



ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΠΛΑΝΟΥ
ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΘΑΛΑΣΣΗΣ
ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ RBI

Τομέας: Μελέτης Πλοίου και Θαλασσιών Μεταφορών

Επιβλέπων: Νικόλαος Π. Βεντικός, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Όνομα Φοιτητή: Βασίλειος Δερμιτζάκης

Κωδικός Φοιτητή: NM13038

Αθήνα 2023

--- κενή σελίδα ---

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, Δρ. Νικόλαο Π. Βεντίκο, Αναπληρωτή Καθηγητή και Διευθυντή Τομέα Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Μεταφορών Ε.Μ.Π τόσο για την εμπιστοσύνη του όσο και για την ευκαιρία ανάληψης ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος.

Ταυτόχρονα, ευχαριστώ ιδιαίτερος τον Υ.Δρ. Ε.Μ.Π Σωτήραλη Παναγιώτη, για την καθοδήγηση, κατανόηση και επίβλεψη κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία ήταν καθοριστική για τη διεκπεραίωσή της.

Εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου σε όλο το διδακτικό προσωπικό της Σ.Ν.Μ.Μ. καθώς η ακεραιότητα, η αναλυτική σκέψη και οι μεθοδολογίες που μεταλαμπαδεύει, ξεχωρίζουν και αναδεικνύονται στο περιβάλλον εργασίας του μηχανικού.

Ευχαριστώ την οικογένειά μου και την κοπέλα μου για την αμέριστη υποστήριξη και υπομονή τους κατά την πραγμάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους συνεργάτες και τα στελέχη της ναυτιλιακής εταιρείας όπου εργάζομαι τα τελευταία τέσσερα χρόνια για τις γνώσεις που μοιράστηκαν μαζί μου καθώς και για την κατανόησή και στήριξή τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Κατάλογος Πινάκων	6
Κατάλογος Σχημάτων	7
Συνομεύσεις - Αρκτικόλεξα.....	10
Περίληψη.....	12
Abstract.....	14
1. Εισαγωγή.....	16
1.1 Πλαίσιο.....	16
1.2 Σκοπός και Στόχοι.....	18
1.3 Οριοθέτηση της εργασίας.....	18
1.4 Διάρθρωση της εργασίας.....	19
2. Βιβλιογραφική επισκόπηση	21
2.1 Επιθεώρηση και Συντήρηση με Γνώμονα το Ρίσκο - Risk Based Inspection (RBI) 21	
2.2 Δίκτυα Πίστεως - Bayesian Networks	23
2.3 Εφαρμογές στο Δίκτυο Κυκλοφορίας Θαλάσσης.....	24
3. Προσέγγιση Επιθεώρησης και Συντήρησης με γνώμονα το Ρίσκο	26
3.1 Εισαγωγή στην έννοια του ρίσκου.....	27
3.1.1 Ορισμός ρίσκου.....	27
3.1.2 Εισαγωγή στην έννοια της Αβεβαιότητας.....	29
3.1.3 Διαχείριση Ρίσκου - Ανάλυση και αντιμετώπιση	31
3.2 Επιθεώρηση και συντήρηση στη θαλάσσια βιομηχανία	36
3.2.1 Εισαγωγή.....	36
3.2.2 Επιθεώρηση και σχεδιασμός επιθεώρησης	36
3.2.3 Συντήρηση και σχεδιασμός συντήρησης	40
3.3 Επιθεώρηση και συντήρηση με γνώμονα τον Ρίσκο.....	43
3.3.1 Εισαγωγή στις μεθόδους Επιθεώρησης και Συντήρησης με γνώμονα το Ρίσκο (Risk Based Inspection – RBI)	43
3.3.2 Σύγκριση Επιθεώρησης και Συντήρησης με γνώμονα το Ρίσκο με προϋπάρχουσες προσεγγίσεις	46
4. Πιθανότητες και Δίκτυα Πίστεως στην ανάλυση Ρίσκου	48
4.1 Μαθηματικό υπόβαθρο	48
4.1.1 Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων	48
4.1.2 Βασικές έννοιες της θεωρίας πιθανοτήτων	49
4.1.3 Θεώρημα του Bayes.....	52
4.1.4 Κατανομή πιθανότητας	53
4.1.5 Γραφικά μοντέλα και Θεωρία γράφων.....	54
4.1.6 Υπό Συνθήκη Ανεξαρτησία (d-separation).....	57
4.2 Μπεϋζιανά Δίκτυα – Bayesian Networks	59
4.2.1 Εισαγωγή.....	59
4.2.2 Ένδειξη και Συμπερασμός στα Μπεϋζιανά Δίκτυα	61
4.2.3 Ορισμός Bayesian Networks.....	62
4.2.4 Κανόνας αλυσίδας για Bayesian Networks.....	63
4.2.5 Διάδοση πεποίθησης – Αλγόριθμοι Υπολογισμού.....	63
4.2.6 Αλγόριθμος Junction Tree.....	65

4.3	Δυναμικά Μπεϋζιανά Δίκτυα – DBN	69
4.3.1	Εισαγωγή.....	69
4.3.2	Στοχαστικά πεδία Markov - Hidden Markov Models.....	69
4.3.3	Δυναμικά Μπεϋζιανά Δίκτυα – DBN	70
4.3.4	Μετάβαση από τα Δένδρα Σφαλμάτων στα Δυναμικά Μπεϋζιανά Δίκτυα.....	71
4.3.5	Μέθοδοι προγραμματισμού BN.....	75
4.3.6	Χρησιμότητα και εφαρμογές στη μελέτη Ρίσκου	76
5.	Συστήματα ψύξης στη θαλάσσια βιομηχανία	77
5.1	Εισαγωγή – Επιλογή του υπό μελέτη συστήματος	77
5.2	Δίκτυα ψύξης πλοίων	83
5.2.1	Οριοθέτηση Μελέτης Δικτύων - Συστημάτων Ψύξης Πλοίων.....	83
5.2.2	Δίκτυο Ψύξης Γλυκού Νερού	83
5.2.3	Δίκτυο Ψύξης Θαλάσσης.....	86
5.2.4	Μηχανολογικά μέρη του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού και η λειτουργία τους.....	90
5.2.5	Αστοχίες συστήματος και επιπτώσεις.....	96
5.2.6	Επιθεώρηση και συντήρηση του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού – Πρακτικές πλοιοκτική και απαιτήσεις νηογνομόνων	101
6.	Μοντελοποίηση του συστήματος ψύξης.....	106
6.1.1	Ανάπτυξη Δένδρου Σφαλμάτων.....	106
6.1.2	Ανάπτυξη DBN συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.....	107
6.1.3	Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος.....	109
6.1.4	Μελέτη Αβεβαιότητας – Ατελής Συντήρηση.....	110
6.1.5	Προσέγγιση RBI.....	111
6.1.6	Επιπτώσεις – Αναδυόμενα κόστη συστήματος.....	112
7.	Αποτελέσματα.....	115
7.1	Πιθανότητα Αστοχίας Συστήματος.....	115
7.2	Ανάλυση Ρίσκου Συστήματος.....	129
8.	Συμπεράσματα και κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας	141
8.1	Συμπεράσματα	141
8.2	Προτάσεις περαιτέρω έρευνας.....	142
	Κατάλογος Αναφορών.....	143
9.	Παραρτήματα	150
9.1	Παράρτημα I – Πίνακες Δεσμευμένων Πιθανοτήτων.....	150
9.2	Παράρτημα II – Κόστη I&M και Επισκευών	157
9.3	Παράρτημα III – Επιβεβαίωση Μοντέλου – Εφαρμογή στο λογισμικό GeNIe – Παράδειγμα Υπολογισμών	158

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Ορισμοί βασικών εννοιών ρίσκου (Ventikos, 2012).....	32
Πίνακας 3.2 Σύγκριση των προσεγγίσεων με γνώμονα το ρίσκο σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους	46
Πίνακας 4.1 Δεσμευμένες πιθανότητες παραδείγματος διάδοσης πεποιθήσης σε συγκλίνουσα σύνδεση.....	64
Πίνακας 5.1 Κύρια Μηχανή και Υποσυστήματα - πιθανότητα αστοχίας	80
Πίνακας 5.2 FMEA Συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.....	97
Πίνακας 6.1 Ρυθμός Αστοχίας Εξοπλισμού/Μηχανημάτων υπό μελέτη συστήματος ψύξης... ..	110
Πίνακας 7.1 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας της Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.8.....	117
Πίνακας 7.2 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας I&M 0.6.....	118
Πίνακας 7.3 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας της Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.4.....	119
Πίνακας 7.4 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας της Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.2.....	120
Πίνακας 7.5 Πιθανότητα αστοχίας συστήματος ψύξης υπό διαφορετικές περιπτώσεις ενδείξεων αστοχίας των υπολοίπων κόμβων του συστήματος.....	128
Πίνακας 7.6 Κατάταξη αποδοτικότερων πλάνων I&M για κάθε βαθμό αποτελεσματικότητας I&M.....	136
Πίνακας 7.7 Ανάλυση ρίσκου συστήματος για κάθε προσέγγιση RBI και βαθμό αποτελεσματικότητας I&M	138
Πίνακας 7.8 Σύγκριση ρίσκου συστήματος για κάθε προσέγγιση RBI και βαθμό αποτελεσματικότητας I&M (Α) IM=0.8 (Β) IM=0.6 (Γ) IM=0.4 (Δ) IM=0.2.....	139
Πίνακας 9.1 Συμβολισμοί εξαρτημάτων μοντέλου – Κόμβοι Γονείς με πιθανότητα αστοχίας υπό την εκθετική κατανομή	150
Πίνακας 9.2 Πίνακας αποτύπωσης κατανομής πιθανοτήτων κόμβων γονέων που επηρεάζονται από το χρόνο	151
Πίνακας 9.3 Συμβολισμοί εξαρτημάτων μοντέλου – Κόμβοι Γονείς με πιθανότητα αστοχίας υπό την εκθετική κατανομή	151
Πίνακας 9.4 Πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων κόμβων που συμβολίζουν υποσυστήματα και συστήματα του υπό μελέτη μοντέλου.....	152
Πίνακας 9.5 Αναδυόμενα κόστη δικτύου και απαιτούμενοι χρόνοι για I&M ή επισκευές.....	157

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 3.1 Η διαδικασία υλοποίησης RBI (API, 2009).....	27
Σχήμα 3.2 Η Αβεβαιότητα συναρτήσει της πολυπλοκότητας των επιστημών και η οριοθέτηση της ανθρώπινων γνώσης για αυτές (Magruk, 2017)	30
Σχήμα 3.3 Βασική διεργασία διαχείρισης ρίσκου	31
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα γράφων (DAG)	34
Σχήμα 3.5 Τύποι Ατελούς Συντήρησης σύμφωνα με τη θεωρία του συντελεστή μείωσης	43
Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Δένδρου	51
Σχήμα 4.2 Συναρτήσεις μάζας πιθανότητας (α) και (β), συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (γ)	53
Σχήμα 4.3 Πιθανότητα προσδιοριζόμενη από την επιφάνεια κάτω από την $f(x)$	54
Σχήμα 4.4 Παραδείγματα Γράφων, κατευθυνόμενων και μη.....	54
Σχήμα 4.5 Κόμβος «βρόχος» γραφικού μοντέλου.....	55
Σχήμα 4.6 Αναπαράσταση κατευθυνόμενου κυκλικού (B) και μη κυκλικού (A) γράφου.....	56
Σχήμα 4.7 Αναπαράσταση BN (A), που μετατρέπεται σε μη τριγωνικό Moralized Graph(B) και σε τριγωνικό (Γ) μέσω της εισαγωγής επιπλέον ακμών	57
Σχήμα 4.8 Πιθανοί τρόποι σύνδεσης τριών κόμβων ενός DAG.....	58
Σχήμα 4.9 Δημοσιεύσεις που ενέχουν την μελέτη/εφαρμογή των DBN ανά χρόνο	60
Σχήμα 4.10 Τομείς επιστημών που έχουν εφαρμοστεί τα DBN.....	60
Σχήμα 4.11 Παράδειγμα από Γραφικά Μοντέλα (A) Κατευθυνόμενος κυκλικός Γράφος, (B) Κατευθυνόμενος μη κυκλικός Γράφος	61
Σχήμα 4.12 Γράφοι M-Moralized Graph, N- Δένδρο Κλίκα, P- Junction Tree	66
Σχήμα 4.13 Γραφικό μοντέλο M (κατευθυνόμενος μη κυκλικός γράφος-DAG).....	67
Σχήμα 4.14 Γραφικό μοντέλο M μετά τη διαδικασία Moralization (μη κατευθυνόμενος κυκλικός γράφος)	67
Σχήμα 4.15 Δοκιμή 1: Μετατροπή του αρχικού γράφου M σε Junction Tree	68
Σχήμα 4.16 Δοκιμή 2: Μετατροπή του αρχικού γράφου M σε Junction Tree	68
Σχήμα 4.17 Δοκιμή 3: Επιτυχής μετατροπή του αρχικού γράφου M σε Junction Tree	68
Σχήμα 4.18 Δοκιμή 3: Αποτύπωση των κοινών κόμβων-διόδων-της πληροφορίας μεταξύ των κλικών του Junction Tree.....	69
Σχήμα 4.19 Αναπαράσταση DBN σε πέντε χρονικά βήματα 0-1-2-3-4 για τρεις μεταβλητές A, B και C.....	70
Σχήμα 4.20 Αναπαράσταση αρχικού και μεταβατικού δικτύου	71
Σχήμα 4.21 Αλγόριθμος Μετάβασης FT- BN	72
Σχήμα 4.22 Διαδικασία Μετάβασης από FT σε DBN, παράδειγμα υπολογισμού πιθανότητας σβησίματος φλόγας για την καύση των αποβαλλόμενων προς την ατμόσφαιρα προϊόντων δύλισης.....	74
Σχήμα 5.1 Δίκτυο Κυκλοφορίας Θαλάσσης - ΕΜΠ 1975 (Ιωαννίδης, 2002).....	78
Σχήμα 5.2 Τυπική Διάταξη Δικτύων Ψύξεως μηχανοστασίου Σύγχρονων πλοίων (Δαγκίνη και Γλύκα, 2017).....	79
Σχήμα 5.3 Διάγραμμα επηρεασμού των δικτύων ψύξης θαλασσινού και γλυκού νερού.....	82
Σχήμα 5.4 MAN B&W S70MC-C8.2 IMO Tier II Project Guide Απλοποιημένο Διάγραμμα συστήματος Ψύξης Υψηλής Θερμοκρασίας.....	85
Σχήμα 5.5 MAN B&W S70MC-C8.2 IMO Tier II Project Guide Απλοποιημένο Διάγραμμα Συστήματος Ψύξης Χαμηλής Θερμοκρασίας.....	86

