναφοράς.
4) *Υπερβολικός θόρυβος και κραδασμοί από το μηχανισμό πηδαλίου* που υποδηλώνει παγίδευση αέρα στο σύστημα.
5) *Υψηλή θερμοκρασία λαδιού*, η οποία οφείλεται κυρίως στη χαμηλή στάθμη λαδιού στο σύστημα. Το λάδι είναι το μέσο λειτουργίας του συστήματος πηδαλιούχησης και επομένως οποιαδήποτε ανωμαλία στις παραμέτρους του λαδιού, όπως πχ μείωση του ιξώδους του από την μεγάλη αύξηση στην θερμοκρασία, θα προκαλέσει προβλήματα στην λειτουργία του πηδαλίου.
6) *Κίνηση πηδαλίου εκτός του επιτρεπτού ορίου*, όπως αυτό καθορίζεται από την SOLAS, και προκαλείται κατά βάση από κάποια δυσλειτουργία στον διακόπτη ορίου που υπάρχει στη μονάδα επαναφοράς ή στον αυτόματο πιλότο.

7) *Καμία λειτουργία πηδαλιούχησης από το σύστημα απομακρυσμένου ελέγχου* που οφείλεται μεταξύ άλλων σε βλάβη υδραυλικών αντλιών, δυσλειτουργία στη βαλβίδα μεταφοράς, διαρροές λαδιού ή πρόβλημα στο σύστημα τηλεχειρισμού.

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ – MBSE

Είναι προφανές από τις προηγούμενες περιγραφές ότι υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην πολυπλοκότητα μεταξύ ενός μηχανικού συστήματος πηδαλίου, το οποίο πλέον κατά βάση συναντάται σε παλαιότερες κατασκευές, και των ηλεκτρικών ή ηλεκτροϋδραυλικών συστημάτων, τα οποία είναι αρκετά πιο σύγχρονα. Γενικά, τα σύγχρονα μηχανολογικά συστήματα γίνονται όλο και περισσότερο πολύπλοκα εξαιτίας του γεγονότος ότι ενσωματώνουν έναν αυξανόμενο αριθμό εξαρτημάτων και μια ποικιλία τεχνολογιών ώστε να παρέχουν περισσότερη λειτουργικότητα στους χρήστες. Συνεπώς, η χρήση νέων σχεδιαστικών εργαλείων, διαδικασιών και μεθοδολογιών είναι άκρως απαραίτητη ώστε να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη πολυπλοκότητα και να βελτιωθεί η σχεδίαση, η ανάλυση και η αξιολόγηση του συστήματος με στόχο την ασφάλεια και την ελαχιστοποίηση κόστους (Baklouti, et al., 2020).

Για μια κρίσιμη πλατφόρμα ασφαλείας όπως ένα πλοίο ή ένα αεροσκάφος, η ανάλυση ασφαλείας (Safety Analysis – SA) είναι ένα ουσιαστικό μέρος του κύκλου ανάπτυξης ώστε να διασφαλίζονται η ακεραιότητα, η ποιότητα και η ευρωστία του σχεδίου. Η ανάπτυξη των συστημάτων και οι διαδικασίες αξιολόγησης ασφαλείας είναι αλληλεξαρτώμενες και επαναληπτικές. Ωστόσο, ζητήματα προκύπτουν καθώς οι αναλύσεις ασφαλείας κατά κανόνα πραγματοποιούνται ξεχωριστά από τους μηχανικούς ασφαλείας και η εξαγωγή πληροφοριών από το μοντέλο του συστήματος γίνεται χειροκίνητα. Τα σχέδια εξελίσσονται συνεχώς και αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αναλύσεις να εκτελούνται σε ξεπερασμένες εκδοχές του μοντέλου. Επομένως, η έγκαιρη ενσωμάτωση της αξιολόγησης της ασφάλειας (safety assessment) και η έγκαιρη επικύρωση των απαιτήσεων ασφαλείας του συστήματος είναι ζωτικής σημασίας (Lai, Robert, Shindman, & Olechowski, 2021).

Η Ανάλυση Ασφαλείας βάσει μοντέλου (Model-Based Safety Analysis – MBSA) παρέχει μια προσέγγιση στην αντιμετώπιση των ζητημάτων που αναφέρθηκαν. Το μοντέλο του συστήματος πάνω στο οποίο πραγματοποιείται η SA ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο, εξαλείφοντας έτσι την περίπτωση οι εργασίες να γίνονται με βάση ξεπερασμένες πληροφορίες. Δημιουργείται τώρα η ανάγκη για την ανάπτυξη πολύπλοκων και πρωτοποριακών συστημάτων σε λιγότερο χρόνο, με λιγότερο κόστος και ικανών να ανταποκριθούν σε μεταβαλλόμενες ανάγκες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ενσωμάτωσης της ανάλυσης ασφαλείας στη Μηχανική Συστημάτων βάσει μοντέλων (Model-Based Systems Engineering – MBSE). Η ενσωμάτωση αυτή είναι αρκετά ουσιώδης καθώς επιτρέπει στην SA να παραμένει συνεπής ως προς τον σχεδιασμό και ταυτόχρονα να είναι απαλλαγμένη από σφάλματα (Lai, Robert, Shindman, & Olechowski, 2021).

Η Μηχανική Συστημάτων (systems engineering – SE), γενικά, ορίζεται ως μια επαναληπτική διαδικασία σύνθεσης από πάνω προς τα κάτω (top-down synthesis), ανάπτυξης και λειτουργίας ενός ρεαλιστικού συστήματος που εμπεριέχει το πλήρες εύρος των απαιτήσεων για το σύστημα σε ένα βέλτιστο τρόπο. Οι τέσσερις κύριες διαδικασίες της μηχανικής συστημάτων είναι: ο καθορισμός των απαιτήσεων, η εκκίνηση της λειτουργίας του συστήματος, ο καθορισμός των λογικών και των φυσικών αρχιτεκτονικών και ο καθορισμός της συμπεριφοράς του συστήματος (Baklouti, et al., 2020).

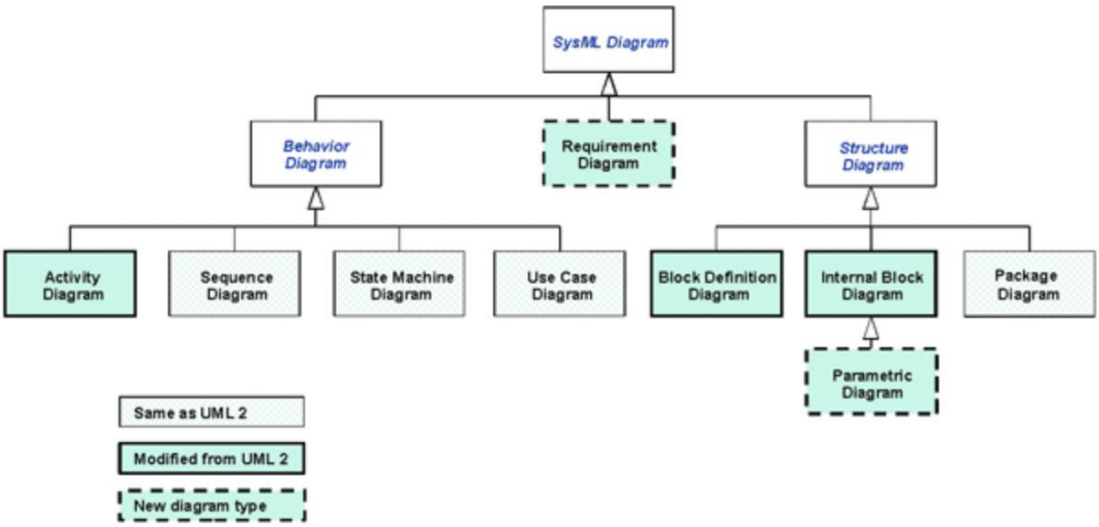
Η Μηχανική Συστημάτων βάσει μοντέλων (MBSE) είναι μία προσέγγιση της μηχανικής συστημάτων που υποστηρίζει την χρήση μοντέλων. Τα μοντέλα, αδιαμφισβήτητα, είναι αρκετά πιο περιγραφικά και λιγότερο ασαφή από τα έγγραφα, το οποίο διευκολύνει τον σχεδιασμό και την σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών σχεδίων. Σύμφωνα με τον INCOSE (International Council On Systems Engineering), «η MBSE είναι η επίσημη εφαρμογή μοντελοποίησης για την υποστήριξη των απαιτήσεων του συστήματος, του σχεδιασμού του, της ανάλυσης και των ενεργειών επαλήθευσης και επικύρωσης που ξεκινούν κατά τη φάση του εννοιολογικού σχεδιασμού και συνεχίζονται καθ΄ όλη τη διάρκεια της ανάπτυξης και των μεταγενέστερων φάσεων του κύκλου ζωής» (Hart, 2015).

Υπάρχουν διάφορες γλώσσες και εργαλεία μοντελοποίησης τα οποία χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός συστήματος σε μια προσέγγιση MBSE όπως η Unified Modeling Language (UML), η AltaRica, η Architecture Analysis & Design Language (AADL) και η SysML. Παρακάτω, περιγράφουμε μία από αυτές, την Systems Modeling Language (SysML), η οποία αποτελεί μια επέκταση της UML και είναι μία γλώσσα μοντελοποίησης γενικής χρήσης για την περιγραφή σύνθετων συστημάτων.

7. SYSML

Η SysML είναι μία γλώσσα μοντελοποίησης αρχιτεκτονικής γενικής χρήσης για εφαρμογές της μηχανικής συστημάτων που υποστηρίζει τον προσδιορισμό, την ανάλυση, τον σχεδιασμό, την επαλήθευση και την επικύρωση ενός ευρέος φάσματος συστημάτων. Αυτά τα συστήματα μπορεί να είναι hardware, software, πληροφορίες, διαδικασίες, προσωπικό και εγκαταστάσεις. Η SysML παρέχει στον χρήστη μεταξύ άλλων τέσσερις πολύ βασικές ικανότητες και για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε και για τη μοντελοποίηση του συστήματος που θα παρουσιάσουμε στο υπολογιστικό μέρος. Πρώτον, παρέχει μια ενοποιημένη τυπική και κατανοητή γλώσσα σε όλους όσους συμμετέχουν στον σχεδιασμό. Δεύτερον, επιτρέπει μια σαφή έκφραση των απαιτήσεων, που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και είναι δομημένη με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παρέχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης ενός μεγάλου εύρους συστημάτων (hardware, software, εξοπλισμός κλπ.) και τέλος, μέσω της SysML, είναι δυνατό να γίνει περιγραφή της κατανομής των απαιτήσεων στα διαφορετικά στοιχεία του μοντέλου (Baklouti, et al., 2020).

Η συγκεκριμένη γλώσσα παρέχει γραφικές αναπαραστάσεις με σημασιολογική βάση για τη μοντελοποίηση των απαιτήσεων (requirements), της συμπεριφοράς (behavior) , της δομής (structure) και των παραμετρικών (parametrics) του συστήματος, η οποία χρησιμοποιείται για την ενοποίηση με άλλα μοντέλα μηχανικής ανάλυσης. Η βασική δομική μονάδα στην SysML είναι το «block», το οποίο χρησιμοποιείται για να περιγράψει οποιοδήποτε στοιχείο του συστήματος όπως εγκαταστάσεις, εξοπλισμό, hardware, software κλπ.. Τα εννιά είδη διαγραμμάτων της SysML φαίνονται στην Εικόνα 13 και συνοψίζονται παρακάτω (OMG, 2022):



Εικόνα 13: *Είδη διαγραμμάτων της SysML*
(Πηγή: omgsysml.org)

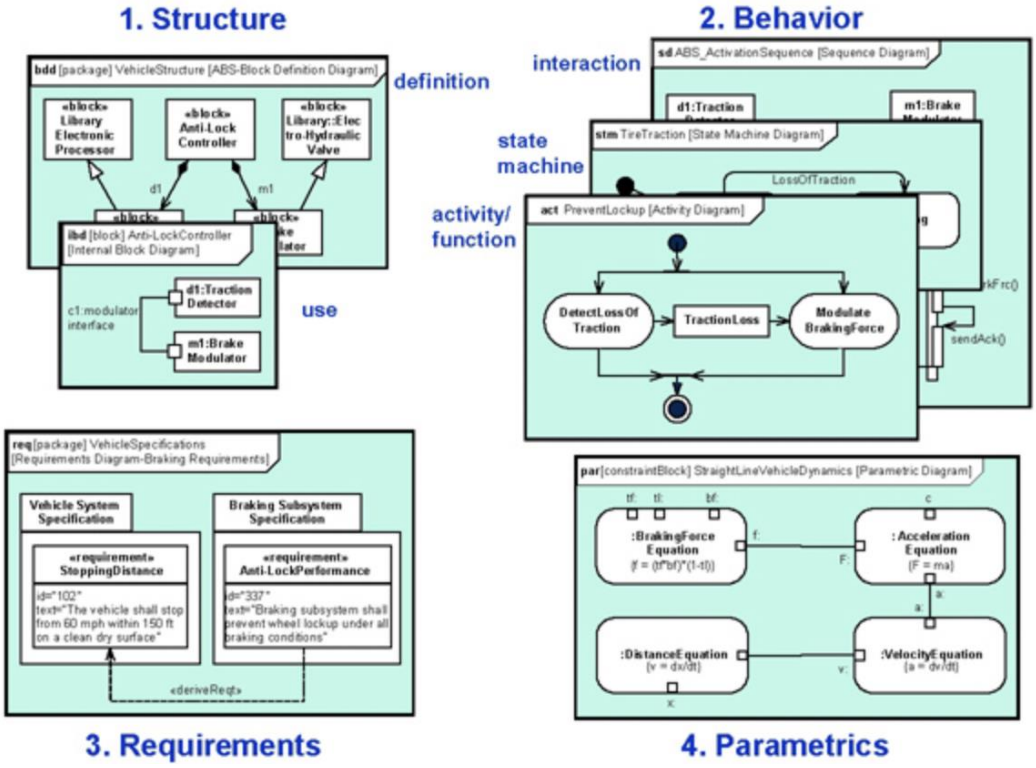
Η δομή του συστήματος αντιπροσωπεύεται από τα Block Definition Diagrams (BDD) και τα Internal Block Diagrams (IBD). Ένα BDD περιγράφει την ιεραρχία του συστήματος και τις ταξινομήσεις του συστήματος και των συστατικών του. Το IBD απεικονίζει την εσωτερική

δομή ενός συστήματος ως προς τα μέρη του, τις θύρες και τους συνδέσμους του. Το Package Diagram χρησιμοποιείται για την οργάνωση του μοντέλου (OMG, 2022).

Τα διαγράμματα που εκφράζουν την συμπεριφορά του συστήματος (behavior diagrams) είναι το Use Case Diagram, το Activity Diagram, το Sequence Diagram και το State Machine Diagram. Το use-case diagram προσφέρει μια περιγραφή λειτουργικότητας υψηλού επιπέδου που επιτυγχάνεται μέσω της αλληλεπίδρασης μεταξύ συστήματος και μερών του συστήματος. Το activity diagram αντιπροσωπεύει τη ροή των δεδομένων και τον έλεγχο μεταξύ των δραστηριοτήτων. Ένα sequence diagram απεικονίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των συνεργαζόμενων στοιχείων ενός συστήματος. Το state machine diagram περιγράφει τις μεταβιβάσει καταστάσεων και τις ενέργειες που εκτελούν το σύστημα και τα μέρη του ως απόκριση στα γεγονότα (OMG, 2022).

Η SysML εμπεριέχει επίσης μια γραφική κατασκευή για την αναπαράσταση των βάσει κειμένου απαιτήσεων και την συσχέτισή τους με άλλα στοιχεία του μοντέλου. Το Requirements Diagram αποτυπώνει τις ιεραρχίες και την προέλευση των απαιτήσεων και οι σχέσεις ικανοποίησης και επαλήθευσης επιτρέπουν στον δημιουργό του μοντέλου να συσχετίσει μια απαίτηση με ένα στοιχείο του μοντέλου που ικανοποιεί και επαληθεύει τις απαιτήσεις. Το συγκεκριμένο διάγραμμα παρέχει μια γέφυρα μεταξύ των τυπικών εργαλείων διαχείρισης των απαιτήσεων και των μοντέλων του συστήματος (OMG, 2022).

Το Parametric Diagram αντιπροσωπεύει περιορισμούς στις τιμές ιδιοτήτων (value properties) του συστήματος όπως η απόδοση, η αξιοπιστία και οι ιδιότητες μάζας και λειτουργεί ως μέσο για την ενσωμάτωση των μοντέλων προδιαγραφών και σχεδιασμού με τα μηχανικά μοντέλα ανάλυσης (OMG, 2022).



Εικόνα 14: *Οι 4 κολόνες της SysML*
(Πηγή: omgsysml.org)

8. REDUNDANCY

Η ασφάλεια, η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των συστημάτων και των υποσυστημάτων τους είναι δύο απαραίτητες συνθήκες για την εύρυθμη και απρόσκοπτη λειτουργεία ενός πλοίου. Για τον λόγο αυτό, στη μηχανική γενικότερα, πολύ μεγάλο ρόλο παίζει η χρήση εφεδρειών (redundancies) ως προς τα συστήματα αυτά, όπου κρίνεται αναγκαίο. Με τον όρο redundancy ορίζεται η χρήση πρόσθετων στοιχείων, εκτός του αριθμού που απαιτείται για την ικανοποιητική λειτουργία ενός συστήματος με σκοπό να αυξηθεί η αξιοπιστία του. Σίγουρα, η προσθήκη redundancy αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό ενός συστήματος και σε γενικές γραμμές πολλές εφαρμογές με την υψηλή αξιοπιστία των σύγχρονων ηλεκτρικών και μηχανολογικών εξαρτημάτων δεν χρειάζονται εφεδρικά στοιχεία ώστε να είναι επιτυχημένα. Ωστόσο, εάν το κόστος και οι κίνδυνοι μιας αστοχίας είναι αρκετά υψηλοί, το redundancy κρίνεται ως μια επιβεβλημένη λύση (Nguyen, Choley, & Mhenni, 2016).

Το redundancy είναι μια παράλληλη σύνδεση ισοδύναμων στοιχείων και διακρίνεται σε active, passive και hybrid redundancy. Επίσης, υπάρχουν τρία είδη βασικών στρατηγικών του active redundancy, οι οποίες είναι: active redundancy, standby redundancy και mixed redundancy. Αν όλα τα εφεδρικά στοιχεία λειτουργούν μαζί από την αρχή, παραμένουν συνεχώς σε λειτουργία και μοιράζονται το φορτίο, τότε έχουμε active redundancy. Αντιθέτως, στο standby redundancy, τα εφεδρικά μέρη δεν τίθενται σε λειτουργία έως ότου αστοχήσει κάποια από τις βασικές μονάδες. Δηλαδή, την στιγμή αστοχίας του εξαρτήματος που είναι σε λειτουργία, το standby redundancy μεταβαίνει σε ένα εφεδρικό μέρος ώστε να συνεχιστεί κανονικά η λειτουργία του συστήματος. Τα είδη του standby redundancy είναι τρία: cold, warm και hot. Το cold standby redundancy χρησιμοποιείται όταν ο χρόνος απόκρισης σε μια αστοχία δεν είναι υψηλής προτεραιότητας. Το warm standby redundancy χρησιμοποιείται επίσης σε όχι τόσο κρίσιμες διαδικασίες που όμως απαιτούν πιο γρήγορο χρόνο απόκρισης από το cold redundancy, ενώ στο hot standby redundancy ο χρόνος απόκρισης πρέπει να είναι στιγμιαίος. Το mixed redundancy, τέλος, είναι ο συνδυασμός του active και standby redundancy που αποσκοπεί στην ενίσχυση της αξιοπιστίας του συστήματος (Baklouti, et al., 2020).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3), συνοψίζονται τα 4 πιθανά σενάρια για redundancy και καθορίζονται ο αρχικός αριθμός των active και standby εξαρτημάτων για κάθε σενάριο:

Πίνακας 3: *Redundancy Strategy*
(Baklouti, et al., 2020)

Redundancy Strategy	Number of active components	Number of standby components
No redundancy	= 1	= 0
Active redundancy	> 1	= 0
Standby redundancy	= 1	>= 1
Mixed redundancy	> 1	>= 1

9. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΝΔΡΩΝ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ – FAULT TREE ANALYSIS

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι διεθνείς ναυτιλιακές αρχές έχουν πραγματοποιήσει κάποιες πολύ σημαντικές προσπάθειες ώστε να προωθήσουν την έννοια της ασφάλειας στη θάλασσα για τη βιομηχανία των ναυτιλιακών μεταφορών. Ωστόσο, ατυχήματα στη θάλασσα, σε παγκόσμια κλίμακα, εξακολουθούν να συμβαίνουν και μάλιστα σε αξιοσημείωτο αριθμό. Στην αγγλική βιβλιογραφία, για την έννοια των ατυχημάτων εμπλέκονται οι όροι *incident* και *accident*, οι οποίοι είναι συναφείς αλλά έχουν μια σημαντική διαφορά. Ο όρος incident περιγράφει ένα μη αναμενόμενο γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σε περιουσιακή ζημιά αλλά όχι κάποιο τραύμα ή ασθένεια και για αυτό τον λόγο αποκαλούνται και «παραλίγο ατυχήματα» (near misses). Ο όρος accident είναι ένα ανεπιθύμητο γεγονός που έχει δυσμενείς συνέπειες, όπως για παράδειγμα έναν τραυματισμό, απώλεια ζωής, οικονομικές απώλειες, περιβαλλοντική ζημιά και ζημιά ή απώλεια περιουσίας. Τα ατυχήματα είναι ένα αποτέλεσμα ενός απροσδόκητου συνδυασμού καταστάσεων ή γεγονότων. Οι βασικοί λόγοι των ατυχημάτων είναι συναφείς παράγοντες, οι οποίοι οδηγούν σε ένα λάθος και αν το λάθος αυτό συνδυαστεί με τις κατάλληλες συνθήκες, το ατύχημα συμβαίνει (Ugurlu, Köse, Yildirim, Yuskekyildiz, & Ercan, 2013).

Ο σκοπός της ανάλυσης των ατυχημάτων και των παραλίγο ατυχημάτων είναι ο καθορισμός των αιτιών και των ειδικών παραγόντων που συμβάλλουν σε αυτά. Φυσικά, η ανάλυση ατυχημάτων, η οποία συνεπάγεται κάποιο μοντέλο ατυχήματος, είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία για την προσφορά δεδομένων στην ανάπτυξη προαγωγικών και οικονομικά αποδοτικών κανονισμών. Ένα μοντέλο ατυχήματος είναι μια αφηρημένη εννοιολογική αναπαράσταση του γεγονότος και της δημιουργίας του ατυχήματος που περιγράφει τον τρόπο οπτικής και σκέψης σχετικά με το πώς και το γιατί συμβαίνει ένα ατύχημα και πραγματοποιεί πρόβλεψη του φαινομένου (Ugurlu, Köse, Yildirim, Yuskekyildiz, & Ercan, 2013).

Ανάμεσα στα ναυτικά ατυχήματα, τα πιο επικίνδυνα θεωρούνται αυτά στα οποία εμπλέκονται δεξαμενόπλοια (tanker accidents) και ο λόγος για τη θεώρηση αυτή είναι η επικινδυνότητα των φορτίων που μεταφέρουν (πχ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Εξαιτίας του ότι οι εργασίες σε μια υπεράκτια κατασκευή εξόρυξης υδρογονανθράκων είναι άμεσα συνδεδεμένες με τα συγκεκριμένα είδη φορτίων, είναι αυτονόητο ότι πιθανό ατύχημα στις κατασκευές αυτές μπορεί να αποβεί εξίσου μοιραίο, όπως αναφέρθηκε πιο αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Μια συστηματική προσέγγιση πρέπει να ακολουθηθεί ώστε να αναγνωριστούν επαρκώς οι κίνδυνοι και οι συνέπειες ενός ατυχήματος με στόχο να περιοριστούν εφαρμόζοντας τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας (Ugurlu, Köse, Yildirim, Yuskekyildiz, & Ercan, 2013).

Οι υπεράκτιες εργασίες εξόρυξης είναι απόρροια της συνεχώς αυξανόμενης κοινωνικής ανάγκης για ενέργεια. Η ικανοποίηση της ανάγκης αυτής, όπως και άλλων αναγκών σε επικοινωνίες, μεταφορές κλπ., απαιτεί πολύπλοκα διασυνδεδεμένα δίκτυα και συστήματα τα οποία εξελίσσονται διαρκώς και ταχέως καθώς η τεχνολογία αλλάζει και βελτιώνεται. Οι καταναλωτές ζητούν όλο και υψηλότερα επίπεδα αξιοπιστίας και απόδοσης και την ίδια στιγμή, η πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών αυξάνεται. Με βάση αυτή την πολύπλοκη και εξελισσόμενη ατμόσφαιρα, η χρήση και η εφαρμογή παραδοσιακών μοντέλων

αξιοπιστίας είναι περιορισμένη δεδομένου ότι απαιτούν δεδομένα και υποθέσεις τα οποία μπορεί να μην είναι κατάλληλα για τα πολύπλοκα σύγχρονα συστήματα (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

Τέτοια πολύπλοκα συστήματα υπάρχουν παντού ανάμεσά μας, όπως για παράδειγμα στα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, στους υπολογιστές, στις ηλεκτρικές συσκευές, στα εργοστάσια πυρηνικής ενέργειας, στα μεταφορικά οχήματα και στις υπεράκτιες κατασκευές. Ο σχεδιασμός αξιόπιστων συστημάτων και ο καθορισμός της διαθεσιμότητάς τους αποτελούν πολύ σημαντικά έργα για τους μηχανικούς, καθώς η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα (reliability & availability) έχουν άμεση σχέση με έννοιες όπως η ποιότητα και η ασφάλεια (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