Σχήμα 5.6 Πρωταρχική τυπική διάταξη δικτύου ψύξης θαλάσσης (Κυρτάτος, Ναυτικοί κινητήρες Diesel, 1993).....	87
Σχήμα 5.7 Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες δικτύου ψύξης θαλάσσης πλοίου (Ν. Π. Κυρτάτος, 1993).....	89
Σχήμα 5.8 Τυπική Διάταξη συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.....	91
Σχήμα 5.9 Σκαρίφημα υποσυστήματος αναρρόφησης θαλάσσης(1)(2) και φωτογραφίες από τη διάταξη αναρροφήσεων υπερσύγχρονου πλοίου VLCC LSC(3) και HSC(4).....	92
Σχήμα 5.10 Ανόδια αναρροφήσεων θαλάσσης καινούρια και μετά από χρήση.....	93
Σχήμα 5.11 Σωληνώσεις θαλασσινού νερού πλοίου VLCC κατασκευής Κορέα 2022, κατά την επιθεώρηση του στρώμα πολυαιθυλενίου τους.....	94
Σχήμα 5.12 Τυπική σχεδίαση φυγόκεντρης αντλίας με μοτέρ και φωτογραφία συστήματος αντλιών ψύξης θαλασσινού νερού πλοίου VLCC κατασκευής Κορέα 2022.....	95
Σχήμα 5.13 Τυπική σχεδίαση εναλλάκτη θερμότητας με φύλλα και φωτογραφίες εναλλάκτη σε σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού πλοίου VLCC κατασκευής Κορέα 2022.....	95
Σχήμα 5.14 Φωτογραφίες φίλτρων, ανοδίων και επιστόμιου σωλήνωσης αναρροφήσεων θαλάσσης πριν και μετά το δεξαμενισμό δεξαμενοπλοίου δεκαετίας – Ναυπηγεία Νεωρίου, Σύρος 2023.....	103
Σχήμα 5.15 Φωτογραφίες σωληνώσεων και επιστομίου πριν και μετά το δεξαμενισμό δεξαμενοπλοίου δεκαετίας – Ναυπηγεία Νεωρίου, Σύρος 2023.....	104
Σχήμα 6.1 Ανάπτυξη Δένδρου Σφαλμάτων Συστήματος Ψύξης Θαλασσινού Νερού.....	106
Σχήμα 6.2 Ανάπτυξη Δυναμικού Μπεϋζιανού Δικτύου Συστήματος Ψύξης Θαλασσινού Νερού – Στατική αναπαράσταση ενός χρονικού βήματος.....	109
Σχήμα 7.1 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας I&M 0.8 για πλάνο I&M (α) 500 ωρών (β) 700 ωρών και (γ) συγκεντρωτικό για όλα τα πλάνα I&M...	116
Σχήμα 7.2 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.8.....	117
Σχήμα 7.3 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας I&M 0.6.....	118
Σχήμα 7.4 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.4.....	119
Σχήμα 7.5 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.2.....	120
Σχήμα 7.6 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης για το Πλάνο Επιθεώρησης και συντήρησης των 500 ωρών υπό διαφορετικού βαθμούς αποτελεσματικότητας I&M.....	121
Σχήμα 7.7 Πιθανότητα αστοχίας κόμβων Γονέων του κόμβου SWCS (Leaf Node).....	122
Σχήμα 7.8 Πιθανότητα αστοχίας Γονέων και Παιδιών Υποσυστημάτων-Συστημάτων Αντλιών-Εναλλακτών-Αναρροφήσεων-Σωληνώσεων Συστήματος.....	124
Σχήμα 7.9 Πιθανότητα αστοχίας Γονέων υπό την ένδειξη αστοχίας του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.....	125
Σχήμα 7.10 Πιθανότητα αστοχίας εξαρτημάτων αντλίας υπό την ένδειξη αστοχίας του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.....	126
Σχήμα 7.11 Πιθανότητα αστοχίας συστήματος ψύξης υπό διαφορετικές περιπτώσεις ενδείξεων αστοχίας των υπολοίπων κόμβων του συστήματος.....	127
Σχήμα 7.12 Παρατήρηση επιλεγμένων RBI για το (α) Ρίσκο συντήρησης και αστοχίας και (β) συνολικό Ρίσκο του συστήματος ψύξης.....	130

Σχήμα 7.13 Παρατήρηση RBI ως προς το (α) Ρίσκο συντήρησης και αστοχίας και (β) συνολικό Ρίσκο του συστήματος ψύξης.....	131
Σχήμα 7.14 Συνολικό Ρίσκο ανά προσέγγιση RBI για διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας I&M	134
Σχήμα 7.15 Συνολικό Ρίσκο προσέγγισης RBI των 500 ωρών για διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας I&M	135
Σχήμα 7.16 Ανάλυση ρίσκου συστήματος για κάθε προσέγγιση RBI και βαθμό αποτελεσματικότητας I&M	138
Σχήμα 9.1 Direct Acyclic Graph / Bayesian Network όπως απεικονίζεται στα αποτελέσματα της MATLAB.....	158
Σχήμα 9.2 DAG/BN όπως αναπτύχθηκε μέσω GeNIe	159
Σχήμα 9.3 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB(α) και GeNIe(β) για I&M 500 ωρών, 0.8 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 1200 ώρες λειτουργίας χωρίς πρότερη ένδειξη(evidence)	160
Σχήμα 9.4 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB(α) και GeNIe(β) για I&M 500 ωρών, 0.8 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 1200 ώρες λειτουργίας με ένδειξη πως μία αναρρόφηση θαλάσσης, μία αντλία και ένας εναλλάκτης έχουν αστοχήσει	161
Σχήμα 9.5 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB και GeNIe για I&M 300 ωρών, 0.6 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 2700 ώρες λειτουργίας χωρίς πρότερη ένδειξη(Evidence)	162
Σχήμα 9.6 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB και GeNIe για I&M 300 ωρών, 0.6 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 2700 ώρες λειτουργίας με ένδειξη πως η μία αναρρόφηση θαλάσσης λειτουργεί, ένας εναλλάκτης έχει αστοχήσει, τα μανόμετρα της αντλίας No. 3 έχουν χαλάσει και το μοτέρ της αντλίας No. 2 έχει αστοχήσει	164
Σχήμα 9.7 Παράδειγμα υπολογισμού στο σύστημα αναρροφήσεων θαλάσσης του υπό μελέτη δικτύου – Δένδρο Σφαλμάτων και Δυναμικό Μπεϋζιανό Δίκτυο	165
Σχήμα 9.8 Αποτελέσματα MATLAB P(SCsystem=failed) για t=1500 ώρες λειτουργίας.....	167
Σχήμα 9.9 Αποτελέσματα GeNIe P(SCsystem=failed) για t=1500 ώρες λειτουργίας	167

Συντομεύσεις - Αρκτικόλεξα

AGAN – As Good As New

ABAO – As Bad As Old

API – American Petroleum Institute

ASME - American Society of Mechanical Engineers

BBN – Bayesian Belief Networks

BN – Bayesian Networks

BNT – Bayes Net Toolbox

BV – Bureau Veritas

CBA – Cost Benefit Analysis

CBI – Condition Based Inspection

CBMA – Condition Based Maintenance Approach

CM – Corrective Maintenance

DAG – Directed Acyclic Graphs

DBN – Dynamic Bayesian Networks

DFT – Dynamic Fault Tree

FPSO – Floating Production Storage and Offloading facility

FT – Fault Tree

FTA – Fault Tree Analysis

FMEA – Failure Modes and Effects Analysis

FSA – Formal Safety Assessment

FWCS – Fresh Water Cooling System

GeNIe® – Graphical Network Interface

HAZOP – Hazard and Operability Studies

HSC – High Sea Chest

I&M – Inspection and Maintenance

IACS – International Association of Classification Societies

ILLC – International Load Line convention

IM – Imperfect Maintenance

IMO – International Maritime Organization

INCASS – Inspection Capabilities for Enhanced Ship Safety

IWS – In-water Survey

LR – Lloyds Register

LSC – Low Sea Chest

MATLAB® – Matrix Laboratory

RM – Preventive Maintenance

PMS – Planned Maintenance System

PSC – Port State Control

RBI – Risk Based Inspection

RCM – Reliability Centered Maintenance

RCO – Risk Control Options

SOLAS – Safety of Life at Sea

SWCS – Sea Water Cooling System

VFD – Variable Frequency Drive

VLCC – Very Large Crude oil Carrier

Περίληψη

Το κύριο έργο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η ανάλυση κατά την πάροδο του χρόνου του ρίσκου ενός μηχανολογικού συστήματος των σύγχρονων εμπορικών πλοίων, που εν τέλει αποσκοπεί στην αναγνώριση και ποσοτικοποίηση του ρίσκου του επιλεγμένου συστήματος, ώστε να επιλεγθεί το βέλτιστο μοτίβο επιθεώρησης και συντήρησής του. Ταυτόχρονα μελετάται η σχέση μεταξύ όλων των συνιστωσών του (μηχανικά μέρη-υποσυστήματα-συστήματα) και η επίδραση που αυτές έχουν στη αξιοπιστία των υποσυστημάτων του αλλά και φυσικά στην ολική αξιοπιστία του επιλεγμένου συστήματος. Καθ' αυτόν τον τρόπο αναγνωρίζονται τα πιο καίρια μέρη του ως προς την επίδραση που έχει η αποτελεσματική διαχείρισή τους στο ρίσκο του μηχανολογικού συστήματος.

Το σύστημα που επιλέχθηκε είναι το δίκτυο κυκλοφορίας θαλάσσης των σύγχρονων εμπορικών πλοίων λόγω της σημαντικότητάς του ως προς την άρτια λειτουργία των συστημάτων πρόωσης του πλοίου. Το ρίσκο που διέπει αυτό το σύστημα, είναι αξιοσημείωτο λόγω των συνεπειών που έχει η αστοχία του στην λειτουργία του πιο καίριου μέρους των μηχανολογικών συστημάτων ενός πλοίου, της κύριας μηχανής του. Η αστοχία του και η μη ορθή λειτουργία αυτού του συστήματος, σημαίνει παύση των εμπορικών δραστηριοτήτων του πλοίου και σημαντικότερα ακόμα συντελεί στην διακινδύνευση της ανθρώπινης ζωής και του περιβάλλοντος μιας και η απώλεια πρόωσης συνδράμει στη δυνατότητα ελιγμών του πλοίου, η οποία είναι καίρια ειδικά υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες και δυναμικά περιβάλλοντα που ενέχουν πολυάριθμους κινδύνους.

Τα παραπάνω αποτελέσματα, λαμβάνονται μέσω της μοντελοποίησης των πιθανών αστοχιών του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB μέσω του εργαλείου του Bayes Net Toolbox (BNT) το οποίο είναι διαθέσιμο για την μοντελοποίηση συστημάτων μέσω χρήσης των Μπεϋζιανών Δικτύων (Bayesian Networks-BN) και της επέκτασης αυτών, των Δυναμικών Μπεϋζιανών Δικτύων (Dynamic Bayesian Networks-DBN). Η προσέγγιση της παρούσας εργασίας μέσω ενός DBN αποτελεί έναν τρόπο επέκτασης των BN μέσω της μελέτης τους στην πάροδο του χρόνου. Η επιλογή της μεθοδολογίας αυτής έγινε καθώς αποτελεί έναν αξιόπιστο τρόπο ανάλυσης ενός μηχανολογικού συστήματος, των στοιχείων του αλλά και των σχέσεων μεταξύ τους. Τα DBN μπορούν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων που αποσκοπούν στην ανάλυση της αξιοπιστίας τους και στη συνέχεια μέσω της αναγνώρισης των κινδύνων που τα διέπουν, στην εξαγωγή του ρίσκου ενός συστήματος κατά την πάροδο του χρόνου. Αποτελούν ένα σημαντικό μέσον προσομοίωσης της φυσικής γήρανσης ενός μηχανολογικού συστήματος.

Για την ακριβέστερη και πιο ρεαλιστική ανάλυση ρίσκου, εφαρμόζονται διαφορετικές περιόδους επιθεώρησης και συντήρησης για διάφορα επίπεδα της πιθανής αποτελεσματικότητάς τους ώστε να επιλεγθεί η βέλτιστη ως προς τη διαχείριση και ελάττωση του ρίσκου του επιλεγμένου συστήματος. Η χρήση της ανάλυσης του ρίσκου ως μέσω διάρθρωσης του πλάνου επιθεωρήσεων και επισκευών στα μηχανολογικά εξαρτήματα, αναπτύχθηκε κυρίως μεταξύ των οργανισμών που ασχολούνται με την ανάπτυξη τέτοιων μοντέλων, μέσω του American Petroleum Institute (API) και των επιθεωρήσεων βάση ρίσκου μεθοδολογιών της. Καθ' αυτόν τον τρόπο παρουσιάζεται μέθοδος διαχείρισης του ρίσκου μέσω της παρακολούθησης της

γήρανσης του συστήματος, επιθεώρησης και συντήρησης των υποσυστημάτων του ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Abstract

The goal of subject diploma thesis is the dynamic analysis of the reliability of an important risk-wise mechanical system of modern commercial vessels, which ultimately aims to identify and quantify the risks of the selected system, in order to choose the optimal pattern of inspection and maintenance of it accordingly. At the same time, the relationship between all its components (mechanical parts - subsystems - systems) is quantified and further studied in order to recognize the effect they have on the reliability of its subsystems and on the overall reliability of the system as a whole. In such manner, its most critical parts are recognized in terms of the effect that their proper management has on the total reliability and risk of the selected system.

The machinery chosen is a vessel's seawater cooling system due to its importance in the operation of a vessel's propulsion systems. The risk inherent in this system is significant due to the consequences its failure has on the operation of the most critical part of a ship's mechanical systems, its main engine. Its failure and the improper operation of this system means the suspension of the commercial activities of that vessel and the ship owning company, and more importantly contributes to endangering the human life of the workers-sailors and the environment since the loss of propulsion can contribute to the loss of its stability in adverse weather conditions.

The aforementioned results are obtained by modeling the possible failures of the seawater cooling system in MATLAB through the Bayes Net Toolbox (BNT) which is available for modeling systems through the use of Bayesian Belief Networks and thereafter via a Dynamic Bayesian Network (DBN). This methodology is a reliable approach to analyzing a mechanical system, its elements and the relationships between them. BNs can assist in the development of dynamic models that aim to analyze a system's reliability over its lifetime. Additionally, through the identification of all underlying risks over time, derives the total risk of the selected system. Dynamic BN are an important means of simulating the natural aging of a mechanical system. DBNs also help to identify the dependencies between each subsystem and therefore to identify which contribute the most to the total risk of a mechanical system.

For the most accurate and realistic risk analysis, inspection and maintenance plans are applied in order to select the best inspection and maintenance plan in reducing the risk of the selected system. Further reliability analysis is carried out to showcase the impact of proper/improper inspection and maintenance can have on the overall risk of the sea water cooling system of a vessel. The use of risk analysis as a means of devising the inspection and repair plan for mechanical components has been developed more significantly through the American Petroleum Institute(API) and its Risk Based Inspection(RBI) methodologies. In such a manner, a risk management method is presented by monitoring the aging of the system and inspecting/repairing its subsystems at regular intervals.

--- κενή σελίδα ---

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο

Το ρίσκο που χαρακτηρίζει ένα μηχανολογικό σύστημα, η εύστοχη αναγνώριση και ποσοτικοποίησή του, αποτελούν το κλειδί για την αποδοτική και αποτελεσματική υλοποίηση ενός πλάνου επιθεώρησης και συντήρησης για κάθε διαχειριστή του. Η εύρυθμη λειτουργία ενός μηχανολογικού συστήματος μέσω της αποτίμησης του συνολικού ρίσκου που αυτό φέρει, αποτελεί κύρια πηγή ενδιαφέροντος μελετητών, οργανισμών και εταιριών.