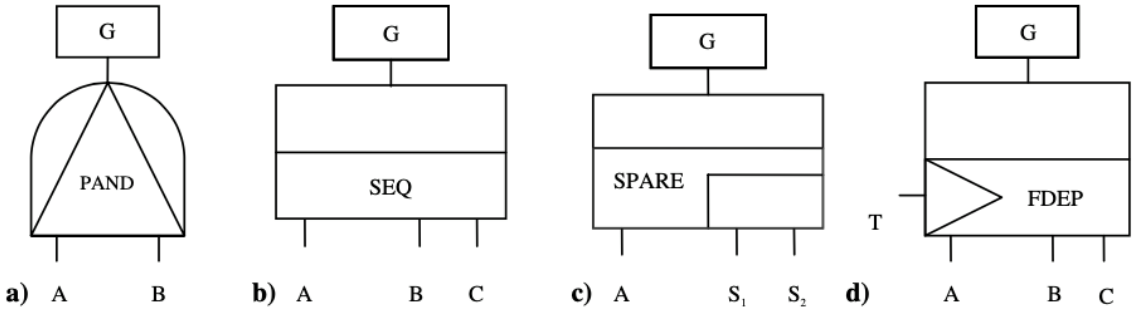
Η ανάλυση ρίσκου μέσω της μοντελοποίησης ατυχημάτων αποτελεί μια μέθοδο, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αν εκτελεστεί επαρκώς συμβάλλει στην αξιοπιστία του συστήματος και, συνεπώς, στη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας αυτού. Η επιλογή του μοντέλου είναι αρκετά σημαντική, γιατί με βάση αυτό εξάγονται πληροφορίες και συνέπειες του ατυχήματος που θα ανταποκρίνονται ή όχι στην πραγματικότητα. Μια θεωρητική μεθοδολογία ανάλυσης ρίσκου ενός ατυχήματος πρέπει να περιλαμβάνει (Παναγιωτόπουλος, 2015):

- Απεικόνιση της ακολουθίας περιστατικών και συσχετισμών
- Αναγνώριση ενεργειών που δεν λειτούργησαν ή λειτούργησαν ανεπαρκώς
- Ορισμός ανθρώπινου λάθους, τεχνικής αστοχίας και δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών
- Συσχετισμό μεταξύ αστοχιών και βασικών διαδικασιών του συστήματος (τεχνικά, αλληλεπίδραση ανθρώπινου παράγοντα – μηχανημάτων, περιβάλλον)
- Αναγνώριση προληπτικών και διορθωτικών μέτρων

Υπάρχουν πολλές τεχνικές για την ανάλυση ρίσκου, μεταξύ των οποίων τα δένδρα σφαλμάτων (fault trees) που είναι από τις πιο δημοφιλείς και διαδεδομένες. Η ανάλυση δένδρων σφαλμάτων (Fault Tree Analysis – FTA) χρησιμοποιείται εκτεταμένα για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας πολύπλοκων και κρίσιμων μηχανικών συστημάτων. Η FTA είναι μια γραφική αναπαράσταση διαφόρων συνδυασμών βασικών αστοχιών που οδηγούν στην εμφάνιση ανεπιθύμητων κορυφαίων γεγονότων (top events). Ξεκινώντας από το κορυφαίο γεγονός, όλοι οι πιθανοί τρόποι που οδήγησαν σε αυτό εξετάζονται συστηματικά. Η μεθοδολογία της ανάλυσης δένδρων σφαλμάτων είναι βασισμένη σε τρεις υποθέσεις: (α) τα γεγονότα είναι δυαδικά γεγονότα, (β) τα γεγονότα είναι στατιστικά ανεξάρτητα, (γ) η σχέση ανάμεσα στα γεγονότα παρουσιάζεται με τη βοήθεια των λογικών πυλών (gates) Boolean (AND, OR, voting). Η ανάλυση πραγματοποιείται σε δύο βήματα: το ποιοτικό μέρος στο οποίο προκύπτει η λογική έκφραση του κορυφαίου γεγονότος σε όρους των πρώτον συνεπαγόντων (prime implicants) - τα ελάχιστα σύνολα αποκοπής (minimal cut-sets) - και το ποσοτικό μέρος στο οποίο με βάση τις πιθανότητες που έχουν αποδοθεί στα γεγονότα αστοχιών των βασικών συστατικών του συστήματος, υπολογίζεται η πιθανότητα εμφάνισης του κορυφαίου γεγονότος (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

Τα στατικά δένδρα σφαλμάτων (static fault trees) με τις πύλες AND, OR και Voting δεν είναι σε θέση να συλλάβουν τη συμπεριφορά των στοιχείων των πολύπλοκων συστημάτων και των αλληλεπιδράσεών τους όπως τα εξαρτώμενα από την ακολουθία γεγονότα, η δυναμική διαχείριση πλεονασμού και οι προτεραιότητες των γεγονότων αστοχίας. Με στόχο να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία, εισάγεται η ιδέα των δυναμικών δένδρων σφαλμάτων (Dynamic Fault Trees – DFTs) προσθέτοντας την έννοια της ακολουθίας στην κλασσική προσέγγιση των δένδρων σφαλμάτων. Οι αστοχίες των συστημάτων μπορούν έτσι να βασιστούν τόσο στη σειρά όσο και στον συνδυασμό συστατικών του συστήματος που αστοχούν. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής των δυναμικών πυλών στα δένδρα σφαλμάτων. Με τη βοήθεια των δυναμικών πυλών, η συμπεριφορά του συστήματος ως προς την εξαρτώμενη από την ακολουθία αστοχία μπορεί να προσδιοριστεί με DFT που είναι συμπαγή και κατανοητά. Η ισχύς της μοντελοποίησης των δυναμικών δένδρων σφαλμάτων έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον πολλών μηχανικών που ασχολούνται με κρίσιμα συστήματα ασφαλείας (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

Οι τέσσερις βασικές δυναμικές πύλες που εισάγονται μέσω των δυναμικών δένδρων σφαλμάτων είναι: η Priority AND (PAND), η Sequence Enforcing (SEQ), η Spare (SPARE) και η Functional Dependency (FDEP), οι οποίες αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω.



Εικόνα 15: *Οι δυναμικές πύλες: a) PAND, b) SEQ, c) SPARE, d) FDEP (Πηγή: Springer Series in Reliability Engineering)*

Η *πύλη PAND* καταλήγει σε αστοχία εάν όλα τα στοιχεία εισόδου έχουν αστοχήσει σε μια προκαθορισμένη σειρά (από αριστερά στα δεξιά σε γραφική σημειογραφία). Στην Εικόνα 15a, αστοχία συμβαίνει αν το A αστοχεί πριν από το B, αλλά το B μπορεί να αστοχήσει πριν από το A χωρίς ωστόσο να επιφέρει αστοχία στο G. Στον πίνακα αληθείας της PAND (βλ. Πίνακα 4), η εμφάνιση του γεγονότος (αστοχία) παριστάνεται ως 1, ενώ η μη εμφάνιση ως 0. Η δεύτερη περίπτωση, παρόλο που και τα δύο στοιχεία αστόχησαν, λόγω της μη επιθυμητής σειράς, δεν θεωρείται αστοχία του συστήματος (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

Πίνακας 4: *Πίνακας αληθείας της πύλης PAND με δύο εισόδους (Πηγή: Springer Series in Reliability Engineering)*

A	B	Έξοδος (Output)
1 (πρώτο)	1 (δεύτερο)	1
1 (δεύτερο)	1 (πρώτο)	0
0	1	0
1	0	0
0	0	0

Η *πύλη SEQ* εξαναγκάζει τα στοιχεία εισόδων να αστοχούν σε συγκεκριμένη σειρά: όταν μια πύλη SEQ βρίσκεται σε ένα DFT, η ακολουθία αστοχιών ποτέ δεν εμφανίζεται σε διαφορετικές σειρές. Η SEQ επιτρέπει τα γεγονότα να συμβούν μόνο στην προκαθορισμένη σειρά και έτσι μια διαφορετική ακολουθία αστοχιών αποκλείεται να εμφανιστεί ενώ η PAND δεν απαιτεί τέτοια ισχυρή υπόθεση. Ακολουθεί ο πίνακας αληθείας της SEQ (βλ. Πίνακα 5) (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

Πίνακας 5: *Πίνακας αληθείας της πύλης SEQ με τρεις εισόδους (Πηγή: Springer Series in Reliability Engineering)*

A	B	C	Έξοδος (Output)
0	0	0	0
0	0	1	Αδύνατο
0	1	0	Αδύνατο
0	1	1	Αδύνατο
1	0	0	0
1	0	1	Αδύνατο
1	1	0	0
1	1	1	1

Οι *πύλες SPARE* είναι δυναμικές πύλες για τη μοντελοποίηση ενός ή περισσότερων κύριων στοιχείων μπορούν να αντικατασταθούν από ένα ή περισσότερα εφεδρικά (spares), με την ίδια λειτουργικότητα (βλ. Εικόνα 15c). Η πύλη SPARE αστοχεί όταν ο αριθμός των λειτουργικών εφεδρικών και/ή των κύριων στοιχείων είναι λιγότερος από τον ελάχιστο απαιτούμενο. Τα εφεδρικά μπορεί να αστοχήσουν ακόμα και όταν είναι αδρανή αλλά το ποσοστό αστοχίας ενός μη ενεργού εφεδρικού είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο ποσοστό ενός εφεδρικού που βρίσκεται σε λειτουργία. Πιο συγκεκριμένα, εάν λ είναι το ποσοστό αστοχίας ενός εφεδρικού σε λειτουργία, το ποσοστό αστοχίας ενός αδρανούς εφεδρικού είναι $a\lambda$, όπου $0 \leq a \leq 1$ είναι ο συντελεστής αδράνειας. Αν $a = 1$, τα εφεδρικά καλούνται «hot», ενώ αν $a = 0$ καλούνται «cold». Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τον πίνακα αληθείας της πύλης SPARE (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

Πίνακας 6: *Πίνακας αληθείας της πύλης SPARE με δύο εισόδους (Πηγή: Springer Series in Reliability Engineering)*

A	B	Έξοδος (Output)
1	1	1
0	1	0
1	0	0
0	0	0

Η *πύλη FDEP* (βλ. Εικόνα 15d) περιλαμβάνει μία είσοδο διέγερσης (trigger input) – είτε ένα βασικό γεγονός είτε μία έξοδο άλλης πύλης του δένδρου – και ένα ή περισσότερα εξαρτημένα γεγονότα. Τα εξαρτημένα γεγονότα είναι λειτουργικά εξαρτημένα από το γεγονός διέγερσης. Όταν το γεγονός διέγερσης συμβαίνει, τα εξαρτημένα βασικά γεγονότα «εξαναγκάζονται» να συμβούν. Στο μαρκοβιανό μοντέλο της πύλης FDEP, όταν

δημιουργείται μια κατάσταση όπου το γεγονός διέγερσης ικανοποιείται, όλα τα εξαρτημένα γεγονότα έχουν την επισήμανση ότι έχουν συμβεί. Η ξεχωριστή εμφάνιση οποιουδήποτε από τα εξαρτημένα βασικά γεγονότα δεν έχει καμία επίδραση στο γεγονός διέγερσης (βλ. Πίνακα 7) (Faulin, Juan, Martorell, & Ramírez-Márquez, 2010).

Πίνακας 7: *Πίνακας αληθείας της πύλης FDEP με δύο εισόδους (Πηγή: Springer Series in Reliability Engineering)*

Διέγερση (Trigger)	Έξοδος (Output)	Εξαρτημένο Γεγονός 1	Εξαρτημένο Γεγονός 2
1	1	1	1
0	0	0/1	0/1

Σε γενικές γραμμές, η ανάλυση δένδρων σφαλμάτων είναι εφαρμόσιμη για κάθε είδους αξιολόγηση του επιπέδου επικινδυνότητας ενός συστήματος, αλλά χρησιμοποιείται πιο αποτελεσματικά για τον καθορισμό των θεμελιωδών αιτιών ειδικών αναγνωρισμένων ατυχημάτων, τα οποία είναι πιθανόν να εμπεριέχουν σχετικά πολύπλοκους συνδυασμούς γεγονότων. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των βασικών λόγων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ένα ατύχημα, επιτρέποντας έτσι τον εντοπισμό προληπτικών ή μετριαστικών μέτρων περιορίζοντας την πιθανότητα εμφάνισης του γεγονότος (ASEMS, 2016).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι (ASEMS, 2016):

- Χρησιμοποιείται ευρέως, είναι κοινώς αποδεκτή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση διεπιστημονικών συστημάτων
- Είναι κατάλληλη για την εξέταση των πολλών κινδύνων που προκύπτουν από τον συνδυασμό ανεπιθύμητων περιστάσεων
- Επιτρέπει τον εντοπισμό κοινού τρόπου λειτουργίας ή κοινών αιτιών αστοχίας που μπορεί να μην είναι εμφανείς κατά της εξέταση μεμονωμένων υποσυστημάτων
- Είναι συχνά η μόνη τεχνική που μπορεί να δημιουργήσει αξιόπιστες πιθανότητες για νέα, πολύπλοκα συστήματα
- Περιλαμβάνει τα ανθρώπινα λάθη στην ανάλυση
- Ανάλογα με τις απαιτήσεις της ανάλυσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά
- Είναι μια σαφής και λογική μορφή παρουσίασης σε χρήστες που δεν είναι εξοικειωμένοι με το αντικείμενο, υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται η κατάλληλη μορφή του δένδρου.

Από την άλλη πλευρά, τα βασικά μειονεκτήματα της ανάλυσης με χρήση δένδρων σφαλμάτων είναι (ASEMS, 2016):

- Η διαγραμματική μορφή αποθαρρύνει τους αναλυτές να δηλώσουν ρητά τις παραδοχές και τις δεσμευμένες πιθανότητες για κάθε πύλη.
- Η FTA μπορεί να είναι αρκετά χρονοβόρα και πολύπλοκη για μεγάλα συστήματα
- Η εκάστοτε μέθοδος εξετάζει μόνο ένα κορυφαίο γεγονός, με αποτέλεσμα να χρειάζεται η ανάπτυξη περισσότερων FTA για την ανάλυση άλλων κορυφαίων γεγονότων

- Οι αναλυτές ενδέχεται να παραβλέψουν τους τρόπους αστοχίας και να αποτύχουν στην αναγνώριση των κοινών αιτιών αστοχίας (δηλαδή ένα μόνο σφάλμα που επηρεάζει δύο η περισσότερα μέτρα προστασίας) εκτός εάν διαθέτουν υψηλό επίπεδο εμπειρογνωμοσύνης και συνεργάζονται στενά με τον χειριστή
- Η χειροκίνητη ανάλυση με δένδρα σφαλμάτων προϋποθέτει ότι όλα τα γεγονότα είναι ανεξάρτητα, ωστόσο τα πιο εξελιγμένα πακέτα λογισμικού υπολογιστών μπορούν να καλύψουν τον συνδυασμό γεγονότων

ΕΦΑΡΜΟΓΗ - ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Μία από τις πιο κρίσιμες διαδικασίες κατά την προσέγγιση ενός OSV σε μια πλατφόρμα εξόρυξης είναι η εύρυθμη και ασφαλής λειτουργία του συστήματος πηδαλιουχίας του πλοίου. Πιθανή αστοχία στο σύστημα αυτό, αν δεν ληφθούν άμεσα τα απαραίτητα μέτρα αντιμετώπισης, μπορεί να προκαλέσει διάφορα σημαντικά προβλήματα όπως η σύγκρουση του πλοίου με την εξέδρα. Όπως έχει αναφερθεί εκτενώς στην αντίστοιχη ενότητα, μια σύγκρουση πλοίου με εξέδρα εξόρυξης πετρελαίου μπορεί να αποβεί αρκετά καταστροφική εξαιτίας των επικίνδυνων υλικών που εμπλέκονται στη λειτουργία της εξέδρας με συνέπειες τόσο σε ανθρώπινο επίπεδο (τραυματισμοί, απώλειες ζωών) όσο και σε περιβαλλοντικό και οικονομικό. Η ανάγκη επομένως διενέργειας ανάλυσης ρίσκου για τα αίτια που μπορούν να οδηγήσουν σε μια σύγκρουση OSV – offshore platform κρίνεται επιτακτική. Ένα τέτοιο αίτιο είναι η αστοχία του συστήματος πηδαλίου του πλοίου και είναι και αυτό που μελετάμε στη συνέχεια στις περιπτώσεις των πλήρως επανδρωμένων πλοίων, των ημι-αυτόνομων και πλήρως αυτόνομων.

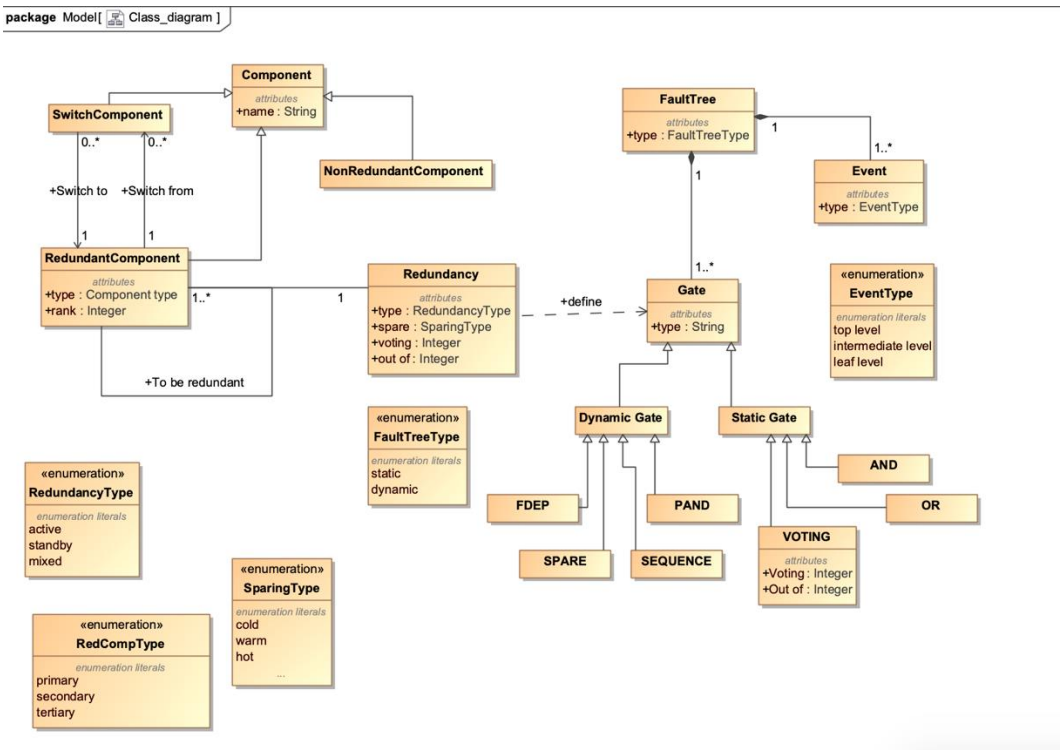
Η ανάλυση ρίσκου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους και τεχνικές. Στην περίπτωσή που εξετάζουμε, επιλέχθηκε η μέθοδος που έχει ως στόχο την κάλυψη του κενού που δημιουργείται μεταξύ της μηχανικής των συστημάτων (SE) και της αξιολόγησης ασφαλείας (SA) και ουσιαστικά αποτελεί έναν συνδυασμό της MBSE και της MBSA που έχουν αναλυθεί προηγουμένως. Η χρήση μοντέλων μέσω της MBSE επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους να εργαστούν με μεγάλη επιτυχία σε συστήματα υψηλού βαθμού πολυπλοκότητας όπως είναι και το σύστημα πηδαλίου που θα εξετάσουμε. Επίσης, η αξιοπιστία των συστημάτων αυτών θεωρείται αρκετά υψηλή δεδομένου ότι παρέχεται η δυνατότητα παρέμβασης στον σχεδιασμό σε πραγματικό χρόνο καθώς και διευκολύνεται η ενσωμάτωση των πληροφοριών για την συντήρηση του συστήματος με στόχο την ευκολότερη συντήρηση και τη μείωση του κόστους συντήρησης.

Η εφαρμογή της μηχανικής συστημάτων βάσει μοντέλων πραγματοποιείται μέσω των διαφόρων γλωσσών μοντελοποίησης. Μια από αυτές είναι η SysML την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για την μοντελοποίηση του συστήματος του πηδαλίου. Η SysML επιλέχθηκε για ορισμένους λόγους. Πρώτον, επιβάλλει μια σταθερή σύμβαση, έτσι ώστε ανεξάρτητα από το διάγραμμα που χρησιμοποιείται, η σημασία του κάθε συμβόλου είναι ξεκάθαρη. Επίσης, συμβάλλει στην σαφή έκφραση των απαιτήσεων που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες δομημένες με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τέλος, καθιστά εφικτή την περιγραφή της κατανομής των απαιτήσεων στα διάφορα στοιχεία του μοντέλου.

Η χρήση εφεδρειών (redundancy) στα μηχανικά συστήματα και πιο ειδικά στα μέρη των συστημάτων που θεωρούνται ως πιο κρίσιμα να αστοχήσουν βελτιώνει την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την διαθεσιμότητα των συστημάτων αυτών. Επομένως, μέσω του εργαλείου μοντελοποίησης που χρησιμοποιούμε, ενσωματώνονται στο υπό μελέτη σύστημα όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για το προφίλ της εφεδρείας (redundancy profile) που κατασκευάσαμε. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται συνδυασμός του redundancy profile και της επίσημης περιγραφής του συστήματος με τη βοήθεια των δομικών διαγραμμάτων της SysML ώστε να υποδηλωθεί η δομή και να παραχθεί ένα δυναμικό δένδρο σφαλμάτων που λαμβάνει υπόψη την παραγωγή εφεδρειών και την σειρά αστοχίας των εξαρτημάτων.

1. REDUNDANCY PROFILE

Το μοντέλο του redundancy profile δημιουργήθηκε με τη βοήθεια ενός class diagram της UML και φαίνεται στο Διάγραμμα 1. Επί της ουσίας πρόκειται για ένα μετα-μοντέλο (meta-model), το οποίο ουσιαστικά ορίζει τη γλώσσα και τις διαδικασίες μέσω των οποίων δημιουργείται ένα μοντέλο (Baklouti, et al., 2020). Το διάγραμμα αυτό περιγράφει την αποσύνθεση ενός δένδρου σφαλμάτων (FT) σε πύλες (gates) και συμβάντα (events) καθώς και πώς γίνεται η μοντελοποίηση του redundancy στην προσέγγιση του συστήματος που μελετάμε.



Διάγραμμα 1. *Class Diagram για τη διαχείριση του redundancy*

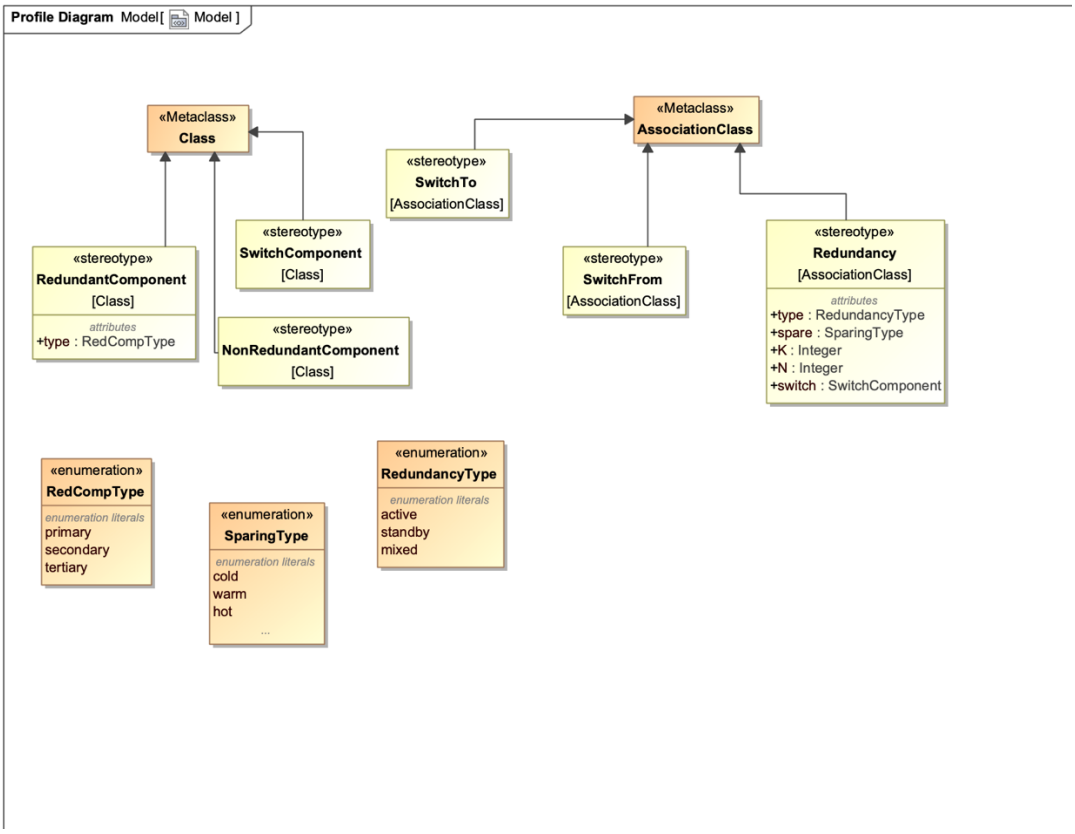
Όπως φαίνεται, ένα FT χαρακτηρίζεται από το είδος (FT type) που μπορεί να είναι είτε static είτε dynamic με τη βασική διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους να είναι ότι στα static fault trees η σειρά των πιθανών αστοχιών δεν είναι σημαντική, ενώ στα dynamic fault trees η σειρά των συμβάντων αστοχιών έχει αντίκτυπο στο κορυφαίο ανεπιθύμητο συμβάν (top undesired event). Τα συμβάντα σε ένα FT είναι τριών ειδών. Το top event αντιπροσωπεύει το ανεπιθύμητο συμβάν. Τα leaf events αποτελούν βασικά συμβάντα που συμβαίνουν εντελώς αυθόρμητα και τέλος, τα intermediate events είναι όλα τα συμβάντα μεταξύ των top και leaf events.