Στη ναυτιλία, το ρίσκο λαμβάνεται υπόψη σε κάθε στάδιο της προμελέτης, κατασκευής και αργότερα διαχείρισης όλων των πλοίων. Ο σχεδιασμός τους είναι τέτοιος ώστε να επιτυγχάνεται μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα η μεταφορά ωφέλιμου φορτίου από το ένα μέρος του πλανήτη στο άλλο. Η λειτουργία τους καθ' όλη την διάρκεια της ζωής τους, διέπεται από κανονισμούς με γνώμονα την περιβαλλοντική ακεραιότητα και σημαντικότερα, την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής (Σπύρου, 2017). Οι πλοιοκτήτριες εταιρίες, έχουν ως στόχο το κέρδος μέσω της επιτυχούς λειτουργίας του στόλου τους και σχεδιάζουν αλλά και παρακολουθούν/ελέγχουν τα πλοία ώστε να διασφαλίζεται η τήρηση όλων των απαραίτητων απαιτήσεων και κριτηρίων που τίθενται από τους αρμόδιους φορείς και αρχές. Για την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων και προϋποθέσεων λειτουργίας είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται έλεγχος όλων των συστημάτων ενός πλοίου για εντοπισμό φθορών και σχεδιασμός και λήψη προληπτικών και διορθωτικών ενεργειών συντήρησης. Στην πράξη, η κύρια πρακτική ελέγχου της εύρυθμης λειτουργίας των μηχανολογικών συστημάτων ενός πλοίου, είναι η πραγματοποίηση επιθεωρήσεων και στη συνέχεια, των συντηρήσεων των συστημάτων του.

Ο σχεδιασμός επιθεωρήσεων ασχολείται με τον εντοπισμό των στοιχείων προς επιθεώρηση, τον καθορισμό του τύπου και τρόπου με τον οποίο γίνονται οι επιθεωρήσεις και της συχνότητάς τους. Στη θαλάσσια βιομηχανία παρατηρείται αύξηση των ερευνών τα τελευταία χρόνια ως προς την ανάπτυξη δομημένων και λεπτομερών μοντέλων επιθεωρήσεων και συντηρήσεων με βάση το ρίσκο από πανεπιστήμια και ερευνητές (Ventikos et al., 2018) όσο και από νηογνώμονες (LR, 2017), (BV, 2017), (BV, 2019). Ως αποτέλεσμα της ερευνητικής προσπάθειας προέκυψε η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για την προστασία της ανθρώπινης ζωής, του περιβάλλοντος και της εύρυθμης λειτουργίας των πλοίων. Αυτό επιτυγχάνεται με την βελτιστοποίηση διαδικασιών, εργαλείων και τεχνικών επιθεώρησης και συντήρησης, που στόχο έχουν την πρόληψη, ανάλυση και αποφυγή καταστροφικών ατυχημάτων αλλά και του αντίστοιχου κόστους (χρηματικό και μη) που τα συνοδεύει.

Μια ρεαλιστική και εύληπτη προσέγγιση στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης αυτής, εντός του συγκεκριμένου ερευνητικού χώρου, θα μπορούσε να υιοθετηθεί και από εταιρείες ή οργανισμούς που διαχειρίζονται έμβια και άβια όντα στη θαλάσσια βιομηχανία. Η ναυτιλία δεν επιδέχεται συχνά αλλαγές στις καθιερωμένες διαδικασίες που είναι ευρέως αποδεκτό πως διαβιβάζουν την λειτουργία μηχανημάτων με αποδεκτό ρίσκο. Συχνά το οικονομικό ρίσκο είναι υψηλό όταν υιοθετούνται νέα εργαλεία και μέθοδοι επιθεώρησης και συντήρησης στα πλοία. Η ανάπτυξη μοντέλων που συνδυάζουν πρωτοπόμενες τεχνικές μοντελοποίησης (DBN-machine learning) που ταυτόχρονα βασίζονται σε δεδομένα βιβλιογραφίας αλλά και εμπειρικά στοιχεία που αντλούνται εκ των ανθρώπων της ναυτιλίας, θα μπορούσε να γίνει αποδεκτή από

τους νηογνώμονες, τις σημαίες και τις πλοιοκτήτριες εταιρείες και τους ναυτιλιακούς οργανισμούς παγκοσμίως και να εφαρμοστεί στην πράξη. Μια τέτοια προσέγγιση προσπαθεί να επιτύχει η παρούσα διπλωματική εργασία μέσω της επιθεώρησης και συντήρησης με γνώμονα το Ρίσκο. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση και διαχείριση του ρίσκου του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα που διέπει ένα μηχανολογικό σύστημα και πιο συγκεκριμένα το δίκτυο κυκλοφορίας θαλάσσης των πλοίων. Η αβεβαιότητα χαρακτηρίζει το ρυθμό γήρανσης και τις διαδικασίες φθοράς που επιδέχονται τα διάφορα μηχανολογικά συστήματα και εγκαταστάσεις ενός σύγχρονου πλοίου. Ως αποτέλεσμα, η περιγραφή, μοντελοποίηση και ανάλυσή τους μέσω πιθανοθεωρητικών όρων ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στην πραγματικότητα των συστημάτων αυτών.

Η κεντρική υπόθεση που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη του βέλτιστου RBI πλάνου, είναι ότι πάντοτε υπάρχει μια καθορισμένη πιθανότητα φθοράς, βλάβης ή δυσλειτουργίας για κάθε στοιχείο, σύστημα ή υποσύστημα μιας μηχανολογικής εγκατάστασης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, η οποία αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες συνέπειες. Τέτοιες συνέπειες είναι η απώλεια ζωής ή/και η αύξηση των εξόδων που αφορούν τόσο το ίδιο το τμήμα αυτό της εγκατάστασης όσο και το σύνολο της εγκατάστασης αυτής καθ' αυτής. Ο συνδυασμός της πιθανότητας αυτής και των συνεπειών της είναι το ρίσκο που χαρακτηρίζει μία μηχανολογική εγκατάσταση.

Η προσέγγιση RBI στοχεύει στην ανάλυση και αντιμετώπιση του ρίσκου τόσο για το κάθε στοιχείο της εγκατάστασης όσο και για την εγκατάσταση ως σύνολο. Αυτό επιτυγχάνεται με την υλοποίηση ενός δυναμικού μοντέλου (χρονικά μεταβαλλόμενου), και πιο συγκεκριμένα ενός Δυναμικού Μπεϋζιανού Δικτύου. Αυτό αποτελεί την δυναμική ανάπτυξη ενός Μπεϋζιανού Δικτύου - Δικτύου Πίστεως - Belief Network - Bayesian Network - BN. Τα δίκτυα πίστεως αποτελούν πιθανοθεωρητικές γραφικές αναπαραστάσεις ενός συστήματος. Αυτό τα καθιστά ως ένα ελκυστικό μοντέλο αναπαράστασης σύνθετων και μη συστημάτων, σε κάθε τομέα της επιστήμης καθώς η πληροφορίες που αντλούνται από αυτά είναι εμφανείς και εύληπτες από ερευνητές και μη εξοικειωμένους χρήστες της πιθανοθεωρητικής ανάλυσης.

Ο συνδυασμός της προσέγγισης RBI και ενός DBN στην παρούσα διπλωματική εργασία, εφαρμόζεται για το σύστημα ψύξης σε δεξαμενόπλοια, και συγκεκριμένα για το δίκτυο της κυκλοφορίας θαλάσσης. Κίνητρο για τη σχετική εφαρμογή αποτελεί το γεγονός ότι πιθανές αστοχίες ή δυσλειτουργίες του συστήματος ψύξης ενός πλοίου αποτελούν ένα σημαντικό κίνδυνο για τη λειτουργία των πλοίων, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον αριθμό των αστοχιών, όσο και το κόστος τους.

Η εφαρμογή της εν λόγω μεθοδολογίας σε ένα μηχανολογικό σύστημα αποτελεί πρόκληση ως εγχείρημα, καθώς δεν αναπτύσσονται συχνά σχετικές μοντελοποιήσεις για σύνθετες μηχανολογικές εγκαταστάσεις και πιο ειδικά για τα δίκτυα κυκλοφορίας θαλάσσης. Η έρευνα επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός μοντέλου πρόβλεψης της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος αλλά και των υποσυστημάτων του καθώς και ταυτόχρονα της ανάδειξης των σχέσεων μεταξύ τους κατά την πάροδο του χρόνου και την βαρύτητα του καθενός ως προς την ολική αξιοπιστία του συστήματος ψύξης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση RBI με γνώμονα τον ρίσκο, σε συνδυασμό με τον τρόπο μοντελοποίησης της μέσω DBN, καθώς και τα αποτελέσματα της, αποτελούν καινοτομία μιας και δεν έχει επιχειρηθεί η καθ' αυτόν τον τρόπο η ποσοτικοποίηση του ρίσκου για αυτό το σύστημα του πλοίου μέχρι στιγμής.

1.2 Σκοπός και Στόχοι

Ο βασικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας, είναι η προσαρμογή και η εφαρμογή της μεθόδου προσέγγισης Risk Based Inspection & Maintenance (RBI) μέσω Bayesian Networks στη θαλάσσια βιομηχανία ώστε να ελαχιστοποιηθεί το ολικό ρίσκου όπως αυτό διαμορφώνεται στο δίκτυο θαλάσσης των πλοίων.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της υλοποίησης των ακόλουθων στόχων:

1. Επισκόπηση της βιβλιογραφίας στα επιστημονικά πεδία της διαχείρισης ρίσκου και ειδικότερα του προσέγγισης της επιθεώρησης και συντήρησης με γνώμονα το ρίσκο (RBI), της θεωρίας πιθανοτήτων και των Μπεϋζιανών δικτύων (BN).
2. Ανάλυση του συστήματος του δικτύου κυκλοφορίας θαλασσινού νερού με τη μελέτη σχεδίων πλοίων ναυτιλιακής εταιρείας, δηλαδή μελέτη πραγματικών περιπτώσεων, με την υιοθέτηση των κατάλληλων παραδοχών. Η ανάλυση του συστήματος βασίζεται στη συλλογή και ανάλυση βιβλιογραφίας, εγγραφών στο σύστημα προγραμματισμού της επιθεώρησης και συντήρησης των πλοίων της εταιρείας Planned Maintenance System (PMS) και συνεντεύξεων με έμπειρους επαγγελματίες και στελέχη της ναυτιλίας (Expert Elicitation).
3. Ανάπτυξη ενός μοντέλου RBI με εφαρμογή DBN για το δίκτυο κυκλοφορίας θαλάσσης ενός πλοίου μέσω του προγραμματιστικού περιβάλλοντος της MATLAB και επικύρωση των αποτελεσμάτων του λογισμικού GeNIe. Αρχικά στάδια είναι η υλοποίηση δένδρου σφαλμάτων (Fault Tree - FT) για την αναγνώριση των εξαρτήσεων μεταξύ των υποσυστημάτων του μοντέλου και των πιθανών αστοχιών τους και εκτέλεση μεθοδολογίας μέσω της οποίας γίνεται μετάβαση από FT → BN → DBN.
4. Πραγμάτωση ενός κώδικα που αποσκοπεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε, ως προς τα κάτωθι:
 - ✓ Την αποδοτικότερη προσέγγιση του RBI μέσω DBN και της μεθοδολογίας ανάλυσης ρίσκου ώστε αυτό να ελαχιστοποιείται κατά το βέλτιστο τρόπο
 - ✓ Τη σημαντικότητα της αποτελεσματικότητας του RBI μέσω ανάλυσης των αποτελεσμάτων του μοντέλου υπό συνθήκες μη τέλει συντήρησης (Imperfect Maintenance – IM)
 - ✓ Την αναγνώριση των καίριων συστημάτων και υποσυστημάτων του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης μέσω της ανάλυσης των BN που αποτελεί σημαντικό βήμα στην ανάλυση ρίσκου ενός συστήματος
 - ✓ Την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων συστημάτων/υποσυστημάτων για την ανάλυση και αναγνώριση των σχέσεων μεταξύ όλων των μηχανημάτων στο σύστημα του δικτύου κυκλοφορίας ενός πλοίου

1.3 Οριοθέτηση της εργασίας

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στην υλοποίηση ενός προγραμματιστικού περιβάλλοντος που θα αποσκοπεί στην ανάλυση μηχανολογικού συστήματος για την ανάδειξη της βέλτιστης επιθεώρησης και συντήρησής του μέσω της ελαχιστοποίησης του ρίσκου αυτού.

Αυτό επιτυγχάνεται αποκλειστικά μέσω προσέγγισης RBI και ανάπτυξης ενός DBN, χωρίς την εφαρμογή άλλης μεθόδου ανάλυσης ρίσκου ή άλλης προσέγγισης επιθεώρησης και συντήρησης.

Επιλέχθηκε το σύστημα του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης σε εμπορικά πλοία και πιο συγκεκριμένα του μέρους του που χρησιμοποιείται για την ψύξη του δικτύου ψύξης γλυκού νερού. Βασίζεται σε πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα που συλλέχθηκαν μέσω βιβλιογραφίας, εγγράφων ναυτιλιακής εταιρίας και συνεντεύξεων με στελέχη της και με πρώτους μηχανικούς του στόλου της.

1.4 Διάρθρωση της εργασίας

Η δομή της παρούσας εργασίας, σύμφωνα με την κεφαλαιοποίηση που ακολουθήθηκε, συνοψίζεται παρακάτω.

Στο 2^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με το σύνολο του αντικειμένου της παρούσας εργασίας. Οι προσεγγίσεις με γνώμονα το ρίσκο, τα Μπεϋζιανά Δίκτυα καθώς και οι πιθανοθεωρητικές εφαρμογές, καθώς και οι έρευνες πάνω στο επιλεχθέν σύστημα συζητούνται μέσω σχετικής βιβλιογραφίας.

Στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση των προσεγγίσεων με βάση το ρίσκο και τους τρόπους εφαρμογής τους στη θαλάσσια βιομηχανία. Συζητείται η βασική έννοια του ρίσκου μαζί με τις προσεγγίσεις RBI, ενώ γίνεται ανάλυση των πιο διαδεδομένων μεθόδων συντήρησης και επιθεώρησης.

Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται επισκόπηση της θεωρίας των πιθανοτήτων και κατ' επέκταση των Μπεϋζιανών Δικτύων, που αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο για την ανάπτυξη και υλοποίηση του μοντέλου Δυναμικού Μπεϋζιανού Δικτύου στη συνέχεια της εργασίας. Γίνεται αναφορά σε εργαλεία των μελετητών για την εκτίμηση πιθανοτήτων πολύπλοκων συστημάτων σε περιβάλλον αβεβαιότητας. Αναλύεται ο συνδυασμός της κλασσικής θεωρίας πιθανοτήτων κατά Μπέϋζ και της θεωρίας των γραφικών μοντέλων και πιο συγκεκριμένα των κατευθυνόμενων μη κυκλικών γράφων - Directed Acyclic Graphs (DAG), αντλώντας πλεονεκτήματα και δυνατότητες και από τους δύο χώρους κατά την εφαρμογή τους.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των συστημάτων ψύξης, ειδικά των δικτύων κυκλοφορίας θαλάσσης και των τμημάτων τους καθώς και των ενδεχόμενων φθορών τους. Επιπρόσθετα, παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με τις μεθόδους και τεχνικές επιθεώρησης και συντήρησης για το συγκεκριμένο σύστημα, όπως αυτά προέκυψαν από την ανάλυση των πρωτογενών και δευτερογενών δεδομένων που συλλέχθηκαν μέσω ναυτιλιακής εταιρείας και σχετικής βιβλιογραφίας.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία. Αρχικά, η βασική ιδέα και τα στοιχεία του μοντέλου συζητούνται εκτενώς. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η προτεινόμενη δομή του μοντέλου και ορίζονται οι μέθοδοι ποσοτικοποίησης, μαζί με την ανάλυση κόστους. Έπειτα, ορίζονται οι προδιαγραφές του μοντέλου και γίνονται οι απαραίτητες υποθέσεις της εργασίας. Ακολουθεί ανάλυση των δεδομένων. Περαιτέρω, ορίζονται οι προδιαγραφές των υπό μελέτη πλάνων επιθεωρήσεων.

Στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κώδικα σύμφωνα με τα υπό μελέτη πλάνα επιθεωρήσεων και συντηρήσεων και τους διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας της επιθεώρησης και συντήρησης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ρίσκο του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης για τα διάφορα πλάνα επιθεώρησης και συντήρησης και γίνεται η αξιολόγησή τους. Τέλος παρουσιάζονται για διάφορες καταστάσεις των στοιχείων του συστήματος, το ρίσκο που φέρει ανά περίπτωση και η σχέση μεταξύ των υποσυστημάτων του συστήματος κυκλοφορίας θαλασσινού νερού.

Στο 8^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, η εξαγωγή συμπερασμάτων και η παρουσίαση προτάσεων περαιτέρω έρευνας.

Στη συνέχεια παρατίθεται η βιβλιογραφία της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ακολουθούν τρία παραρτήματα.

Στο Παράρτημα I γίνεται παρουσίαση των πινάκων πιθανοτήτων υπό όρους, του ανεπτυγμένου μοντέλου.

Στο Παράρτημα II γίνεται παρουσίαση της προσέγγισης του αναδυόμενου κόστους συντήρησης, επισκευής και πλήρους αστοχίας του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης βάση πρωτογενή στοιχεία που συλλέχθηκαν από ναυτιλιακή εταιρεία.

Στο Παράρτημα III επισυνάπτονται παραδείγματα υπολογισμών του κώδικα σε MATLAB και στο λογισμικό GeNIe και γίνεται σύγκριση τους για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του ανεπτυγμένου μοντέλου.

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Επιθεώρηση και Συντήρηση με Γνώμονα το Ρίσκο - Risk Based Inspection (RBI)

Μία πιθανή αστοχία της γάστρας ή μηχανολογικού συστήματος, μπορεί να οδηγήσει σε τραυματισμό ή απώλεια ζωής, καταστροφή και μόλυνση του περιβάλλοντος, και σε σημαντική ζημία του πλοιοκτήτη. Η διαχείριση ρίσκου στην ναυτιλία αποτελεί επιτακτική ανάγκη της σύγχρονης εποχής, μιας και οι αλλαγές που η συγκεκριμένη βιομηχανία επιδέχεται, προέρχονται κατά κύριο λόγο από αποφάσεις που σχετίζονται με την διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής μέσω του αδιάκοπου εκσυγχρονισμού της σχεδίασης και των διαδικασιών/εξοπλισμού ασφαλείας των πλοίων (SOLAS, 2020), και της προστασίας του περιβάλλοντος μέσω ανάπτυξης ολοένα και πιο πολύπλοκων συστημάτων που μειώνουν ατμοσφαιρικούς και θαλάσσιους ρύπους (IMO, 2021).

Πρωταρχικές προσεγγίσεις στην μεθοδολογία RBI προήλθαν από την Αμερικανική ένωση μηχανολόγων μηχανικών-(ASME-American Society of Mechanical Engineers) (ASME, 1991). Ο API ωστόσο με αφετηρία τις μεθοδολογίες της ASME, ανέπτυξε τις πλέον διαδεδομένες μεθοδολογίες της ανάλυσης προδιαγραφών και προαπαιτούμενων για την εφαρμογή της RBI σε μία επιχείρηση μέσω των *API-580 Risk Based Inspection* και *API-581 Risk Based Inspection Methodology* (API, 2009), για το πώς να αναπτυχθεί ένα μοντέλο RBI και πώς αυτό πρέπει να εφαρμόζεται αντίστοιχα. Η σχεδίαση της συντήρησης και επιθεώρησης μέσω της ανάλυσης ρίσκου ενός συστήματος αποτελεί πλέον μία καθιερωμένη μεθοδολογία διαχείρισης ρίσκου, που υιοθετείται μέσω σύγχρονων ερευνών και στην ναυτιλιακή βιομηχανία, που όμως έχει αναπτυχθεί πρωταρχικά στις βιομηχανίες μεταποίησης, δηλαδή σε εγκαταστάσεις για την επεξεργασία χημικών/πετροχημικών, εγκαταστάσεις διύλισης, επεξεργασίας και αποθήκευσης πετρελαίου και παραγώγων του (Dey, 2001). Στην προαναφερθείσα έρευνα, μελετάται η βελτιστοποίηση των περιόδων επιθεώρησης και συντήρησης αγωγού πετρελαίου μέσω της ανάλυσης και αξιολόγησης ρίσκου. Τις τελευταίες δεκαετίες έγιναν σημαντικά βήματα στην ανάλυση και εφαρμογή των μεθοδολογιών RBI μέσω αρχικά των ερευνών που επικεντρώνονταν στην ανάλυση αξιοπιστίας εγκαταστάσεων μετά την ανάπτυξη βέλτιστων μοντέλων συντήρησης (Khan and Haddara, 2004), όπου αναπτύχθηκε μεθοδολογία RBI για την ελαχιστοποίηση ρίσκου σε μονάδα παραγωγής προϊόντων αιθυλενίου. Ολοκληρωμένη μετάβαση στις μεθοδολογίες RBI και RBI όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί σήμερα, αποτέλεσαν έρευνες που συνδυάζουν την ανάλυση αξιοπιστίας και τα προϊόντα μιας πιθανής αστοχίας συστήματος (Krishnasamy et al., 2005). Μέσω της μοντελοποίησης μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλυσης και ποσοτικοποίησης του ρίσκου μετά από αστοχία συστήματος, αναπτύσσεται μέσω της RBI πλάνο συντηρήσεων που αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας των επιμέρους συστημάτων και στην ελάττωση του ρίσκου σε αποδεκτά για την επιχείρηση επίπεδα. Σημαντικά βήματα στην εισαγωγή της μεθοδολογίας RBI έγιναν και σε υψηλού ρίσκου τομείς όπως η πυρηνική ενέργεια, (You et al., 2006), όπου αναπτύχθηκε μοντέλο εκτίμησης αξιοπιστίας, όπου σε συνδυασμό με εκτίμηση των κινδύνων, βελτιστοποιήθηκε η συχνότητα των επιθεωρήσεων για την ελαχιστοποίηση του ρίσκου της εγκατάστασης. Στα τέλη του 2000 αναπτύχθηκαν έρευνες που μέσω της ομαδοποίησης των πρότερων δημοσιεύσεων πάνω στην RBI, προχώρησαν σε πιο ακριβείς μετρήσεις και μεθοδικές εφαρμογές τους. Η εφαρμογή μεθοδολογιών RBI, η ανάλυση και αξιολόγηση ρίσκου μέσω την άντληση ιστορικών στοιχείων και μέσω συνεντεύξεων ειδικών

της βιομηχανίας μεταποίησης, οδήγησε σε ανάπτυξη μοντέλου επιθεωρήσεων και συντηρήσεων με βάση το ρίσκο σε μονάδα διύλισης πετρελαίου (Bertolini et al., 2009). Ομάδα ειδικών της βιομηχανίας, ακαδημαϊκοί και στελέχη, οργανισμοί ποιοτικού ελέγχου, συνεργάστηκαν ώστε να διαμορφώσουν ένα βέλτιστο πλάνο επιθεωρήσεων και συντήρησης με βάση το ρίσκο προς την ανθρώπινη ζωή, το περιβάλλον, την οικονομική κατάσταση και την φήμη της εταιρείας. Τα αποτελέσματα της προσέγγισης αυτής συνέβαλαν σε ένα βέλτιστο μοντέλο διαχείρισης των συντηρήσεων του διυλιστηρίου με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση των κερδών του. Μία ακόμη σημαντική έρευνα έγινε από τον Det Norske Veritas (DNV), που συντέλεσε στην ανάπτυξη ενός μοντέλου ελαχιστοποίησης του ρίσκου μέσω RBI μεθοδολογίας και μαθηματικών μοντέλων που αναπτύσσονται από το API σε εγκατάσταση δεξαμενών για αποθήκευση προϊόντων της βιομηχανίας μεταποίησης. Χρησιμοποιούνται μέθοδοι ανάλυσης και διαχείρισης ρίσκου μέσω των υπολογισμών του κόστους κάθε πιθανού σεναρίου αστοχίας και της πιθανότητάς του να πραγματοποιηθεί. Βελτιστοποιεί μέσω της κλασικής θεωρίας ρίσκου, την αξιοπιστία του συστήματος επιλέγοντας τα βέλτιστα χρονικά διαστήματα ανά επιθεώρηση (Topalis et al, 2012).

Ταυτόχρονα, βήματα για την εφαρμογή της RBI εκτελέστηκαν και στη ναυτιλία, με πρωταρχικές προσεγγίσεις των νηογνώμωνων όπως του ABS (Conachey et al., 2008), που παρουσιάστηκαν οι δυνατοί τρόποι προσέγγισης RBI στη ναυτιλία και τα βήματα που πρέπει να εκτελέσει ένας οργανισμός για την εφαρμογή της. Ακολούθησαν έρευνες που έθεσαν τα πλαίσια για την πραγματική εφαρμογή των μεθοδολογιών ειδικά την τελευταία δεκαετία. Ακόμα ισχυροί και ευρέως γνωστοί νηογνώμονες έχουν αναπτύξει κατευθυντήριες γραμμές προς τη σωστή εφαρμογή των μεθόδων RBI, όπως ο Νορβηγικός νηογνώμονας Det Norske Veritas (DNV, 2015) με την ανάλυση πιθανοθεωρητικών μεθόδων για την ανάπτυξη βέλτιστου πλάνου επιθεώρησης δικτυωμάτων/εγκαταστάσεων στήριξης πλωτών κατασκευών και μονάδων αποθήκευσης, μεταποίησης και διανομής πετρελαίου (Floating Production Storage and Offloading facility - FPSO). Ο γαλλικός νηογνώμονας αναπτύσσει μεθοδολογίες ελέγχου και συντήρησης πλωτών κατασκευών βάση της RBI, ώστε αυτές να είναι αξιόπιστες και άρα υποψήφιες για την ένταξή τους στην κλάση (BV, 2011), (BV, 2019). Κατά τον ίδιο τρόπο ο βρετανικός και ο αμερικάνικος νηογνώμονας αναπτύσσουν μεθοδολογίες εφαρμογής της RBI στις πλωτές κατασκευές (LR, 2017), (ABS, 2018). Πιο στοχευμένες προς τα πλοία μελέτες ακολούθησαν για την εύρεση βέλτιστου πλάνου επιθεώρησης και συντήρησης δεξαμενών έρματος δεξαμενοπλοίων (Gul et al., 2017) και σε μοντέλο μέσης τομής VLCC που υπόκειται σε διατμητικές και καμπτικές τάσεις και διάβρωση (Dong et al., 2015) όπου διαφορετικές κατανομές περιγραφής πιθανότητας αστοχίας και πιθανοθεωρητικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για την απόρριξη του ολικού ρίσκου που φέρου διαφορετικοί χρονικοί προγραμματισμοί συντήρησης και επιθεώρησης της μέσης τομής. Σημαντική μελέτη αποτελεί και η ανάπτυξη μεθοδολογίας μέσω του προγράμματος INCASS-Inspection Capabilities for Enhanced Ship Safety (Lazakis et al., 2016). Υλοποιείται μοντέλο της κύριας μηχανής και των υποσυστημάτων της, αποδίδονται πιθανότητες αστοχίας σε αυτά και μέσω ανάπτυξης BN και αναθεώρησης του μέσω των παραμέτρων της συντήρησης και γήρανσης σε κάθε χρονικό βήμα, υπολογίζεται η πιθανότητα αστοχίας της κύριας μηχανής. Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε μοντέλο της γήρανσης της γάστρας πλοίου στην πάροδο του χρόνου, που αποσκοπεί στον υπολογισμό του βέλτιστου πλάνου επιθεώρησης της υπό το πρίσμα της εξέλιξης των πιθανών κινδύνων και του κόστους που φέρει η επιθεώρηση της (Ventikos et al., 2018). Σημαντική έρευνα εκτελέστηκε και στο σύστημα λίπανσης ναυτικού κινητήρα, όπου επιλέχθηκε μέσω της αναγνώρισης και ποσοτικοποίησης των πιθανών κινδύνων, το βέλτιστο χρονικό πλαίσιο για την ανάλυση λαδιών και άρα επιθεώρηση του συστήματος. Αυτό επετεύχθη με

καινοτόμα εκτίμηση του ρίσκου του συστήματος μέσω DBN, αποσκοπώντας έτσι σε μία πραγματικού χρόνου και ρεαλιστικών συνθηκών ανάλυση αξιοπιστίας μηχανολογικού συστήματος με σύγχρονη υπολογιστική μέθοδο (Ventikos et al., 2022).

2.2 Δίκτυα Πίστεως - Bayesian Networks

Η μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων για την εύληπτη απεικόνισή τους σε μελετητές, επιτυγχάνεται μέσω των δικτύων πίστεως ή αλλιώς Bayesian Belief Networks-BBN ή Bayesian Networks-BN. Συχνά γίνεται χρήση τους για την ανάλυση ενός συστήματος και διάγνωση των πιο επικίνδυνων στοιχείων του μέσα από την απεικόνιση της σχέσης που αυτά έχουν μεταξύ τους στην ορθή λειτουργία του συστήματος. Η χρήση των Dynamic Bayesian Networks (DBN) γίνεται για την πρόβλεψη όλων των παραπάνω σε ένα δυναμικό σύστημα, εξαρτώμενο απ' τον χρόνο, και χρησιμοποιείται συχνά για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μοντέλων στην πάροδο του χρόνου στην μηχανική, πληροφορική, ιατρική, φαρμακευτική κ.ά.

Οι πρώτες αναφορές βρίσκονται απ' τις αρχές του 1990 όπου έγιναν οι πρώτες προσπάθειες για την πρόβλεψη δυναμικών μοντέλων όπως η εξέλιξη των πωλήσεων της αμερικανικής αυτοκινητοβιομηχανίας στην Ιαπωνία (Dagum et al., 1992). Στατικές αναπαραστάσεις της αγοράς μέσα σε έντονο περιβάλλον αβεβαιότητας, δέχονταν ανανέωση μετά από κάθε χρονικό κόμβο, μέσω της εισαγωγής νέας πληροφορίας η οποία αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα. Καθ' αυτόν τον τρόπο το μοντέλο αυτό μπορούσε να προβλέψει μετά τα πρώτα χρονικά βήματα με καλύτερη ακρίβεια την κίνηση της αγοράς και εντάσσεται σε μία από τις πρώτες τεχνικές ανάπτυξης των αρχών λειτουργίας του τομέα της τεχνητής νοημοσύνης.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990, τα Bayesian Networks τράβηξαν μεγάλη προσοχή ως πλαίσιο για την οικοδόμηση πραγματικών και πολύπλοκων συστημάτων, όχι μόνο σε ερευνητικά ιδρύματα αλλά και στη βιομηχανία. Για την μελέτη και χρήση τους, απαιτείται αρκετή θεωρητική γνώση καθώς και πρακτική εμπειρία προκειμένου να αξιοποιηθούν οι ευκαιρίες που παρέχονται από τα BN και τα γραφήματα αποφάσεων που συντελούν στην εύληπτη απεικόνισή τους (Jensen and Nielsen, 2007). Χρήση των BN σε βιομηχανικό, αυτοματοποιημένο σύστημα μεταφοράς και αποθήκευσης παλετών, γίνεται ώστε να απεικονιστεί η υπολειπόμενη ζωή του συστήματος μετά από διάφορα χρονικά βήματα (Medjaher et al., 2009). Γίνεται η διαλογή διαθέσιμων στοιχείων του συστήματος, αναγνωρίζονται τα κύρια μέρη του και οι σχέσεις μεταξύ τους ώστε να κατασκευαστεί το DBN, και τέλος χρησιμοποιείται αλγόριθμος που προσδίδει πιθανότητα αστοχιών των υποσυστημάτων και του ολικού συστήματος σε κάθε χρονικό κόμβο. Ταυτόχρονα γίνεται και η μελέτη του συστήματος σε περίπτωση περιοδικής συντήρησης και επίσης ανανέωσης των ευπαθών εξαρτημάτων και καίριου εξοπλισμού του, όπως ακολουθήθηκε και στην παρούσα μελέτη. Τα BN μπορούν να περιγράψουν την σχέση αλληλένδετων υποσυστημάτων είτε αυτές είναι ασθενείς είτε ισχυρές, χαρακτηριστικά, σε έρευνα έγινε η εφαρμογή τους για την λήψη αποφάσεων ακόμα και στην μελέτη και τρόπο που θα εφαρμοστεί μοτίβο αναδάσωσης περιοχής (Ordonez et al., 2009). Ορίζονται σαν μεταβλητές που επηρεάζουν την βέλτιστη αναδάσωση περιοχής, η εδαφική χλωρίδα και πανίδα, οι συνθήκες του περιβάλλοντος, η κλίση του εδάφους κ.ά. Μέσω της μελέτης των μεταβλητών και της βαρύτητας που έχουν στην ικανότητα ανάπτυξης νέας χλωρίδας, δημιουργήθηκε μαθηματικό μοντέλο BN που προδιαγράφει τις πιο φιλόξενες και πλούσιες περιοχές για την αναδάσωση της επιλεγμένης περιοχής. Επιπροσθέτως, χρήση των DBN ξεκίνησε και στον τομέα της ιατρικής.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα που αποτυπώνει την βοήθεια που προσδίδουν στην πρόβλεψη των ασθενειών, είναι η χρήση DBN για την πρόβλεψη λοίμωξης του αναπνευστικού συστήματος ασθενών σε μονάδα εντατικής θεραπείας (Charitos et al., 2009). Μέσω του καθορισμού των αρχικών πιθανοτήτων των αιτιών μιας ασθένειας από ιστορικά στοιχεία και ειδικών της ιατρικής, ως προς την εξέλιξή τους στην πάροδο του χρόνου, προσεγγίζεται η αποτύπωση του προβλήματος αναγνώρισης μίας λοίμωξης που μέχρι εκείνη την περίοδο είχε περιγραφεί μόνο με στατικά μοντέλα. Η μελέτη ασθενειών μπορεί να γίνει καθ' αυτό τον τρόπο με αναλυτικά μαθηματικά μοντέλα που δίνουν στον ιατρό απευθείας μία πρώτη ανάλυση του ιστορικού του ασθενή καθώς αυτά αντλούν πληροφορίες από την αρχή της εκδήλωσης συμπτωμάτων του.

Την τελευταία δεκαετία, οι έρευνες στα BN και τις επεκτάσεις τους χαίρουν ιδιαίτερης εφαρμογής στη θαλάσσια βιομηχανία. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφ. 2.1, εφαρμογές με ταυτόχρονη χρήση RBI και BN αναπτύσσονται για την ποσοτικοποίηση και αντιμετώπιση του ρίσκου που ενέχει η γήρανση της γάστρας του πλοίου και οι μηχανολογικές εγκαταστάσεις του. Ταυτόχρονα, έρευνες στο κομμάτι της ασφάλειας εκτελούνται μέσω των BN (Li et al., 2018) όπου ποσοτικοποιείται το ρίσκο που φέρει η συντήρηση ενός πλοίου που τηρούνται υψηλά επίπεδα επίβλεψης και συντήρησης και άρα είναι σε καλή κατάσταση, σε σχέση με το ρίσκο που ενέχουν τα κατώτερης κατάστασης πλοία, αποδίδοντας ως λιγότερο επικίνδυνη επιλογή της πιο έντονης συντήρησης παρά του κόστους που έχει, ώστε να είναι λιγότερο το ρίσκο ως προς την ασφάλεια του πλοίου. Τα δεδομένα που καλείται να αντλήσουν οι ερευνητές συχνά προέρχονται από ειδικούς της βιομηχανίας και λόγω της έντονης χρήσης των BN στη ναυτιλία, έρευνες εκτελούνται στην δόμηση διαδικασιών και τρόπου εκμείωσης πρωτογενών δεδομένων (Zhang and Thai, 2016). Ο ανθρώπινος παράγοντας και η επιπτώσεις που έχει σε πιθανά ατυχήματα συγκρούσεων πλοίων διερευνάται και ποσοτικοποιείται η επίδρασή του σε αυτά μέσω BN και της μεθοδολογίας και δεδομένων της FSA (Sotiralis et al., 2016). Σημαντικές μελέτες με τη σύμπραξη πολλών φορέων εκτελούνται μέσω των BN ως προς την ασφάλεια και τους τρόπους δράσης σε περίπτωση ατυχήματος (Ventikos et al., 2023) λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες ενός ατυχήματος και τις συνθήκες που επικρατούν σε μεγάλα επιβατηγά πλοία, στοχεύοντας μεταξύ άλλων στην ορθότερη λήψη αποφάσεων υπό αυτές τις συνθήκες.

2.3 Εφαρμογές στο Δίκτυο Κυκλοφορίας Θαλάσσης

Έρευνες έχουν εκτελεστεί που μελετούν ή που συμπεριλαμβάνουν στην μελέτη τους δίκτυο κυκλοφορίας θαλάσσης στα εμπορικά πλοία χωρίς ωστόσο να αποτελούν συχνά το μοναδικό υπό μελέτη σύστημα σε έρευνες της διεθνούς βιβλιογραφίας, με έμμεση αναφορά σε αυτό (Chybowski et al., 2019). Η μελέτη των αστοχιών των εμπορικών πλοίων κατά τη διάρκεια των πρώτων χρόνων λειτουργίας του (infant years) αναδεικνύει πιθανές αστοχίες εξοπλισμού, εκ των οποίων και των αντλιών θαλάσσης του συστήματος ψύξης μελετώντας αίτια πιθανών αστοχιών τους. Η γήρανσης που προκαλεί η χρήση του θαλασσινού νερού ως μέσου ψύξης σε όλα τα μηχανήματα ενός δικτύου αποτελούσε αντικείμενο μελέτης εδώ και δεκαετίες. Πιθανοί κίνδυνοι και τρόποι καταπολέμησής του τόσο στη φάση σχεδίασης του όσο και στη λειτουργία του, παρουσιάζονται για την ενίσχυση της αξιοπιστίας του δικτύου ψύξης (Pugh et al., 2005). Στοχευμένες έρευνες έχουν γίνει ωστόσο στο θέμα της ρύπανσης των εναλλακτών και καταπολέμησής της μέσω διαφορετικών μεθοδολογιών όπως η εισαγωγή διαλύματος χλωρίνης στο σύστημα των σωληνώσεων του εναλλάκτη θερμότητας του δικτύου θαλασσινού νερού πλοίων (Rubio et al., 2015) και μέσω εφαρμογής πλαισίου περιοδικής συντήρησης και

επιθεώρησης της κατάστασής τους ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος που προκύπτει από την μείωση της ενεργειακής απόδοσής τους λόγω της φυσικής ρύπανσης και γήρανσης στην οποία υπόκεινται στο θαλάσσιο περιβάλλον (Ezgi and Ozbalta, 2012). Ταυτόχρονα, η ενεργειακή απόδοση των αντλιών του συστήματος ψύξης μελετάται και γίνονται πολυάριθμες έρευνες για τα οικονομικά και ενεργειακά οφέλη μέσω της βελτιστοποίησης της λειτουργίας τους ανάλογα της ανάγκες του δικτύου σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή (Su et al., 2014). Συχνά μελετάται μέσω της εγκατάστασης μηχανισμών αυτόματης ρύθμισης του φορτίου των μοτέρ των αντλιών ή VFD – Variable Frequency Drive και ποσοτικοποίησης της ενεργειακής απόδοσής τους κατά τη λειτουργία των πλοίων (Lee et al., 2011), (Qi et al., 2016). Επίσης έρευνα ενεργειακής βελτιστοποίησης, πέραν των VFD έγινε και με την εισαγωγή επιστομίων που ρυθμίζουν την ποσότητα κυκλοφορίας αυτόματα αναλόγως τη θερμοκρασία του γλυκού νερού στο σύστημα ψύξης της κύριας μηχανής (Theotokatos et al., 2016). Η σημαντικότητα της εύρυθμης λειτουργίας του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης αναγνωρίζεται και έρευνες διεκπεραιώνονται την τελευταία εξαιτία για την αύξηση της αξιοπιστίας του ώστε να επιτευχθεί βήμα προς την αυτονομία των πλοίων χωρίς πλήρωμα για τη διαχείρισή τους. Σημαντική έρευνα που αποτέλεσε και βάση μεταγενεστέρων ερευνών στον τομέα μελέτης της αυτοματοποίησης στα πλοία, είχε ως στόχο την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης και παρουσίασης εναλλακτικού σχεδιασμού τους που αποσκοπεί στην ελάττωση της πιθανότητας αστοχίας του (Allal et al., 2017), (Allal et al., 2020). Πραγματώθηκε ενδελεχής έρευνα μέσω συλλογής στοιχείων από 115 πλοία και πολυάριθμες ναυτιλιακές εταιρείες, συνεντεύξεις με επαγγελματίες της ναυτιλίας και εγγραφές στα συστήματα PMS και ημερολόγια πλοίων για τη βέλτιστη δυνατή συλλογή από ακριβή στοιχεία. Λόγω του κινδύνου που ενέχει ως προς το σύστημα πρόωσης του πλοίου, μελετήθηκε το ρίσκο που φέρει η πιθανή ρύπανση και φραγή των κιβωτίων αναρροφήσεων θαλάσσης του δικτύου κυκλοφορίας μέσω προσομοιωτή μηχανοστασίου (Kongsberg-ERS), FMEA και ειδικών της ναυτιλίας (Ceylan et al., 2022). Τα αποτελέσματά της, έδειξαν πως αστοχία του δικτύου οδηγεί σε απώλεια ισχύος και άρα ικανότητας ελιγμών, που μπορεί να οδηγήσει έμμεσα σε προσάραξη, σύγκρουση, πλημμύρισμα μηχανοστασίου, έκρηξη ή πυρκαγιά. Επίσης, πρωτοπόρα έρευνα είχε ως στόχο την πρόβλεψη των παραμέτρων του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης όπως πίεση και θερμοκρασία, που προσεγγίζεται μέσω υπολογιστικών μοντέλων θεωρίας του χάους και νευρωνικών δικτύων, αποτελώντας ένα ακόμα βήμα προς την αυτοματοποίηση της λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος (Wei et al., 2022).

Έρευνες που έχουν ως στόχο την βέλτιστη επιθεώρηση και συντήρηση του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης και ειδικότερα του μέρους του που χρησιμοποιείται για την ψύξη των υπόλοιπων συστημάτων του πλοίου μέσω της εφαρμογής μεθοδολογιών RBI και ανάπτυξης BN δεν απαντώνται στη βιβλιογραφία, και η ανάγκη για την αποτίμηση μιας προσέγγισης τους ή και αξιολόγησης της υπάρχουσας αποτελεί τη βάση για μία καινοτόμα έρευνα σε αυτά, η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3. Προσέγγιση Επιθεώρησης και Συντήρησης με γνώμονα το Ρίσκο

Η αυξανόμενη ανάγκη για προγνωστικές προσεγγίσεις, με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και τη μείωση του συνολικού κόστους, έχει οδηγήσει σε αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος όσον αφορά στις μεθόδους σχεδιασμού επιθεώρησης και συντήρησης για εγκαταστάσεις και συστήματα. Αιτία αυτού του ενδιαφέροντος είναι ότι οι συγκεκριμένες μέθοδοι φαίνεται να αξιοποιούν επιτυχώς ιστορικά δεδομένα και ποσοτικοποιημένη τεχνική εμπειρία για τον ελάττωση της πιθανότητας αστοχίας των μηχανημάτων ενός συστήματος αλλά και την αντιμετώπιση των πιθανών κινδύνων γενικότερα (Ventikos et al., 2022).

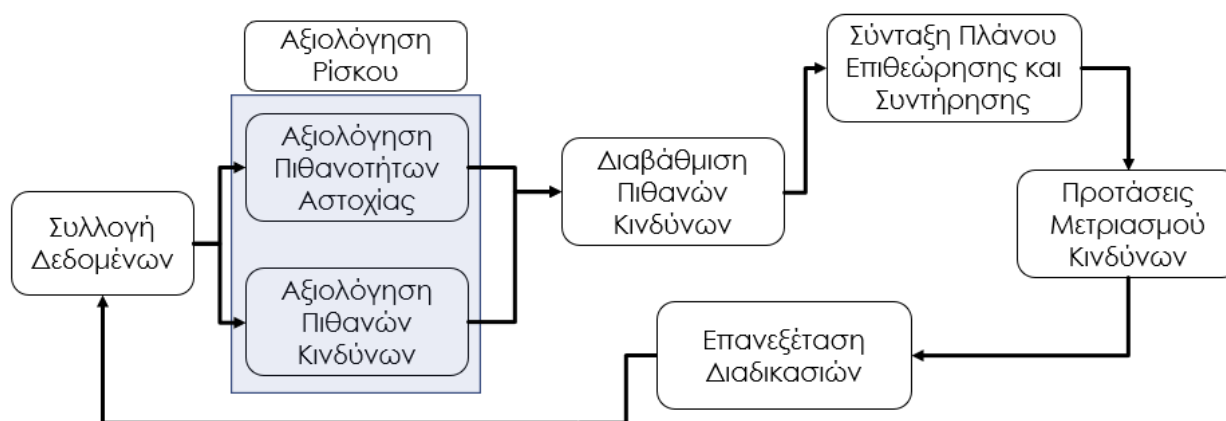
Μέχρι πρότινος σε βιομηχανίες όπως η ναυτιλία, η εφαρμογή της επιθεώρησης και συντήρησης γινόταν αποκλειστικά βάση των οδηγιών του κατασκευαστή και της εμπειρίας του χειριστή. Η τεχνική γνώση ελαττώνεται με την αύξηση της πολυπλοκότητας των συστημάτων και την ψηφιοποίησή τους. Αποτελεί λοιπόν αδήριτη ανάγκη να ξεκινήσουν οι προσπάθειες εφαρμογής μιας ολιστικής προσέγγισης για το πώς να μοντελοποιηθεί η τεχνική εμπειρία των επαγγελματιών που άλλοτε αποτελούσαν πηγή αξιόπιστης ανάλυσης και πρόβλεψης αστοχιών συστήματος και να εισαχθεί ως δεδομένο για αύξηση της αποτελεσματικότητας της λειτουργίας και μείωση των κινδύνων σε αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης και πρόβλεψης ρίσκου (Sakai, 2009). Αυτή την προσέγγιση ακολουθεί και η παρούσα εργασία, με σκοπό να εισάγει τη γνώση των εμπειρών χειριστών του υπό μελέτη συστήματος και της βιβλιογραφίας, ώστε να αναπτυχθεί μέσω αποδεκτής πιθανοθεωρητικής μεθόδου ανάλυσης η βελτιωμένη διαχείριση εργασιών και μείωση του ολικού ρίσκου.