Επίσης, όμοια με τα δύο είδη των FT, υπάρχουν και δύο είδη λογικών θυρών (logic gates) που αποσκοπούν στην περιγραφή της διάδοσης των αστοχιών που οδηγούν στο top event. Οι στατικές θύρες όπως οι “AND”, “OR”, “VOTING” χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των static FTs, ενώ οι δυναμικές θύρες “FDEP”, “SPARE”, “SEQUENCE” και “PAND” (βλ. Εικόνα 15) χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις στατικές θύρες για την δημιουργία των dynamic FTs.

Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε ένας σύνδεσμος γενίκευσης (generalization association) μεταξύ της κλάσης Component και των τριών υποκλάσεων (NonRedundant Component, Redundant Component, Switch Component) όπως φαίνεται στο πάνω αριστερά μέρος του διαγράμματος 1. Η πρώτη υποκλάση αντιπροσωπεύει τα μέρη του συστήματος εκείνα που δεν έχουν εφεδρικά στοιχεία (nonredundant). Η δεύτερη υποκλάση περιλαμβάνει τα redundant components του συστήματος και πως αυτά συνδέονται μεταξύ τους. Στην περίπτωση της standby εφεδρείας αποδίδουμε ως χαρακτηριστικό την σειρά με την οποία τα redundant στοιχεία λειτουργούν (primary, secondary κλπ.). Τέλος, τα switch components είναι τα μέρη τα συστήματος που επιτρέπουν την αλλαγή από ένα primary στοιχείο σε ένα standby. Οι σύνδεσμοι "Switch From" και "Switch To" χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την σειρά ενεργοποίησης των διάφορων εφεδρειών.

Τα είδη εφεδρειών (redundancy type) είναι τρία: active, standby και mixed. Στην περίπτωση του active redundancy, δεν χρειάζεται να διευκρινίσουμε τα primary και secondary μέρη αλλά ούτε και τα switch components. Στην περίπτωση του standby redundancy, ένα primary και τουλάχιστον ένα secondary στοιχείο πρέπει να οριστούν, καθώς και ένα switch component, εάν υπάρχει. Τέλος, στην περίπτωση του mixed είδους εφεδρείας, ένα ή περισσότερα primary και ένα ή περισσότερα secondary μέρη ορίζονται σε συνδυασμό με ένα switch component αν υπάρχει.

Για να γίνει εφικτή η ενσωμάτωση των πληροφοριών σχετικά με το redundancy όπως παρουσιάστηκε στο Διάγραμμα 1 στα μοντέλα της SysML, δημιουργούμε μια επέκταση της UML με όνομα "Redundancy Profile" με τη βοήθεια του UML Profile Diagram, το οποίο απεικονίζεται στο Διάγραμμα 2. Όπως διακρίνεται σε αυτό το διάγραμμα, τα non redundant components, τα redundant components και τα switch components αποτελούν επεκτάσεις των blocks της SysML. Δηλαδή, το stereotype "Component" θα επεκτείνει τη μετα-κλάση "Class" της UML, ενώ σχέσεις εφεδρειών μεταξύ των redundant components θα αποτελέσουν μια επέκταση της μετα-κλάσης "Association Class" και θα αναπαρασταθούν από ένα association block στο block definition diagram με στόχο να προσδιορίζουν το redundancy. Τα χαρακτηριστικά του redundancy όπως το είδος και το sparing θεωρούνται ως ορίσματα (tag definitions) του stereotype "Redundancy". Επίσης, οι θετικοί ακέραιοι "K" και "N" υποδηλώνουν αντίστοιχα τον ελάχιστο αριθμό των στοιχείων που απαιτούνται για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος και τον συνολικό αριθμό των εφεδρειών. Επομένως, οι σχεδιαστές των συστημάτων παρέχουν όλες τις πληροφορίες για το redundancy information στα μοντέλα της SysML μέσω του παρεχόμενου Redundancy Profile και στην συνέχεια, η δημιουργία του DFT θα πραγματοποιηθεί με βάση αυτές τις πληροφορίες.



Διάγραμμα 2. *Profile Diagram*

2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ DYNAMIC FAULT TREE

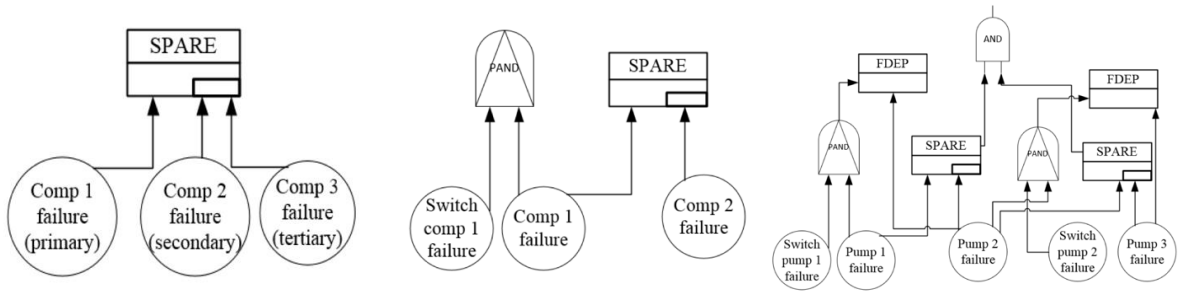
Ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας ενός επίπεδου FT με διάφορες δυναμικές θύρες που συγκεντρώνει όλα τα διαφορετικά υπο-δέντρα (subtrees). Ως εντολή εισόδου (input) σε αυτό το σημείο, έχουμε την εσωτερική δομή του συστήματος μέσω ενός SysML internal block diagram το οποίο παρέχει τα μέρη του συστήματος και τις αλληλεπιδράσεις τους αλλά και τις πληροφορίες εφεδρειών με βάση το κατασκευασμένο Redundancy Profile. Το IBD αποτελείται από μέρη που αναπαριστούν τα στοιχεία του συστήματος, τις εσωτερικές θύρες μέσω των οποίων τα στοιχεία αυτά αλληλοεπιδρούν και τις εξωτερικές θύρες, δηλαδή τις εξωτερικές διασυνδέσεις του συστήματος με το περιβάλλον του. Το top event του DFT ορίζεται ως ένα σφάλμα σε ένα εξωτερικό output του συστήματος.

Συνεπώς, μια fault tree analysis διενεργείται για ένα συγκεκριμένο ανεπιθύμητο συμβάν στο επίπεδο του συστήματος. Η εξωτερική θύρα "ο" που αντιστοιχεί στο top event του δένδρου θεωρείται ως εντολή εισόδου στον αλγόριθμο, ενώ το αποτέλεσμα του αλγορίθμου θα είναι ένα DFT. Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται μια αρχική έρευνα στο IBD υπό τη μορφή ενός προσανατολισμένου γραφήματος με στόχο την εύρεση όλων των εξωτερικών εντολών εισόδων και στοιχείων του συστήματος που έχουν κάποιο αντίκτυπο στην "ο". Έτσι, η αστοχία θα διαδοθεί μέσω των συνδέσεων των μερών σε όλο το σύστημα. Τα μέρη αυτά του συστήματος χωρίζονται σε 3 κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει όλες τις εξωτερικές εντολές εισόδου (external inputs - EI) που συνδέονται με την θύρα "ο". Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα non redundant components (NRC) που οδηγούν στο top event. Η τρίτη κατηγορία, τέλος, είναι τα redundant components (RC) μαζί με τα switch components.

Κάποιο σφάλμα σε ένα external input ή σε κάποιο από τα non redundant στοιχεία έχει ως αποτέλεσμα την αστοχία στο top event και αντιπροσωπεύεται από ένα leaf event. Για κάθε στοιχείο στα EI, NRC παράγεται ένα subtree. Στην περίπτωση των RC, ελέγχουμε αν το είδος εφεδρείας είναι active, standby ή mixed. Επίσης, μέσω του RedComponentType παρέχονται οι πληροφορίες για τον βαθμό (primary, secondary, tertiary κλπ.) του κάθε εφεδρικού στοιχείου.

Αν η εφεδρεία είναι active και το σύστημα απαιτεί "K" από "N" στοιχεία να λειτουργούν ώστε να εξασφαλίζεται και η σωστή λειτουργία του συστήματος, χρησιμοποιείται η θύρα "VOTING (K/N)". Με λίγα λόγια, αν περισσότερα από N-K στοιχεία αστοχήσουν, τότε αυτό επιφέρει αστοχία συνολικά στο σύστημα. Αν έχουμε standby redundancy χωρίς κάποιο switch component, τότε χρησιμοποιείται η λογική θύρα "SPARE" και παράλληλα δηλώνεται ο βαθμός της εφεδρείας (βλ. Εικόνα 16a). Το αποτέλεσμα της "SPARE" είναι αληθές όταν όλα τα στοιχεία αστοχούν. Στην περίπτωση του standby redundancy, που απαιτείται switch για την εναλλαγή μεταξύ στοιχείων του συστήματος, τότε χρησιμοποιούνται οι θύρες "SPARE" και "PAND" (βλ. Εικόνα 16b). Τέλος, εάν το είδος εφεδρείας είναι mixed και δεν απαιτείται switch για την αλλαγή από ένα στοιχείο σε ένα άλλο, το αποτέλεσμα είναι ο συνδυασμός ενός subtree που προκύπτει από active redundancy και ενός subtree προερχόμενου από standby redundancy χωρίς switch, όπως αυτού στην Εικόνα 16a. Αντίστοιχα, στην περίπτωση mixed εφεδρείας με switch component, το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι ένας συνδυασμός του subtree από active redundancy και του subtree από standby redundancy με switch όπως φαίνεται στην Εικόνα 16b, αν ένα standby στοιχείο χρησιμοποιείται για όλα τα active στοιχεία. Σε περίπτωση που περισσότερα από ένα standby στοιχεία χρησιμοποιούνται

τότε το είδος εφεδρείας είναι multi-standby και ένα νέο είδος διάταξης απαιτείται, όπως για παράδειγμα αυτό της Εικόνας 16c.



α) b) c)

Εικόνα 16: *a) Standby Redundancy χωρίς switch, b) Standby Redundancy με switch, c) Multi-standby Redundancy με switch (Πηγή: (Baklouti, et al., 2020))*

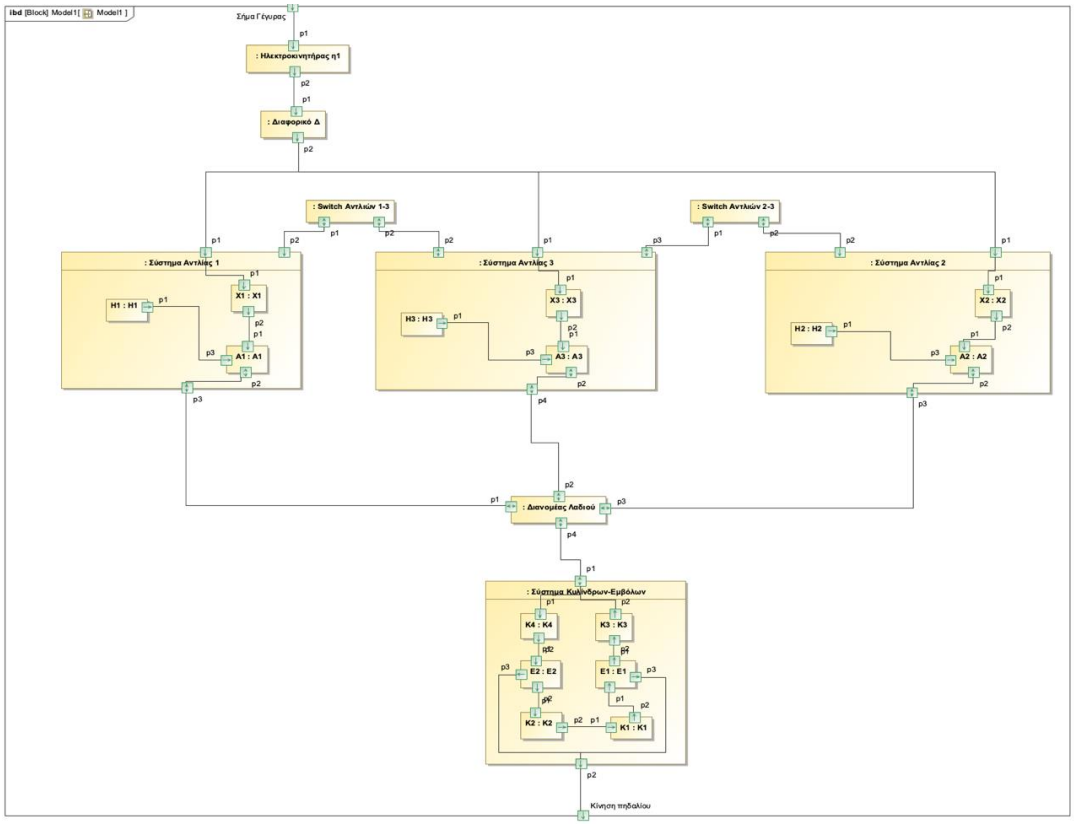
Τελικά, όλα τα subtrees που παράγονται από τις διάφορες υποπεριπτώσεις, συγκεντρώνονται μαζί ώστε να δημιουργηθεί το ολικό δυναμικό δένδρο σφαλμάτων με τη βοήθεια της συνάρτησης “Concatenate”. Το DFT περιέχει μία βασική θύρα “OR” και όλα τα subtrees συνδέονται άμεσα με αυτή τη θύρα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος (Baklouti, et al., 2020) παρουσιάζεται στην επόμενη σελίδα.

```
Algorithm DynamicFaultTreeGeneration

            Input:
            1)External output port  “o”
            2)IBD as an oriented graph
            3)Redundancy Profile information
            Output: Dynamic Fault Tree

            i=1

            For each element in EI do
              tree(i) = GenerateSubTree(leaf_event)
              i=i+1

            For each element in NRC do
              tree(i) = GenerateSubTree(leaf_event)
              i=i+1

            For each element in RC do
              ## Switch RedundancyType:
              ### case active:
                  read(k)
                  read(N)
                  tree(i) = GenerateSubTree(active_redundancy)

              ### case standby
                  if (SwitchComp = True) then:
               tree(i) = GenerateSubTree(standby_with_switch)
            else
                tree(i) = GenerateSubTree(standby_without_switch)

              ### case Multi-standby
              if (SwitchComp = True) then:
              tree(i) =GenerateSubTree(multi_standby_with_switch)
            else
              tree(i) = GenerateSubTree(multi_standby_without_switch)
              i=i+1

            for j=1:i-1
            result= Concatenate(tree(j))

            return result
```