Παράλληλα, το ρίσκο αποτελεί όλο και συχνότερα κριτήριο λήψης αποφάσεων, καθώς μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη η συνεκτίμηση της πιθανότητας αποτυχίας και του βαθμού αποτυχίας ενός συστήματος ή μιας εγκατάστασης (Ventikos, 2012). Έτσι, οι προσεγγίσεις με βάση τον ρίσκο υιοθετούνται όλο και περισσότερο, αντικαθιστώντας τις παραδοσιακές μεθόδους επιθεώρησης και συντήρησης. Τέτοιες προσεγγίσεις είναι η επιθεώρηση και η συντήρηση με βάση το ρίσκο (RBI). Κεντρικές προκλήσεις στις συγκεκριμένες προσεγγίσεις είναι (API, 2009):

- Η σωστή αναγνώριση των κινδύνων του υπό εξέταση συστήματος
- Η επιτυχής υιοθέτηση και προσαρμογή μεθόδων διαχείρισης ρίσκου στην παρούσα κατάσταση στη θαλάσσια βιομηχανία
- Η ρεαλιστική μοντελοποίηση μηχανικών και δομικών συστημάτων όπου προσεγγίσεις με γνώμονα τον κίνδυνο μπορούν να εφαρμοστούν
- Η αποδοτική και αποτελεσματική ανάλυση και διαχείριση ιστορικών και άλλων στοιχείων ως δεδομένων εισόδου στις συγκεκριμένες μοντελοποιήσεις.

Κεντρική έννοια των προαναφερόμενων προσεγγίσεων με βάση το ρίσκο είναι προφανώς το ίδιο το ρίσκο. Χρησιμοποιείται ως αποτελεσματικό κριτήριο για το σχεδιασμό επιθεώρησης και συντήρησης σε όλων των ειδών τις εγκαταστάσεις και βιομηχανίες, και ειδικότερα σε εκείνες που φέρουν σημαντικότερους κινδύνους όπως των πυρηνικών εργοστασίων και εγκαταστάσεων μεταποίησης ή άντλησης πετρελαίου ή φυσικού αερίου (Derdowski et al., 2023). Επομένως, είναι απαραίτητο να δοθεί ο ορισμός του ρίσκου, της διαχείρισης του, της ανάλυσης του ρίσκου και

της εκτίμησης του. Ο στόχος των προσεγγίσεων που βασίζονται στο ρίσκο για ένα σύστημα, έργο ή διαδικασία είναι η αποφυγή ή και η μείωση/μετριασμός των επιπέδων του ρίσκου που αυτό φέρει στον ιδιοκτήτη, τον διαχειριστή και όλες τις οντότητες που επηρεάζονται έμμεσα και άμεσα από αυτό. Ο σχεδιασμός και υλοποίηση της RBI μπορεί να αποτυπωθεί όπως στο Σχήμα 3.1 (API, 2009):



Σχήμα 3.1 Η διαδικασία υλοποίησης RBI (API, 2009)

3.1 Εισαγωγή στην έννοια του ρίσκου

3.1.1 Ορισμός ρίσκου

Το ρίσκο αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητας και επομένως και της λειτουργίας όλων των επιχειρήσεων και οργανισμών (Βεντούρης, 2016). Είτε εν γνώσει τους είτε όχι, όλοι οι άνθρωποι παίρνουν καθημερινά αποφάσεις με βάση το ρίσκο. Σε κάθε τέτοια απόφαση, επιλέγεται νοητά μια από τις δυνατές εναλλακτικές λύσεις, κάθε μια από τις οποίες ενέχει διαφορετικό επίπεδο κινδύνου. Για παράδειγμα, μια τέτοια απόφαση είναι η επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα πάει κανείς στη δουλειά του το πρωί. Η επιλογή μετακίνησης με τα μέσα μαζικής μεταφοράς (ΜΜΜ) ή με ιδιωτικό όχημα (ΙΧ), η επιλογή της ώρας αναχώρησης από την οικία, ακόμη και το τι ρούχα και παπούτσια θα επιλέξει να φορέσει κανείς επηρεάζουν το ενδεχόμενο να φτάσει αργοπορημένος ή και να μη φτάσει καθόλου στην εργασία του. Πιο σημαντικές αποφάσεις, όπως η αγορά ενός σπιτιού έναντι της ενοικίασης ή επένδυση χρημάτων έναντι της κατάθεσής τους σε τράπεζα φέρουν μεγαλύτερο ρίσκο και απαιτούν ακόμη πιο προσεκτική ανάλυση από όσους επηρεάζονται κάθε φορά από την κάθε απόφαση.

Κάθε άνθρωπος και κάθε οργανισμός έχει διαφορετική αντιμετώπιση απέναντι στους κινδύνους και το ρίσκο. Πολυάριθμες έρευνες έχουν διεκπεραιωθεί για το ρίσκο που αναλαμβάνουν οι άνθρωποι βάση φύλλου, οικονομικής και κοινωνικής κατάστασης, αποδεικνύοντας τη διαφορετική προσέγγιση ανάλυσης και διαχείρισης ρίσκου (Tavor, 2019). Υπάρχουν εκείνοι που επιζητούν την έκθεση σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ρίσκο, άλλα και στην άλλη άκρη όσοι κάνουν ό,τι μπορούν για να αποφύγουν όσο το δυνατόν περισσότερο την έκθεση σε αυξημένο ρίσκο. Στο ενδιάμεσο αυτού του φάσματος κινούνται όλοι οι υπόλοιποι.

Επιστρέφοντας στο προηγούμενο παράδειγμα της μεταφοράς στην εργασία, η επιλογή του ΙΧ αυτοκινήτου ενέχει τον κίνδυνο ενδεχόμενου θανατηφόρου τροχαίου ατυχήματος. Αυτός ο κίνδυνος μπορεί να αποφευχθεί με το να μείνει κανείς σπίτι του, αλλά τότε αντιμετωπίζει τον κίνδυνο ενδεχόμενης απώλειας της εργασίας του. Ο λόγος που τελικά επιλέγει κανείς να πάει στην εργασία του με το ΙΧ αυτοκίνητο είναι η αξιολόγηση του κινδύνου του ενδεχόμενου θανατηφόρου τροχαίου ως πολύ μικρής πιθανότητας εμφάνισης, και μέσω αυτής της αξιολόγησης, η αποδοχή του συγκεκριμένου κινδύνου. Αυτή η επιλογή επηρεάζεται από στοιχεία όπως η εκτιμώμενη ασφάλεια του οχήματος (πιστοποιήσεις κατασκευαστή, ύπαρξη αερόσακων κτλ.), η εκτιμώμενη ασφάλεια της διαδρομής (ποιότητα οδοστρώματος, επίπεδο κυκλοφοριακής συμφόρησης κτλ.), η εκτιμώμενη επάρκεια οδηγικών ικανοτήτων (κατοχή εν ενεργεία διπλώματος οδήγησης κτλ.) και ούτω καθεξής.

Περνώντας στον κόσμο των επιχειρήσεων και των οργανισμών, οι κίνδυνοι του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντός τους μπορούν να επηρεάσουν όλους τους τομείς των δραστηριοτήτων τους και ακόμη και την ίδια τους την ύπαρξη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εμφάνιση του κινδύνου της πανδημίας του Covid-19, που οδήγησε ένα μεγάλο αριθμό επιχειρήσεων και οργανισμών σε μείωση των εσόδων τους και της παραγωγικότητάς τους, αύξηση των εξόδων και του συνολικού κόστους λειτουργίας τους και ακόμη και σε οριστική διακοπή της λειτουργίας τους.

Το ρίσκο ως έννοια έχει λάβει διάφορους ορισμούς κατά την πορεία της μελέτης του, ανάλογα με το επιστημονικό πεδίο από όπου προέρχονται οι μελετητές του. Σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 31000:2019, ρίσκο ορίζεται ως το «αποτέλεσμα της αβεβαιότητας στους στόχους» ενός οργανισμού ή ενός έργου (Rampini et al., 2019). Από την άλλη, το ρίσκο, σύμφωνα με τον ορισμό που συναντά κανείς πιο συχνά στη βιβλιογραφία του πεδίου της ασφάλειας και αξιοπιστίας, είναι η πιθανότητα ενός αρνητικού μελλοντικού γεγονότος πολλαπλασιασμένη με το μέγεθος της επίπτωσής του. Το 1981, οι Kaplan και Garrick, ορίζουν το ρίσκο ως συνδυασμό των τριών μεταβλητών (s_i, p_i, c_i) , όπου s_i είναι το σενάριο i , p_i είναι η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί αυτό το σενάριο, και c_i είναι η συνέπεια του σεναρίου i , όπου $i = 1, 2, \dots, N$, δηλαδή το ρίσκο απάντα στις ερωτήσεις «Τι μπορεί να συμβεί; πόσο πιθανό είναι να συμβεί κάτι τέτοιο; εάν αυτό συμβεί, ποιες είναι οι πιθανές συνέπειες;». Ένας ακόμη ορισμός είναι πως το ρίσκο είναι ο δισδιάστατος συνδυασμός των γεγονότων/συνεπειών μιας δραστηριότητας και της σχετικής αβεβαιότητας (Aven, 2010).

Είναι επομένως σαφές ότι το ρίσκο μπορεί να πάρει πολλές μορφές και δεν υπάρχει μοναδικός ορισμός που να είναι ευρέως αποδεκτός. Ωστόσο, το ρίσκο ενέχει συχνά την έννοια της πιθανότητας, όπως η πιθανότητα ενός ατυχούς γεγονότος ή η πιθανότητα αποτυχίας μιας επένδυσης. Από την άλλη, ο κίνδυνος είθισται να συνδέεται με κάποιο αβέβαιο γεγονός ή συνθήκη που έχει αρνητική επίδραση στον στόχο ενός έργου. Επομένως, ο κίνδυνος δεν ενέχει μόνο την έννοια της πιθανότητας. Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση περιέχει επίσης και τις συνέπειες/επιπτώσεις του δεδομένου ατυχούς συμβάντος. Και οι δύο έννοιες είναι απαραίτητες για έναν πλήρη ορισμό. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη έκφραση για τον κίνδυνο είναι ότι αποτελεί το προϊόν πιθανότητας και συνέπειας, όπως φαίνεται στην εξίσωση (3.1). Με άλλα λόγια, «ρίσκο θεωρείται το γινόμενο της πιθανότητας ανεπιθύμητου συμβάντος επί τις όποιες μετρήσιμες επιπτώσεις προκύπτουν από αυτό» (Ventikos, 2012).

$$\text{Risk} = \text{Probability of occurrence} \times \text{consequences of occurrence} \quad (3.1)$$

Μετά από τον υπολογισμό του ρίσκου πρέπει να ακολουθήσει αποτίμηση και σύγκρισή του, για να καθοριστεί εάν είναι αποδεκτός ή απαιτούνται διορθωτικές ενέργειες για τον μετριασμό ή τη μείωσή του. Αυτή η σύγκριση μπορεί να γίνει μέσω καθορισμένων προτύπων και κοινά αποδεκτών επιπέδων ρίσκου. Η σύγκριση με άλλους παρόμοιους υπολογισμούς ρίσκου μπορεί να είναι απαραίτητη για να καθοριστεί το σενάριο με το χαμηλότερο κίνδυνο και άρα αυτό που είναι προτιμότερο έναντι άλλων. Η σύγκριση αυτή βασίζεται στη διάκριση του υπολογισμού/αποτίμησης του ρίσκου.

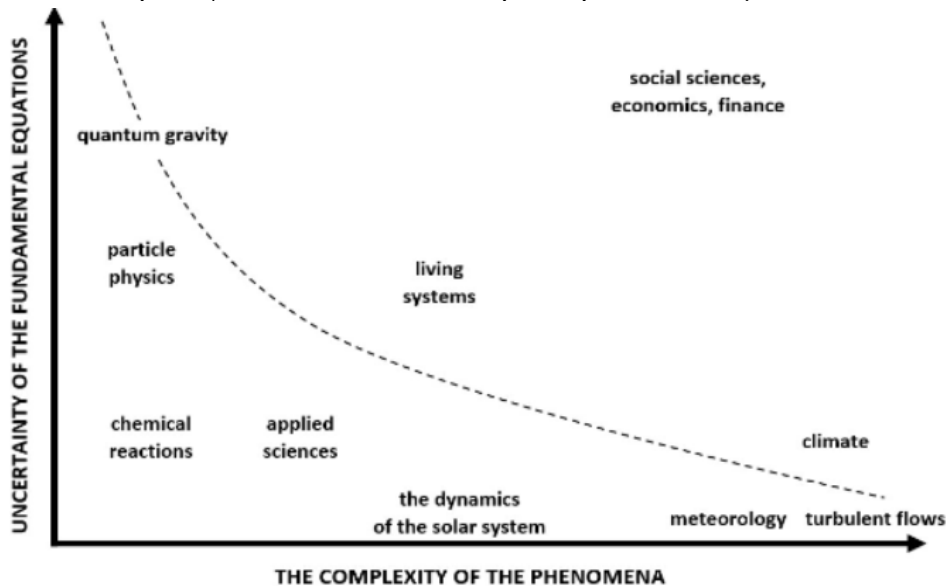
Ο υπολογισμός/αποτίμηση ρίσκου, και συνεπώς η εκτίμησή του, μπορεί να είναι ποσοτικός ή ποιοτικός (Ventikos, 2012). Ο ποιοτικός κίνδυνος είναι μια αφηρημένη έννοια που μπορεί να εκφραστεί μέσω απλών πινάκων κινδύνου ή ποιοτικών γραφημάτων όπου μια σχετική αναπαράσταση του ρίσκου μπορεί να είναι αρκετή για να αναγνωρισθούν τα καίρια στοιχεία του υπό εξέταση συστήματος. Ο ποσοτικός υπολογισμός του ρίσκου είναι πιο σχολαστικός και αυστηρός και αντιπροσωπεύεται από τιμές που μπορούν να μετρηθούν στις μονάδες στις οποίες εκφράζεται η συνέπεια. Αυτές οι μονάδες είναι συχνά χρηματικό κόστος ή κόστος ανά μονάδα χρόνου και έτσι η έννοια του κινδύνου μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή από μεγάλο εύρος ερευνητών και στελεχών του κλάδου της θαλάσσιας βιομηχανίας (Βεντούρης, 2016). Τόσο η πιθανότητα όσο και η συνέπεια, στις περισσότερες περιπτώσεις ποσοτικής αξιολόγησης κινδύνου, ενέχουν προκλήσεις στον καθορισμό τους, ακόμη και μέσω των πιο σύγχρονων και εξελιγμένων μεθόδων ποσοτικοποίησης. Ωστόσο, το αποτέλεσμα της ποσοτικής εκτίμησης μπορεί να δώσει αρκετές πληροφορίες σχετικά με το σύστημα ή το έργο στο οποίο εφαρμόζεται η ανάλυση κινδύνου και μπορεί έτσι να βοηθήσει στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και όχι μόνο. Έτσι, για να υπολογιστεί ποσοτικά το ρίσκο ενός ατυχούς γεγονότος, η πιθανότητα εμφάνισης του γεγονότος και οι συνέπειές του πρέπει να είναι γνωστές μέσα από στατιστική ανάλυση και ανάλυση κόστους αντίστοιχα.

Είναι εύλογη παραδοχή το ότι ο υψηλός/μεγάλος ποσοτικά κίνδυνος μπορεί να οδηγήσει σε ατυχή γεγονότα με σημαντικό χρηματικό κόστος. Πέραν τούτου, οι συνέπειες ενδέχεται να μην είναι μόνο οικονομικές, αλλά και κοινωνικές και περιβαλλοντικές. Δεν είναι λίγες οι φορές που η αστοχία συστημάτων είχε ως αποτέλεσμα τραυματισμούς ή/και ανθρώπινες απώλειες, καθώς και καταστροφή ή/και μόλυνση του περιβάλλοντος. Για να μπορέσει να υλοποιηθεί η ποσοτική αξιολόγηση των κινδύνων, συχνά και τα τρία είδη επιπτώσεων, οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές, μετασχηματίζονται σε χρηματικό κόστος, ώστε να είναι δυνατή η εισαγωγή τους στα μοντέλα ανάλυσης κινδύνου ως μιας ενιαίας μονάδας συνέπειας (Ventikos et al., 2018).

3.1.2 Εισαγωγή στην έννοια της Αβεβαιότητας

Ξεκινώντας, για να οριστεί η αβεβαιότητα σαν έννοια θα πρέπει να τονιστεί ο διαχωρισμός της αναφορικά με την έννοια του ρίσκου αλλά και του σφάλματος. Το ρίσκο, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι μια μετρήσιμη μεταβλητή, καθώς στην περίπτωση του μπορούμε να υπολογίσουμε την κατανομή των πιθανοτήτων η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του. Το σφάλμα ορίζεται ως η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης και μια αληθή τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Από τη σκοπιά των μαθηματικών, η αβεβαιότητα σε αντιδιαστολή με τα παραπάνω, δεν είναι μετρήσιμη, αλλά αποτελεί ένα ποσοτικό μέτρο της ποιότητας των γνώσεων που έχουμε για το μετρούμενο μέγεθος. Η αβεβαιότητα είναι μια παράμετρος, η οποία σχετίζεται με το αποτέλεσμα της μέτρησης μιας φυσικής ποσότητας, και η

οποία χαρακτηρίζει την διασπορά των τιμών που μπορούν λογικά να αποδοθούν - αντιστοιχηθούν στην ποσότητα αυτή. Ένας ορισμός που αποδίδεται είναι πως ορίζεται ποσοτικά ως η «αμφιβολία» σχετικά με την ορθότητα του αποτελέσματος ενός γεγονότος (Βεντούρης, 2016). Είναι η παράμετρος που συνδέεται με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά τιμών που θα μπορούσε εύλογα να αποδοθεί στο μετρούμενο μέγεθος. Αυτό μπορεί να συμβαίνει λόγω περιορισμένης γνώσης ή συνεχών μεταβολών των καταστάσεων. Η αβεβαιότητα είναι ένα πραγματικό και παγκόσμιο φαινόμενο σε κάθε εκτίμηση που γίνεται όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2 (Magruk 2017). Η αδυναμία των ανθρώπων να προβλέψουν με ακρίβεια οτιδήποτε ανήκει στο μέλλον έχει αποδειχτεί, μέχρι σήμερα τουλάχιστον, αναπόδραστη. Όμως πολλοί τομείς που επηρεάζουν και καθορίζουν άμεσα την καθημερινότητα, απαιτείται να στηρίζονται πάνω σε κάποιες σταθερές παραδοχές. Αυτό είναι και το κάλεσμα της επιστημονικής γνώσης. Για τον λόγο αυτό στις κοινωνικές επιστήμες, στην ιατρική αλλά και στην μηχανική καθίσταται αναγκαίο να βρεθούν στατιστικές τεχνικές και γραφικά μοντέλα, όπως αυτά που θα εκτεθούν παρακάτω, ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν αρτιότερα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.2 Η Αβεβαιότητα συναρτήσεως της πολυπλοκότητας των επιστημών και η οριοθέτηση της ανθρώπινων γνώσης για αυτές (Magruk, 2017)

Η Αβεβαιότητα στον τομέα μελέτης και ανάλυσης ρίσκου ωστόσο, διαχωρίζεται στις εξής κατηγορίες (Nilsen et al., 2003):

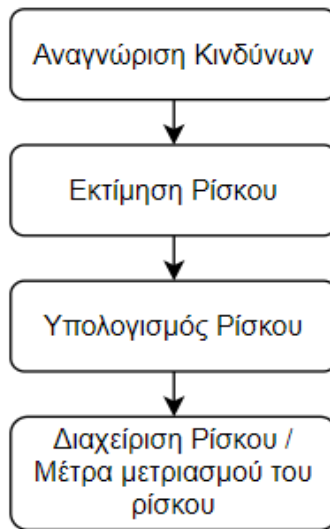
- Τυχαία αβεβαιότητα: Προκύπτει από την μεταβλητότητα των παρατηρούμενων μεγεθών και μπορεί να οφείλεται σε τυχαίους παράγοντες. Απλούστερα, είναι η αβεβαιότητα που αισθάνεται ο παρατηρητής στην περίπτωση εκτέλεσης πειράματος πολλαπλές φορές, κάτω από τις ίδιες συνθήκες, χωρίς ωστόσο να επαναλαμβάνεται το ίδιο αποτέλεσμα.
- Γνωσιολογική αβεβαιότητα: Προέρχεται από την έλλειψη γνώσης σχετικά με το υπό μελέτη φαινόμενο και μπορεί να περιοριστεί μόνο με την μελέτη και τη διεύρυνση των γνώσεων του παρατηρητή στο υπό μελέτη αντικείμενο. Απόρροια της είναι τα εξαιρετικά πολύπλοκα φαινόμενα, η αλληλεπίδραση μεταξύ ανθρώπων και τεχνικού εξοπλισμού, η έλλειψη γνώσης

πάνω σε συστήματα τα οποία δεν έχουν προσεγγιστεί ικανοποιητικά ακόμα μέσω κάποιας μοντελοποίησης ή τα δεδομένα της ανάλυσης έχουν και αυτά ένα βαθμό αβεβαιότητας και σχετίζονται με τα αβέβαια αποτελέσματα που ενός μελλοντικού γεγονότος.

Λόγω της ανάγκης μελέτης πολύπλοκων συστημάτων ως προς το ρίσκο που αυτά φέρουν, μία εύληπτη μέθοδος ανάλυσης αποτελεί η μοντελοποίηση ενός συστήματος. Υλοποιούνται από τους μελετητές διάφορα μοντέλα, στοχαστικά και μη, στην προσπάθεια τους να κατανοήσουν με ακρίβεια την πλήρη λειτουργία και πιθανούς κινδύνους ενός συστήματος. Για να είναι ικανά αυτά τα μοντέλα να περιγράφουν με απόλυτη ακρίβεια την πραγματικότητα, τότε θα καταλήξουν να είναι πολύπλοκα και δύσχρηστα. Συνεπώς, κάθε μοντέλο δέχεται κάποιες απλοποιήσεις, παραδοχές ή και παραβλέψεις παραγόντων που το διέπουν, ώστε να μπορεί να οδηγήσει σε ορθά και κατανοητά αποτελέσματα τα οποία όμως μπορούν να επαληθευτούν σε σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τα πραγματικά γεγονότα. Αυτή η απλοποίηση, οδηγεί στην αβεβαιότητα η οποία ονομάζεται αβεβαιότητα μοντέλου (Βεντούρης, 2016). Η αναπαράσταση αυτής της αβεβαιότητας μπορεί να μεταφερθεί στην ανάλυση ρίσκου, ως ένα μετρήσιμο μέγεθος, της πιθανότητας πραγματοποίησης ενός γεγονότος A , με τιμή $P(A)$. Περισσότερα για την θεωρία πιθανοτήτων και τις βασικές έννοιες της ακολουθούν στο κεφάλαιο 4.

3.1.3 Διαχείριση Ρίσκου - Ανάλυση και αντιμετώπιση

Με βάση την προαναφερθείσα έννοια του ρίσκου και εκτίμηση του κινδύνου ορίζεται μια ολόκληρη διαδικασία για την αναγνώριση, την εκτίμηση, τον υπολογισμό και τη διαχείριση του ρίσκου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 (Ventikos et al., 2022):



Σχήμα 3.3 Βασική διεργασία διαχείρισης ρίσκου

Το πεδίο της διαχείρισης ρίσκου (risk management) περιλαμβάνει την ανάλυση ρίσκου (risk analysis) και τον υπολογισμό/εκτίμηση ρίσκου (risk assessment). Οι ορισμοί αυτοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1 Ορισμοί βασικών εννοιών ρίσκου (Ventikos, 2012)

Ανάλυση Ρίσκου (Risk Analysis)	Η συστηματική χρήση διαθέσιμων πληροφοριών για την αναγνώριση των κινδύνων καθώς και η εκτίμηση ρίσκου σε ατομικό, κοινωνικό και περιβαλλοντικό επίπεδο
Υπολογισμός/εκτίμηση ρίσκου (Risk Assessment)	Η επανεξέταση του αποδεκτού ρίσκου το οποίο έχει αναλυθεί και αξιολογηθεί βασισμένο σε κριτήρια ανοχής του ρίσκου
Διαχείριση ρίσκου (Risk Management)	Η εφαρμογή της εκτίμησης ρίσκου με πρόθεση να πληροφορήσει για τα κατάλληλα μέτρα μείωσης ρίσκου και τους πιθανούς τρόπους εφαρμογής.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η διαχείριση ρίσκου είναι και πολιτικό εγχείρημα, εκτός από επιστημονικό. Τα ενδιαφερόμενα μέρη και η κοινωνία έχουν ενεργό ρόλο για την ανάλυση και ειδικά την αξιολόγηση και τη διαχείριση του ρίσκου. Η διαχείριση ρίσκου (**Risk Management**) ως συγκεκριμένη τεχνική αναγνώρισης κινδύνων, εκτίμησης των συνεπειών και λήψης μέτρων μετριασμού αυτών, έχει τη βάση της στην εξέλιξη της πυρηνικής και χημικής βιομηχανίας κατά τις δεκαετίες του 1960 και 1970. Μέσα από αυτή την εξέλιξη, και την αναγνώριση των καταστροφικών πιθανών συνεπειών ενός ατυχήματος σε ένα πυρηνικό σταθμό ή μια βιομηχανική εγκατάσταση χημικών, γεννήθηκε η ανάγκη για αντιμετώπιση του ρίσκου με πιο συστηματικό και καθορισμένο τρόπο από ό,τι γινόταν μέχρι τότε. Έπειτα, στη δεκαετία του 1980 η διαχείριση κινδύνων μπήκε και στην θαλάσσια βιομηχανία, στις εξέδρες εξόρυξης πετρελαίου, φτάνοντας τελικά και στη ναυτιλία τη δεκαετία του 1990 (Aven, 2012).

Η διαδικασία διαχείρισης κινδύνων για έργα και οργανισμούς γενικά αποτελείται από την αξιολόγηση των κινδύνων δηλαδή την αναγνώριση, την ανάλυση και την αποτίμηση κινδύνων, και την αντιμετώπιση κινδύνων, δηλαδή τη λήψη μέτρων για αποφυγή ή μείωση της πιθανότητας εμφάνισης ή/και των πιθανών επιπτώσεων των κινδύνων.

Στη ναυτιλία, αποτελεί βασική προσέγγιση του ρίσκου η Τυπική Αποτίμηση Ασφαλείας (**Formal Safety Assessment – F.S.A.**), η οποία συνδυάζει την ασφάλεια και προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος με την αξιολόγηση του κόστους και την ελαχιστοποίηση των πηγών ρίσκου μέσω της συστηματικής μεθοδολογίας εκτίμησης ρίσκου (Σπύρου, 2017). Η ανάπτυξη της αποτελεί ανάγκη που γεννήθηκε τόσο για το όφελος του περιβάλλοντος όσο και για την θέσπιση ενός συστηματικού τρόπου εκτίμησης πιθανών κινδύνων ενός συστήματος/δραστηριότητας. Εφαρμόζεται από κράτος-μέλος του IMO, εκπροσώπους κυβερνήσεων ή οργανισμούς που έχουν έμμεση σχέση με τον IMO όταν επανεξετάζουν ή τροποποιούν κανονισμούς που σχετίζονται με την ασφάλεια και την πρόληψη ρύπανσης του περιβάλλοντος ώστε να αξιολογήσουν πιθανές συνέπειες μίας τροποποίησης. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί από επιτροπές που αξιολογούν τους κανονισμούς αυτούς ώστε να παρέχουν μία επεξήγηση της ισχύουσας νομοθεσίας, παρέχοντας έτσι ανασκόπηση των καίριων κανονισμών και ανάλυση πιθανών επιπλοκών που μπορούν να επιφέρουν νέες διατάξεις (IMO, 2018). Σύμφωνα με την αναφερθείσα *MSC-MEPC 2-Circ 12-Rev 2 - Revised Guidelines for FSA* του IMO, η εκτίμηση του ρίσκου στη ναυτιλία αποτελείται από πέντε βήματα:

1. Αναγνώριση των κινδύνων μιας δραστηριότητας
2. Εκτίμηση του ρίσκου που προέρχεται από τους κινδύνους που αναγνωρίστηκαν
3. Διερεύνηση των εργαλείων που διατίθενται για τη μείωση του ρίσκου (Risk Control Options – RCO)
4. Ανάλυση Κόστους/Οφέλους (Cost Benefit Analysis) από την εφαρμογή των RCO.
5. Προτάσεις για τη λήψη αποφάσεων που θα βασίζονται στις πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά τα προηγούμενα βήματα.

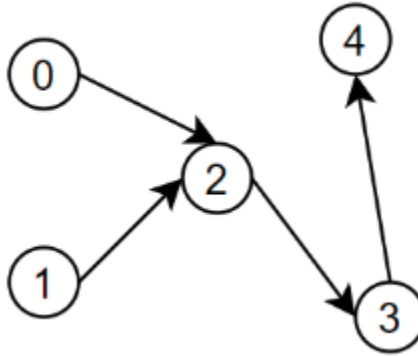
Η συγκεκριμένη προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί και να παρουσιαστεί με τα ακόλουθα βήματα:

1. Αναγνώριση κινδύνων συστήματος
2. Ανάλυση συστήματος σε υπο-συστήματα ή μέρη
3. Ανάλυση αιτίου – συχνότητας
4. Ανάλυση συνεπειών
5. Τελική εκτίμηση του ρίσκου
6. Επιλογές για τον έλεγχο του ρίσκου (RCO)
7. Ανάλυση Κόστους/Οφέλους από την εφαρμογή των RCO
8. Προτάσεις

Σύμφωνα με τον IMO, χρήσιμα εργαλεία και μέθοδοι ανάλυσης ρίσκου είτε πρόκειται για ποιοτικές είτε πρόκειται για ποσοτικές προσεγγίσεις, αποτελούν μεταξύ άλλων τα παρακάτω:

- Ανάλυση Δένδρων Σφαλμάτων (Fault Tree Analysis - FTA), μια μέθοδος για τη γραφική αναπαράσταση λογικών συνδυασμών μεταξύ μεταβλητών για τον προσδιορισμό των αιτιών ενός ατυχούς συμβάντος. Μια FTA μπορεί να είναι στατική αλλά μπορεί να είναι και δυναμική, εάν αναπτύσσεται με το χρόνο.
- Ανάλυση Δένδρου Γεγονότων (Event Tree Analysis), μία μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των συνεπειών ενός γεγονότος συνδυάζοντας όμως τα γεγονότα που ακολουθούν εάν είναι επιτυχείς ή ανεπιτυχείς οι πράξεις μετριασμού των συνεπειών του αρχικού γεγονότος.
- Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), μια μέθοδος για τον εντοπισμό των κινδύνων και των συνεπειών τους που οδηγούν στην αποτυχία μίας δραστηριότητας/συστήματος. Διακρίνοντας το σύστημα σε διάφορα υποσυστήματα/λειτουργίες οι οποίες διαβαθμίζονται με βάση την κρισιμότητά τους και αναλύεται κάθε πιθανό αίτια κάθε πιθανής αποτυχίας που φέρει μία δραστηριότητα.