3. CASE STUDY

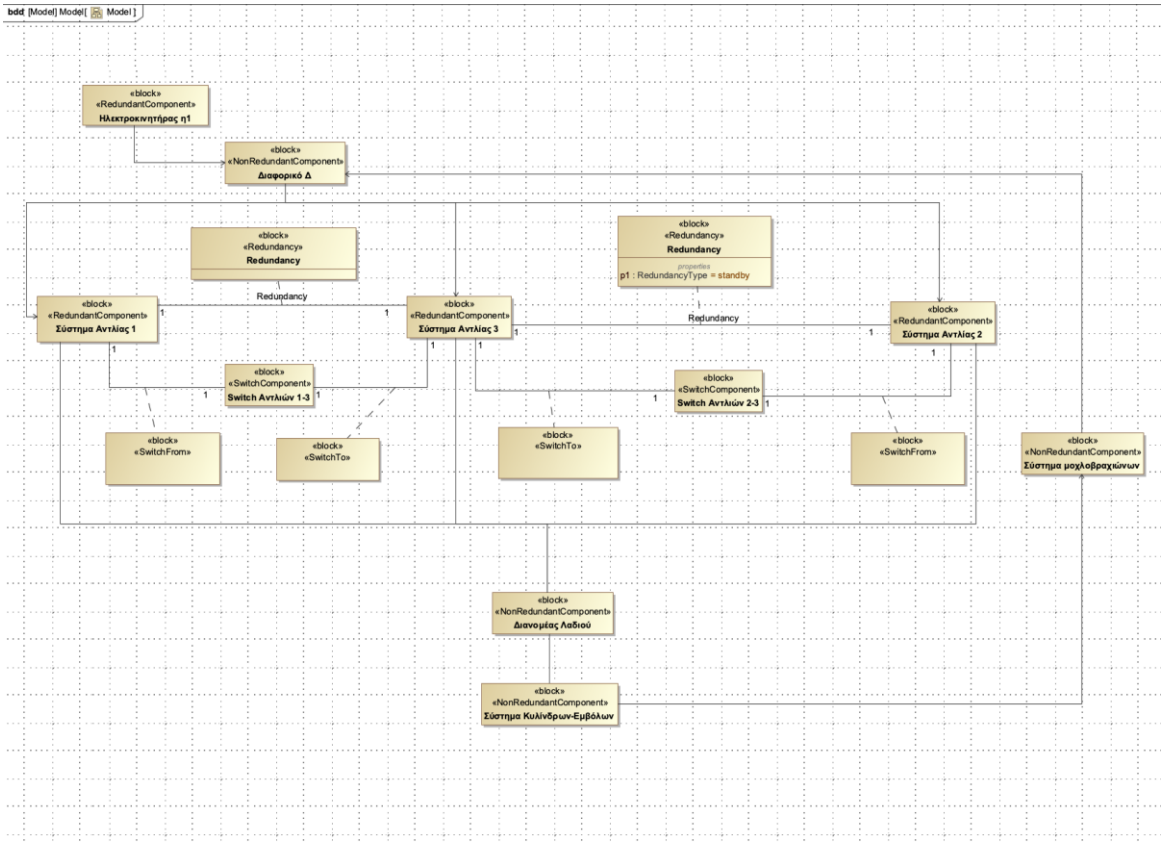
Στο κομμάτι αυτό της εργασίας μελετάται με τη βοήθεια των διαγραμμάτων δομής της SysML το σύστημα λειτουργίας του παλινδρομικού ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου με δύο έμβολα βυθίσεως, όπως αυτό περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.3.3.1.. Η βασική λειτουργία του συστήματος αυτού είναι η διανομή του λαδιού μέσω των αντλιών σε ένα σύστημα κυλίνδρων μέσα στους οποίους παλινδρομούν τα έμβολα και με τη βοήθεια 2 μοχλοβραχιόνων στρέφουν το πηδάλιο προς την επιθυμητή από τη γέφυρα κατεύθυνση. Στα διαγράμματα της SysML έχουν αποδοθεί στα διάφορα μέρη του συστήματος όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που βασίζονται στο Redundancy Profile, όπως αυτό έχει αναλυθεί προηγουμένως. Θα εργαστούμε για το σύστημα που λειτουργεί πλήρως επανδρωμένα και, αντίστοιχα, πλήρως αυτόνομα. Σημειώνουμε εδώ, ότι όταν το πλοίο είναι σε ημι-αυτόνομη λειτουργία και υπάρχει πλήρωμα στο πλοίο, το σύστημα αυτό λειτουργεί όπως και σε ένα πλήρως επανδρωμένο πλοίο.

Η δομή του συστήματος του ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου για ένα επανδρωμένο πλοίο περιγράφεται στο Διάγραμμα 3 και αποτελείται από τον ηλεκτροκινητήρα η1, το Διαφορικό Δ, τρία συστήματα αντλιών, δύο switches που επιτρέπουν την εναλλαγή λειτουργίας από το σύστημα αντλίας 1 ή το σύστημα αντλίας 2 στο σύστημα αντλίας 3, τον διανομέα λαδιού Ψ και το σύστημα κυλίνδρων (K1,K2,K3,K4) και εμβόλων βυθίσεως (E1, E2). Ως input στο διάγραμμα έχουμε το σήμα που λαμβάνει ο η1 από τη γέφυρα ενώ ως output έχουμε την κίνηση του πηδαλίου, η οποία επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσης των μοχλοβραχιόνων με τα E1 και E2.



Διάγραμμα 3. *Internal Block Diagram συστήματος ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου σε επανδρωμένο πλοίο*

Η περιγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος αναφορικά με το redundancy πραγματοποιήθηκε στο άλλο δομικό διάγραμμα της SysML, το Block Definition Diagram χρησιμοποιώντας το Redundancy Profile. Ξεκινάμε με τη δήλωση των redundant στοιχείων και των switches στα blocks με τη βοήθεια των “stereotypes” που επέκτειναν το διάγραμμα της UML. Αναφέρουμε όλα τα εφεδρικά στοιχεία, το είδος τους και τα switch components. Στην συνέχεια, με τη βοήθεια των association blocks δηλώνουμε ότι δύο στοιχεία θεωρούνται μεταξύ τους εφεδρικά ορίζοντας παράλληλα το είδος εφεδρείας, το είδος sparing κλπ.. Επίσης, association blocks χρησιμοποιούνται για να δηλώσουμε την ανακατεύθυνση μεταξύ των εφεδρικών στοιχείων σε περίπτωση αστοχίας με τη βοήθεια των κλάσεων SwitchFrom και SwitchTo.



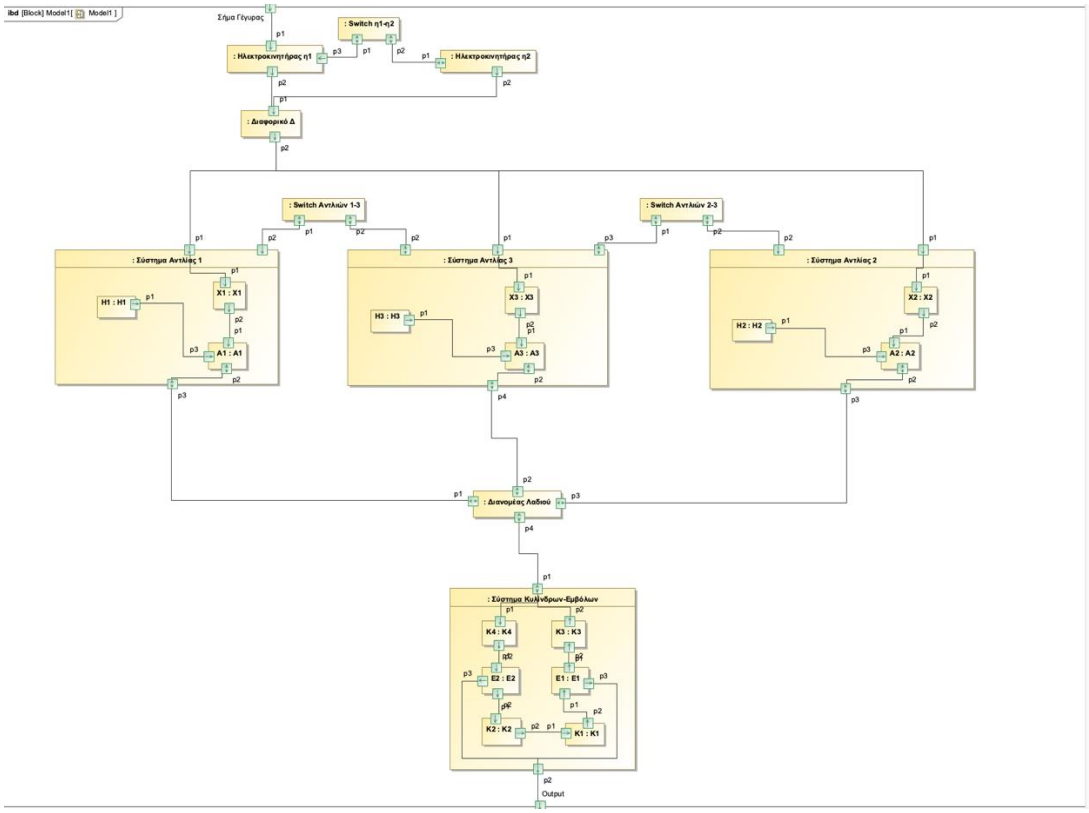
Διάγραμμα 4. *Block Definition Diagram συστήματος ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου με redundancy information σε επανδρωμένο πλοίο*

Στο παραπάνω διάγραμμα (Διάγραμμα 4) παρατηρούμε ότι υπάρχουν τρία συστήματα αντλιών. Όταν το πλοίο βρίσκεται σε συνθήκες ανοιχτής θάλασσας, σε λειτουργία είναι μόνο το ένα από αυτά ενώ τα άλλα δύο είναι εφεδρικά ως προς αυτό. Στην περίπτωση μας όμως, όπου εξετάζουμε την κατάσταση κατά την οποία το πλοίο απαιτείται να εκτελέσει λειτουργίες χειρισμών κατά την προσέγγιση σε κάποια πλωτή εξέδρα τότε έχουμε σε λειτουργία τόσο το σύστημα αντλίας 1 όσο και το σύστημα αντλίας 2, ενώ το σύστημα αντλίας 3 είναι το εφεδρικό στην περίπτωση που προκύψει αστοχία σε κάποιο από τα δύο πρώτα. Επομένως, μεταξύ των συστημάτων αντλίας 1 και 2 έχουμε active redundancy, ενώ το σύστημα αντλίας 3 είναι το standby redundant στοιχείο ως προς τα άλλα δύο. Η εναλλαγή αναμεσά στο σύστημα 3 και σε κάποιο από τα δύο άλλα σε περίπτωση αστοχίας γίνεται με τη βοήθεια δύο switches (Switch 1-3, Switch 2-3). Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος όπως αυτά φαίνονται στο Διάγραμμα 4, είναι non redundant.

Με βάση τώρα τον προτεινόμενο αλγόριθμο κατασκευής του DFT, ως ανεπιθύμητο γεγονός (top event) λαμβάνουμε την θύρα εξόδου του IBD, δηλαδή την «κίνηση του πηδαλίου». Τότε, εφαρμόζουμε μία εις βάθος πρώτη αναζήτηση στη δομή του συστήματος για να αναγνωρίσουμε τις εξωτερικές εισόδους, όπου στην περίπτωση μας υπάρχει μόνο μία και είναι το «σήμα από τη γέφυρα». Για την εξωτερική είσοδο αυτή, δημιουργείται ένα leaf event. Επίσης, τα στοιχεία που είναι non redundant αναπαρίστανται από leaf events. Η ομάδα των non redundant στοιχείων είναι: η1, Δ, switch 1-3, switch 2-3, Ψ, K1, K2, K3, K4, E1, E2. Αντίθετα, τα συστήματα αντλίας 1,2,3 είναι redundant μεταξύ τους και το είδος της εφεδρείας να είναι mixed με switch, όπου διακρίνουμε active redundancy για τα συστήματα

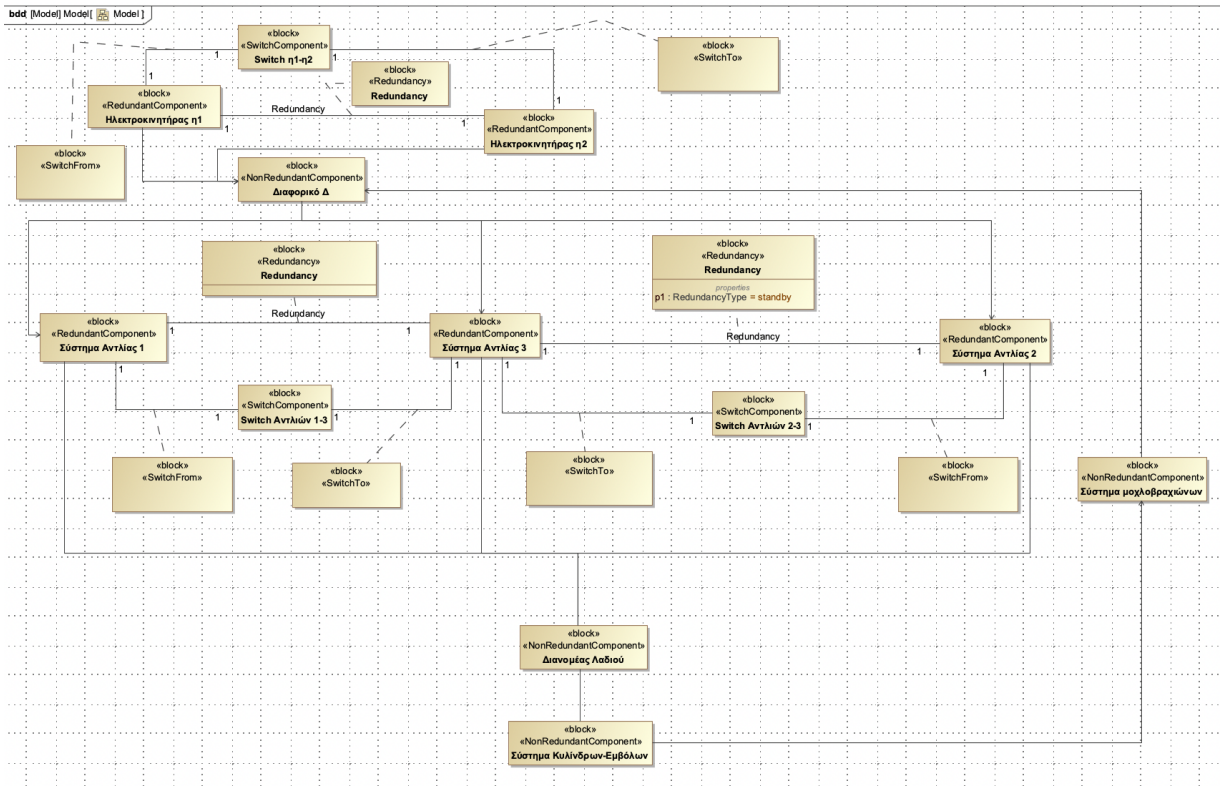
1 και 2 και standby για το 3 και switches 1-3 και 2-3. Επομένως, το παραγόμενο subtree για την ομάδα των RC είναι ένας συνδυασμός των δέντρων των εικόνων 16a και 16b. Έχοντας δημιουργήσει subtrees για την κάθε μία περίπτωση (EI, NRC, RC), παράγεται το τελικό DFT μέσω της συνένωσης αυτών.

Στην περίπτωση ενός αυτόνομου πλοίου τώρα ισχύουν ακριβώς τα ίδια ως προς τη δομή του συστήματος και το redundancy information με τη μόνη διαφορά ότι προστίθεται ένα ακόμη redundant στοιχείο. Αυτό είναι η εφεδρεία του ηλεκτροκινητήρα η1 που λαμβάνει το σήμα κίνησης από το οιακοστρόφιο της γέφυρας. Δηλαδή, στα αυτόνομα πλοία υπάρχει ένας ακόμα ηλεκτροκινητήρας (η2), ο οποίος παραμένει ανενεργός μέχρι να αστοχήσει ο πρώτος. Έτσι, το είδος του redundancy είναι standby και η εναλλαγή από τον η1 στον η2 γίνεται με το αντίστοιχο switch (switch η1-η2). Στο Διάγραμμα 5, διακρίνουμε την εσωτερική δομή του συστήματος που μελετάμε για ένα αυτόνομο πλοίο.



Διάγραμμα 5. *Internal Block Diagram συστήματος ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου σε αυτόνομο πλοίο*

Αντίστοιχα, στο Διάγραμμα 6 παρατηρούμε το BDD του ηλεκτροϋδραυλικού συστήματος πηδαλίου που μελετάμε για την περίπτωση αυτόνομου πλοίου, όπου έχουμε εισάγει τώρα των εφεδρικό ηλεκτροκινητήρα η2 και το στοιχείο switch που επιτρέπει την ανακατεύθυνση από τον η1 στον η2. Το top event παραμένει το ίδιο, όπως επίσης και το external input (σήμα γέφυρας). Έτσι, δημιουργείται ομοίως ένα leaf event για το E!. Για το set των NRC (Δ, switch η1-η2, switch 1-3, switch 2-3, Ψ, K1, K2, K3, K4, E1, E2) παράγονται επίσης leaf events. Για το subtree που παράγεται από τα redundant συστήματα αντλιών ισχύει ότι και στο μη αυτόνομο πλοίο. Για τους redundant ηλεκτροκινητήρες ορίσαμε ως standby το είδος της εφεδρείας με switch component για την εναλλαγή της λειτουργίας από τον η1 (primary) στον η2 (secondary). Το subtree που δημιουργείται σε αυτή την περίπτωση είναι όμοιο με της εικόνας 16b.



Διάγραμμα 6. *Block Definition Diagram συστήματος ηλεκτροϋδραυλικού πηδαλίου με redundancy information σε αυτόνομο πλοίο*

Το ολοκληρωμένο DFT προκύπτει όμοια από την συνένωση όλων τον subtrees των EI, NRC και RC.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Από την φύση τους, οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις αλληλοεπιδρούν με διάφορους τύπους πλοίων είτε αυτά απλά διέρχονται από την θαλάσσια ζώνη λειτουργίας τους είτε πλοία εξυπηρέτησης που έχουν άμεση σχέση με τη λειτουργία των πλωτών εξεδρών. Συγκεκριμένα, η υπεράκτια βιομηχανία πετρελαίου και αερίου απαιτεί συχνά υποστήριξη δια θαλάσσης για να εξασφαλίζεται η εύρυθμη και απρόσκοπτη λειτουργία της και επομένως, είναι απαραίτητο για τα offshore support vessels να προσεγγίζουν και να εκτελούν εργασίες σε αρκετά κοντινή απόσταση από τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Το μέγεθος, η δύναμη και το

εκτόπισμα των OSVs διαρκώς αυξάνονται και επίσης είναι πλέον φανερή η τάση για αυτονομία αρκετών λειτουργιών των πλοίων αυτών. Η μετάβαση στην ευρέως διαδεδομένη αυτόνομη ναυτιλία έχει να υποδείξει αρκετά σημαντικές καινοτομίες τα τελευταία χρόνια κυρίως με την κατασκευή σκαφών σε ερευνητικό στάδιο αλλά και των πρώτων πλοίων για εμπορική εκμετάλλευση, όμως έχει αρκετό δρόμο να διανύσει ακόμα.

Αυτό που δηλαδή κάποια χρόνια πριν έμοιαζε ουτοπικό, τώρα τείνει να γίνει πραγματικότητα. Η αυξημένη επικινδυνότητα σε ορισμένες εργασίες στη ναυτιλιακή βιομηχανία και ειδικότερα στη βιομηχανία υπεράκτιων εξορύξεων συνέβαλε αρνητικά στις όποιες προσπάθειες δημιουργούσαν πεδίο για αυτονομία στις θαλάσσιες μεταφορές και εργασίες. Ωστόσο, σημαντικά ατυχήματα που συνέβησαν κατά τη διάρκεια τέτοιων εργασιών τελικά έκαναν σαφές ότι ακριβώς η αυξημένη επικινδυνότητα αυτή είναι που επιβάλλει την είσοδο αυτόνομων πλοίων στις θαλάσσιες εργασίες. Ο πιο ουσιαστικός λόγος που ένα αυτόνομο πλοίο μπορεί να θεωρηθεί πιο ασφαλές από ένα επανδρωμένο είναι η εξάλειψη της ανθρώπινης παρουσίας πάνω στο πλοίο. Η πλειοψηφία των ατυχημάτων που συμβαίνουν μεταξύ μιας υπεράκτιας εξέδρας και ενός πλοίου εξυπηρέτησης είναι απόρροια ανθρώπινου λάθους.

Ένα πλοίο εξυπηρέτησης, όμως, περιέχει αρκετά κρίσιμα συστήματα των οποίων η ορθή λειτουργία είναι απαραίτητη ώστε να διασφαλίζεται η ομαλότητα στις εργασίες που εκτελεί. Δηλαδή εκτός του ανθρώπινου σφάλματος, πιθανή αστοχία σε κάποιο από τα κρίσιμα συστήματα αυτά μπορεί επίσης να προκαλέσει κάποιο ανεπιθύμητο γεγονός, όπως μια σύγκρουση πλατφόρμας – πλοίου εξυπηρέτησης. Φυσικά, κάτι τέτοιο μπορεί να είναι εξίσου επικίνδυνο να συμβεί τόσο σε ένα επανδρωμένο όσο και σε ένα αυτόνομο πλοίο και οι συνέπειες ενός θαλάσσιου ατυχήματος θα μπορούσαν να είναι καταστροφικές αν αναλογιστούμε και την αυξημένη επικινδυνότητα των υλικών (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) που εμπλέκονται στην υπεράκτια βιομηχανία εξόρυξης. Οι συνέπειες αυτές μπορεί να είναι μοιραίες για τον άνθρωπο (τραυματισμοί, απώλεια ζωής), το περιβάλλον (περιβαλλοντική μόλυνση) και την οικονομική δραστηριότητα των εμπλεκόμενων μερών (οικονομικές ζημίες). Ένα από τα πιο κύρια κρίσιμα συστήματα ενός πλοίου εξυπηρέτησης είναι το σύστημα πηδαλιούχησης, καθώς τα πλοία αυτά προσεγγίζουν στις πλωτές εξέδρες αρκετά συχνά και οποιαδήποτε αστοχία συμβεί στο σύστημα αυτό και συνεπώς στο πηδάλιο του πλοίου μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη απώλεια ελέγχου κατά τις διαδικασίες χειρισμών.

Ο σχεδιασμός επομένως των κρίσιμων συστημάτων με γνώμονα την τήρηση του πλήρους εύρους των απαιτήσεων τους με ένα βέλτιστο τρόπο αποτελεί τον λόγο ύπαρξης της Μηχανικής των Συστημάτων. Η μηχανική των συστημάτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάλυση ασφαλείας και την διαχείριση ρίσκου των κρίσιμων συστημάτων αυτών. Για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας των συστημάτων κατά τον σχεδιασμό όλα τα μηχανικά συστήματα θα πρέπει να διαθέτουν εφεδρείες (redundancy). Αν και μιλώντας για πραγματικές καταστάσεις, η προσθήκη ενός εφεδρικού στοιχείου σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα μπορεί να αυξάνει το κόστος κατασκευής, ωστόσο αν αναλογιστούμε τι ζημία μπορεί να αποφέρει μια πιθανή αστοχία ενός non-redundant συστήματος, θα καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι οι όποιες αμφιβολίες υπέρ των εφεδρειών κάμπτονται εύκολα. Η χρήση διάφορων εργαλείων μοντελοποίησης όπως πχ η SysML κατά την φάση του σχεδιασμού και διάφορων μεθόδων ανάλυσης ρίσκου που εκμεταλλεύονται τα παραγόμενα μοντέλα και τις πληροφορίες εφεδρειών όπως η ανάλυση δένδρων σφαλμάτων βοηθούν

τόσο τους σχεδιαστές όσο και τους ειδικούς ασφαλείας να προβούν στις απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις ανά πάσα στιγμή και να καταλήξουν στην κατασκευή του βέλτιστου παραγόμενου συστήματος.

Η κύρια συνεισφορά της εργασίας, εκτός της βιβλιογραφικής παρουσίασης, είναι να ασχοληθεί με την ενσωμάτωση μεταξύ των MBSE και MBSA ώστε να καλυφθεί το κενό ανάμεσά τους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της δημιουργίας ενός dynamic fault tree από τον προτεινόμενο αλγόριθμο και τον μοντέλο συστήματος προερχόμενο από την SysML. Ένα Redundancy Profile αναπτύχθηκε για την περιγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος παρέχοντας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες όπως το είδος εφεδρείας, το είδος των εφεδρικών στοιχείων και το είδος sparing. Ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη τη δομή του συστήματος και όλα τα δεδομένα σχετικά με το redundancy που έχουν ενσωματωθεί στα μοντέλα της SysML. Το παλινδρομικό ηλεκτροϋδραυλικό πηδάλιο με δύο έμβολα βυθίσεως, ένα σύστημα που χρησιμοποιείται ευρέως στις κατασκευές πλοίων σήμερα, χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό μέρος για την περιγραφή της εφαρμογής του αλγορίθμου.

Η δημιουργία του δυναμικού δένδρου σφαλμάτων θα βελτιώσει την συνοχή μεταξύ των μοντέλων δημιουργώντας μια σύνδεση ανάμεσα στο μοντέλο του συστήματος και των artifacts ασφαλείας. Η μελλοντική δουλειά πάνω στο συγκεκριμένο θέμα αφορά κυρίως την περαιτέρω βελτίωση της συνοχής ανάμεσα στα μοντέλα και στα artifacts ασφαλείας παρέχοντας τη δυνατότητα της δυναμικής ενημέρωσης του μοντέλου του συστήματος κάνοντας χρήση της ανάλυσης από το παραγόμενο DFT.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Offshore Drilling: History and Overview. (2010, June 25). Retrieved from Offshore Energy: https://www.offshore-energy.biz/offshore-drilling-history-and-overview/

PetroWiki. (2015, June 2). *History of offshore drilling units*. Retrieved from PetroWiki: https://petrowiki.spe.org/History_of_offshore_drilling_units

Schempf, F. J. (2004, January 1). *Special Anniversary - The history of offshore: developing the E&P infrastructure*. Retrieved from Offshore Magazine: https://www.offshore-mag.com/home/article/16756956/special-anniversary-the-history-of-offshore-developing-the-ep-infrastructure

Wikipedia. (2021, February 13). *Oil platform*. Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Oil_platform

Sadeghi, K. (2008). *Significant Guidance for Design and Construction of Marine and Offshore Structures .* Retrieved from Slideshare: https://www.slideshare.net/amirkabirsadeghi/jsas-004-077sadeghi

Offshore concrete structures. (2017, February). Retrieved from M2UKBLOG; A blog by a Civil Engineer: https://m2ukblog.wordpress.com/2017/02/09/types-of-offshore-concrete-structures-their-details-and-uses/

Eren, T. (2019, April). *Conversion of Surface Systems into Subsea Wellhead Systems.* Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/332513871_Conversion_of_Surface_Systems_into_Subsea_Wellhead_Systems

Drillship. (2020, December 17). Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Drillship

BureauVeritas. (2019, November 6). *Autonomous Future of Offshore Platforms*. Retrieved from Bureau Veritas: https://marine-offshore.bureauveritas.com/magazine/autonomous-future-offshore-platforms

Guzmán, J. M. (2019). *OFFSHORE SUPPORT VESSELS MARKET: Sales & purchase, and chartering strategies for PSV and AHTS: an evaluation of the influential factors.* Retrieved from World Maritime University Dissertations : https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=2123&context=all_dissertations

Wärtsilä. (2020). *Offshore Support Vessels (OSVs)*. Retrieved from Wärtsilä: https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/offshore-support-vessels-(osvs)

Chopra, K. (2019, October 13). *What are Offshore Vessels?* Retrieved from Marine Insight: https://www.marineinsight.com/types-of-ships/what-are-offshore-vessels/

Kaushik, M. (2019, November 8). *What are Platform Supply Vessels (PSVs)?* Retrieved from Marine Insight: https://www.marineinsight.com/types-of-ships/what-are-platform-supply-vessels-psvs/

Πεταρούδη, Μ. (2015). *Αυτόνομα Εμπορικά Πλοία: Εξέταση των κυριότερων πλεονεκτημάτων και των μεγαλύτερων προκλήσεων για τη Ναυτιλιακή Βιομηχανία.* Πειραιάς: Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς.

Komianos, A. (2018). *The Autonomous Shipping Era. Operational, Regulatory and Quality Challenges.* London, United Kingdom: TransNav.

IMO. (2014). *E-navigation*. Retrieved from Internation Maritime Organization: https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx

Rødseth, Ø. J., & Burmeister, H.-C. (2012). *Developments towards the unmanned ship.*

O' Brien, C., & Maxwell, H. (2018, September). *Autonomous Ships - What are the regulatory barriers to autonomous ships?* Retrieved from The Standard Club: https://www.standard-club.com/media/2767846/autonomous-ships.pdf

IMO. (2018, May 25). *Autonomous Shipping.* IMO. Retrieved from IMO takes first steps to address autonomous ships: https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/08-MSC-99-MASS-scoping.aspx

Mogens, B., Henriques, M., & Bang, J. (2017). *A pre-analysis on autonomous ships.* Denmark: Technical University of Denmark.

MUNIN. (2016). *MUNIN's Objectives & Impact*. Retrieved from Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks: http://www.unmanned-ship.org/munin/about/munins-objectives/

Jokioinen, E., Poikonen, J., Hyvonen, M., Kolu, A., Jokela, T., Tissari, J., . . . Makkonen, H. (2016). *Remote and Autonomous Ships. The next steps.* London: Rolls Royce.

AutonomousShipsHQ. (2017, November 16). *REVOLT*. Retrieved from https://www.autonomousshipshq.com/revolt/

KONGSBERG. (2017, October). *Autonomous Ship Project, Key Facts About Yara Birkeland*. Retrieved from Kongsberg Maritime: https://www.kongsberg.com/maritime/support/themes/autonomous-ship-project-key-facts-about-yara-birkeland/

Chambers, S. (2020, January 22). *EU funds two autonomous ship projects*. Retrieved from Splash247: https://splash247.com/eu-funds-two-autonomous-ship-projects/

Isalos. (2021, January 14). *Τεχνολογίες τηλεχειρισμού και αυτόνομης πλοήγησης σε πλοία*. Retrieved from Isalos.net: https://www.isalos.net/2021/01/technologies-tilecheirismou-kai-aftonomis-ploigisis-se-ploia/

Kampantais, N. (2016). *Seaworthiness in autonomous unamanned cargo ships.* Erasmus University Rotterdam.

Bhattacharjee, S. (2020, December 4). *What is Electronic Chart Display and Information System (ECDIS)?* Retrieved from Marine Insight: https://www.marineinsight.com/marine-navigation/what-is-electronic-chart-display-and-information-system-ecdis/

Νεοφύτου, Γ. (2020). *Τεχνολογία και Αυτόνομα Πλοία.* Χίος: Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Ovcina, J. (2020, November 27). *World's 1st zero-emission container vessel, Yara Birkeland, delivered*. Retrieved from Offhore Energy: https://www.offshore-energy.biz/worlds-1st-zero-emission-container-vessel-yara-birkeland-delivered/

Savvides, N., & Writer, S. (2019, June 6). *Revolution for inland shipping depends on the success of the Yara Birkeland*. Retrieved from Freight Waves: https://www.freightwaves.com/news/revolution-for-inland-shipping-depends-on-the-success-of-the-yara-birkeland

TheNavalArch. (2019, December 22). *Autonomous ships of the future*. Retrieved from TheNavalArch: https://thenavalarch.com/autonomous-ships-of-the-future/

MarineInsight. (2017, August 14). *World's First Autonomous Offshore Support Vessel Prototype Delivered*. Retrieved from Marine Insight: https://www.marineinsight.com/shipping-news/worlds-first-autonomous-offshore-support-vessel-prototype-delivered/

KONGSBERG. (2016, November 1). *AUTOMATED SHIPS LTD AND KONGSBERG TO BUILD FIRST UNMANNED AND FULLY AUTONOMOUS SHIP FOR OFFSHORE OPERATIONS*. Retrieved from KONGSBERG: https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2016/automated-ships-ltd-and-kongsberg-to-build-first-unmanned-and-fully-autonomous/

Slinn, T. (2017, October 25). *Offshore Support Goes Autonomous*. Retrieved from NauticExpo e-mag: http://emag.nauticexpo.com/offshore-support-goes-autonomous-2/

Lin, M. T. (2020, October 9). *Seaowl aims to pioneer unmanned offshore support vessels*. Retrieved from TradeWinds: https://www.tradewindsnews.com/technology/seaowl-aims-to-pioneer-unmanned-offshore-support-vessels/2-1-888444

Oltedal, H. (2012). *Ship-Platform Collisions in the North Sea.* Helsinki: The Annual European Safety and Reliability Conference (ESREL).

Pengfei, Z., Minghua, Z., Rajagopal, S., & Retouniotis, F. (2016). Research on Prevention of Ship Collisions with Oil Rigs. *Journal of Shipping and Ocean Engineering 6*, 279-283.

Mujeeb-Ahmed, M., & Paik, J. K. (2020). Quantitative collision risk assessment of a fixed-type offshore platform with an offshore supply vessel. *Structures, ELSEVIER*, 2139-2161.

Mujeeb-Ahmed, M., Seo, J. K., & Paik, J. K. (2018). Probabilistic approach for collision risk analysisof powered vessel with offshore platforms. *Ocean Engineering, ELSEVIER*, 206-221.

Kenny, J. (1988). *Protection of Offshore Installations Against Impact.* Middlesex: Department of Energy.

Oil&GasUK. (2018). *Emergency Response & Rescue Vessel Management Guidelines.* London: OIL & GAS UK.

Oil&GasUK. (2010). *Guidelines for Ship/Installation Collision Avoidance.* London: OIL & GAS UK.

Wingrove, M. (2020, October 28). *Fatalities reported after offshore vessel-platform collision*. Retrieved from Riviera: https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/two-die-in-offshore-vessel-platform-collision-61469

Ugurlu, Ö., Köse, E., Yildirim, U., Yuskekyildiz, & Ercan. (2013). Marine accident analysis for collision and grounding in oil tanker using FTA method. *Maritime Policy & Management*, 163-184.

Faulin, J., Juan, A. A., Martorell, S., & Ramírez-Márquez, J.-E. (2010). *Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems.* London: Springer.

Παναγιωτόπουλος, Φ.-Α.-Ν. (2015). *Μοντελοποίηση ατυχημάτων σύγκρουσης (collision) στις θαλάσσιες μεταφορές με χρήση της μεθόδου Bayesian Networks.* Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

ASEMS. (2016, December 8). *Fault Tree Analysis*. Retrieved from Acquisition Safety & Environmental Management System: https://www.asems.mod.uk/toolkit/fault-tree-analysis

HFW. (2021). *AUTONOMOUS SHIPS: DEVELOPMENTS CONTINUE APACE*. Retrieved from HFW: https://www.hfw.com/Autonomous-Ships-Developments-continue-apace-August-2021

Horne, R. (2021). *AUTONOMOUS AND REMOTELY OPERATED VESSELS: 2021 TO 2040.* Australia: MIAL FUTURE LEADERS WHITEPAPER.

Safety4Sea. (2018, July 6). *Emergency Procedures: Steering failure is more common than we think*. Retrieved from SAFETY4SEA: https://safety4sea.com/cm-emergency-procedures-steering-failure-is-more-common-than-we-think/

Δαγκίνης, Ι., & Γλύκας, Α. (2017). ΠΗΔΑΛΙΟ. Στο Ι. Δαγκίνης, & Α. Γλύκας, *ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΩΝ, Β΄ Έκδοση* (σσ. 297-332). Αθήνα: ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ.

Δανιήλ, Γ., & Μιμηκόπουλος, Κ. (2006). Πηδάλιο και Μηχανήματα Πηδαλίων. Στο Γ. Δανιήλ, & Κ. Μιμηκόπουλος, *ΒΟΗΘΗΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΩΝ* (σσ. 351-372). Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.

SAFETY4SEA. (2018, July 6). *Emergency Procedures: Steering failure is more common than we think*. Retrieved from SAFETY4SEA: https://safety4sea.com/cm-emergency-procedures-steering-failure-is-more-common-than-we-think/

Wankhede, A. (2021, November 9). *8 Common Problems Found In Steering Gear System Of Ships*. Retrieved from Marine Insight: https://www.marineinsight.com/tech/common-problems-steering-gear-system-of-ships/

Baklouti, A., Nguyen, N., Mhenni, F., Choley, J., Mlika, & Abdellfattah. (2020). Dynamic Fault Tree Generation for Safety-Critical Systems Within a Systems Engineering Approach. *IEEE Systems Journal*, 1512-1521.

Lai, K., Robert, T., Shindman, D., & Olechowski, A. (2021). *Integrating Safety Analysis into Model-Based Systems Engineering for Aircraft Systems: A Literature Review and Methodology Proposal.* INCOSE.

Hart, L. (2015). *ntroduction To Model-Based System Engineering (MBSE) and SysML.* Philadelphia, PA USA: INCOSE.

OMG. (2022). *WHAT IS SYSML®?* Retrieved from OMG SYSTEMS MODELING LANGUAGE: https://www.omgsysml.org/what-is-sysml.htm

Nguyen, N., Choley, J.-Y., & Mhenni, F. (2016, September). *Redundancy Handling with Model-Based Systems Engineering.* Retrieved from ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/319929670_Redundancy_Handling_with_Model-Based_Systems_Engineering