- Μπεϋζιανά Δίκτυα/Δίκτυα Πίστης (Bayesian Networks - BN), μια μέθοδος μοντελοποίησης της εξάρτησης μεταξύ των διαφόρων μεταβλητών του συστήματος. Ένα BN μπορεί να είναι στατικό ή δυναμικό (Dynamic Bayesian Network - DBN), εάν υλοποιείται αυτό στο χρόνο και εξελίσσεται με την πάροδό του. Η πιθανοθεωρητική προσέγγιση γίνεται με την ανάπτυξη πιθανοτήτων κατά Bayes(βλ. κεφάλαιο 4).



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα γράφων (DAG)

- Ανάλυση ευαισθησίας ή Αβεβαιότητας (Sensitivity / Uncertainty analysis). Η ανάλυση ευαισθησίας είναι η μελέτη του πώς η αβεβαιότητα στα τελικά αποτελέσματα ενός μοντέλου(π.χ. πιθανοθεωρητικού) μπορεί να αποδοθεί σε διαφορετικές πηγές αβεβαιότητας των αρχικών δεδομένων του. Συχνά εφαρμόζεται και ερμηνεύεται μέσω της ανάλυση αβεβαιότητας. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω της ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας σε επιλεγμένες αρχικές μεταβλητές ώστε να υπάρξει ανάλυση της βαρύτητάς τους στο τελικό ρίσκο μίας δραστηριότητας. Αποτελούν μέθοδο επικύρωσης μιας πιθανοθεωρητικής έρευνας μιας και μπορεί να συγκριθεί η βαρύτητας μίας μεταβλητής με την πραγματική επίπτωση που έχει σε ένα σύστημα γνωστό κατά την εμπειρία ειδικών ή βιβλιογραφίας.
- Hazard and Operability Studies (HAZOP), μία μέθοδος που αναλύει τους κινδύνους σε ένα σύστημα και σκοπός της είναι η εξάλειψη ή ελαχιστοποίησή τους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω σύστασης ομάδων που αποτελούνται από έμπειρους και ειδικούς στην σχεδίαση ανάλυση και διαχείριση του προς ανάλυση συστήματος ή δραστηριότητας. Είναι πολυεπίπεδη και στοχεύει στην λεπτομερή ανάλυση αιτιών και των πιθανών κινδύνων που αυτές φέρουν.

Το κύριο μοντέλο που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία αποτελεί έναν συνδυασμό των εξής:

1. Της FMEA για την αναγνώριση όλων των πιθανών αστοχιών και συνεπειών τους στο υπό μελέτη σύστημα
2. Της θεωρίας FTA για την κατανόηση και ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος. Ταυτόχρονα η εξάρτηση των υποσυστημάτων και οι συνέπειες των αστοχιών τους αντικατοπτρίζονται επαρκώς μέσω του δένδρου σφαλμάτων, βοηθώντας περαιτέρω στη μοντελοποίηση του.

3. Εφαρμογής δυναμικού Μπεϋζιανού δικτύου μέσα από τη μετάβαση του FT σε BN και DBN, το οποίο υπολογίζει την πιθανότητα αστοχίας του υπό μελέτη συστήματος μεταξύ διαφορετικών χρονικών πλαισίων επιθεώρησης και συντήρησης σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.
4. Επικύρωση των αποτελεσμάτων μέσω υλοποίησης του μοντέλου στο προγραμματιστικό περιβάλλον αμιγώς προτεινόμενο για BN μοντελοποίηση, GeNIe.
5. Υπολογισμός της πιθανότητας αστοχίας και κατ' επέκταση του ρίσκου του επιλεχθέντος συστήματος μέσω εισαγωγής πρότερων ενδείξεων (Evidence), αποσκοπώντας στην αναγνώριση των πιο καίριων υποσυστημάτων του ως προς το ρίσκο που αυτά ενέχουν.

3.2 Επιθεώρηση και συντήρηση στη θαλάσσια βιομηχανία

3.2.1 Εισαγωγή

Η επιθεώρηση και η συντήρηση όλων των ειδών συστημάτων πάνω στα πλοία κατέχουν έναν από τους πιο σημαντικούς ρόλους στη σημερινή θαλάσσια βιομηχανία. Η σημασία τους έχει αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου, καθώς τα μηχανήματα στα πλοία γίνονται συνεχώς πιο περίπλοκα ως προς την κατανόησή τους και λειτουργία τους, και φυσικά πιο εξελιγμένα. Επιπλέον, η αυξανόμενη ανάγκη για διασφάλιση της ασφάλειας του προσωπικού, ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και μείωση του κόστους οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων και τεχνικών επιθεώρησης και συντήρησης, οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερα επίπεδα αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας. Η εξέλιξη του σχεδιασμού επιθεώρησης και συντήρησης έχει επεκταθεί από απλές, με βάση κανόνες (rule-based) και με βάση το χρόνο (time-based) προσεγγίσεις, με σταθερά χρονικά διαστήματα ανά επιθεώρηση ή συντήρηση, σε προσεγγίσεις με επίκεντρο την αξιοπιστία (reliability) και, πιο πρόσφατα, με βάση το ρίσκο (risk-based).

Η επιθεώρηση και η συντήρηση, παρόλο που φαίνονται σαν δύο διακριτές λειτουργίες, συνδυάζονται προκειμένου να διασφαλιστεί η διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και ο έλεγχος του ρυθμού φθοράς (Tan et al., 2011). Ο πιο συχνός και απλός συνδυασμός μπορεί να παρατηρηθεί όταν ενέργειες συντήρησης ακολουθούν –ή όχι– μια επιθεώρηση, με βάση τα αποτελέσματά της. Ένα σχέδιο επιθεώρησης μπορεί να περιλαμβάνει ενέργειες συντήρησης, και αντίστοιχα ο προγραμματισμός μιας συντήρησης μπορεί να προϋποθέτει πρότερα κάποια επιθεώρηση. Οι επιθεωρήσεις καθοδηγούνται από μια σειρά δεδομένων όπως το σύστημα προγραμματισμένης συντήρησης (PMS-Planned Maintenance System) μίας εταιρείας, την εμπειρία του πληρώματος και του προσωπικού των κεντρικών γραφείων της ναυτιλιακής, τους κανονισμούς νηογνομόνων και των διεθνών συμβάσεων και τις κατευθυντήριες γραμμές των κατασκευαστών των μηχανημάτων. Τα προαναφερθέντα, λαμβάνονται υπόψη από τα μέλη των ναυτιλιακών που σχεδιάζουν τα χρονικά βήματα και τις στιγμές των επιθεωρήσεων που διεξάγονται κατά την διάρκεια ζωής του πλοίου. Το ίδιο ισχύει και για τις προσεγγίσεις στον σχεδιασμό της συντήρησης, οι οποίες αποτελούν μεγάλη πρόκληση για τους ναυπηγούς στις μέρες μας.

3.2.2 Επιθεώρηση και σχεδιασμός επιθεώρησης

Από τότε που ιδρύθηκε επίσημα ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization – IMO), υπογράφηκαν και εγκρίθηκαν μια σειρά από συμβάσεις και συνθήκες, που εισάγουν υψηλά πρότυπα θαλάσσιας ασφάλειας, αποτελεσματικότητας λειτουργίας και πρόληψης της θαλάσσιας ρύπανσης (Σπύρου, 2017). Μερικές από τις πιο σημαντικές συμβάσεις είναι η Διεθνής Συνθήκη για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα (International Convention for the Safety of Life at Sea – **SOLAS**), η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – **MARPOL**) και η Διεθνής Σύμβαση για τις Γραμμές Φόρτωσης (International Load Lines Convention- **ILLC**). Έτσι, από τα πρώτα στάδια της κατασκευής ενός πλοίου μέχρι το τέλος της ζωής του, το πλοίο πρέπει να παρακολουθείται συνεχώς μέσα από μια σειρά εσωτερικών και εξωτερικών επιθεωρήσεων, σύμφωνα με τις σχετικές συμβάσεις, προκειμένου να εκτιμηθεί η ακεραιότητα της μεταλλικής κατασκευής, των μηχανημάτων και άλλου εξοπλισμού, που είναι ζωτικής σημασίας τόσο για τη λειτουργία του πλοίου όσο και για την

ασφάλεια της ζωής πάνω στο πλοίο αλλά και του περιβάλλοντος στο οποίο αυτό κινείται. Οι επιθεωρήσεις στα πλοία, γίνονται για τους εξής λόγους:

- Την επιβεβαίωση των διεθνών συμβάσεων που αφορούν μεταξύ άλλων την συντήρηση, τον εξοπλισμό και την λειτουργική κατάσταση των πλοίων.
- Την επικύρωση και επιθεώρηση του φορτίου και των φορτω-εκφορτωτικών μέσων του
- Για την βεβαίωση συμμόρφωσης με τους κανονισμούς νηογνώμωνων και σημαίας
- Λόγω αποζημιώσεων μέσω επιθεωρήσεων ζημιών μετά από ατυχήματα και εξακρίβωση κατάστασης

Μία επιθεώρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί από τους παρακάτω οργανισμούς:

Το Νηογνώμονα του πλοίου (Classification Society of the ship)

Οι νηογνώμονες, μέσω των κανονισμών και των επιθεωρήσεών τους, ουσιαστικά παρέχουν τεχνικές υπηρεσίες και υποστήριξη στη θαλάσσια βιομηχανία σχετικά με την ασφάλεια και την πρόληψη της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Η επιθεωρήσεις που γίνονται από τους νηογνώμονες αποσκοπούν στην επαλήθευση της δομικής αντοχής και ακεραιότητας βασικών τμημάτων του πλοίου όπως η γάστρα του πλοίου, τα συστήματα πρόωσης και πηδαλιουχίας, τα συστήματα παραγωγής ενέργειας και άλλα βοηθητικά συστήματα που ενσωματώνονται στο πλοίο για συγκεκριμένες λειτουργίες και υπηρεσίες. Αναπτύσσουν κανονισμούς για την επαλήθευση της συμμόρφωσης των πλοίων που στις διεθνείς συμβάσεις. Επίσης επικυρώνουν την νομοθεσία και τους κανονισμούς που το κράτος νηολόγησης επιβάλλει στα πλοία που είναι νηολογημένα σε αυτό. Η γνώσεις και η τεχνική υποστήριξη που προσφέρουν οι νηογνώμονες αποτελεί τη βασική μέθοδο επικύρωσης και επιβεβαίωσης μέσω τρίτων, πως τα πλοία συμμορφώνονται πλήρως με τις τελευταίες διατάξεις και διεθνείς κανονισμούς. Η εφαρμογή αυτών των κανονισμών παρακολουθείται συνεχώς από τους νηογνώμονες μέσω μιας σειράς επιθεωρήσεων, ώστε να διασφαλίζεται ότι όλα τα συστήματα του πλοίου μπορούν να λειτουργούν αποδοτικά και αποτελεσματικά. Για το λόγο αυτό, ο οργανισμός χορηγεί πιστοποιητικά και έγγραφα στο πλοίο προκειμένου να επισημοποιήσει τη λειτουργία του.

Οι επιθεωρήσεις των νηογνώμωνων κατηγοριοποιούνται κατά συγκεκριμένο τρόπο ανάμεσα στους νηογνώμονες, ανάλογα με τα χρονικά διαστήματα και το αντικείμενο κάθε επιθεώρησης (IACS, 2022). Οι υποχρεωτικές περιοδικές επιθεωρήσεις είναι οι εξής και χωρίζονται σε κατηγορίες επιθεώρησης γάστρας και εξοπλισμού του πλοίου:

- Ετήσια Επιθεώρηση (Annual Survey)
- Ενδιάμεση Επιθεώρηση (Intermediate Survey)
- Επιθεώρηση Ανανέωσης Κλάσης/Ειδική Επιθεώρηση(Class Renewal Survey/Special Survey)

Έρευνες ανανέωσης της κλάσης πραγματοποιούνται μία φορά κάθε πέντε χρόνια και περιλαμβάνουν εκτεταμένες εξετάσεις στην μεταλλική κατασκευή, τα μηχανήματα και τον εξοπλισμό. Οι ενδιάμεσες επιθεωρήσεις διεξάγονται στο ενδιάμεσο μεταξύ των ειδικών επιθεωρήσεων, δηλαδή μεσοδιάστημα δύομιση ετών περίπου, και περιλαμβάνουν εξετάσεις

κυρίως στην γάστρα του πλοίου. Οι ετήσιες επιθεωρήσεις πραγματοποιούνται ετησίως, όπως υποδηλώνει το όνομά τους, και περιλαμβάνουν επιθεωρήσεις κύτους, μηχανημάτων και εξοπλισμού προκειμένου να επαληθευτεί ότι το πλοίο βρίσκεται σε γενική κατάσταση που ικανοποιεί τις απαιτήσεις, αλλά όχι με τον εκτεταμένο τρόπο επιθεωρήσεων ανανέωσης κλάσης. Απαιτείται επιθεώρηση του κύτους του πλοίου δύο φορές κάθε πέντε χρόνια, η μία εκ των οποίων πρέπει να ταυτίζεται με την έρευνα ανανέωσης κλάσης κατά τον δεξαμενισμό (Dry Dock) ενώ η άλλη μπορεί να εκτελεστεί κάτω υπό ορισμένες προδιαγραφές (IACS, 2022) και επιτρέπεται να γίνει εντός θαλάσσης μέσω της επιθεώρησης των εξάλων και ισάλων του πλοίου από πιστοποιημένα συνεργεία επιθεώρησης γάστρας (*In lieu of DD-Underwater surveys*). Τέλος, διενεργούνται μη προκαθορισμένες χρονικά έρευνες, που αποσκοπούν στην ενημέρωση των διάφορων πιστοποιητικών που φέρει το πλοίο, αντιμετώπισης ζημιών, διαχείρισης επισκευών και μετασκευών ή επιβεβαίωσης της άδειας των πλοιοκτητών στην αναβολή περιοδικών ελέγχων ή επιθεωρήσεων εξοπλισμού που απαιτούνται σύμφωνα με τους κανονισμούς σημαίας, νηογνώμονα ή διεθνών συμβάσεων (Ventikos et al., 2018).

Το κράτος στο οποίο είναι νηολογημένο το πλοίο (Κράτος σημαίας – Flag state).

Το κράτος σημαίας ενός εμπορικού σκάφους είναι το κράτος στο οποίο νηολογείται το εκάστοτε πλοίο κατά την παράδοσή του από το ναυπηγείο κατασκευής του. Είναι υποχρεωτική η νηολόγησή του σε μία μόνο σημαία και με βάση τη νομοθεσία του κράτους και τους ελάχιστους κανονισμούς που απαιτείται να πληροί, το πλοίο επιχειρεί στα διεθνή ύδατα. Κάθε εμπορικό πλοίο πρέπει να είναι νηολογημένο ωστόσο μπορεί να αλλάξει το νηολόγιο στο οποίο είναι εγγεγραμμένο. Το κράτος νηολόγησης έχει την εξουσία και την ευθύνη να επιβάλλει κανονισμούς σε πλοία που είναι νηολογημένα υπό τη σημαία του, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που σχετίζονται με την επιθεώρηση, την πιστοποίηση και την έκδοση εγγράφων ασφάλειας και πρόληψης της ρύπανσης. Οι επιθεωρήσεις που διενεργούνται από το κράτος σημαίας (statutory surveys) αφορούν συμβάσεις του IMO, όπως η SOLAS, η Load Line ή η MARPOL, και πρόσθετους κρατικούς κανονισμούς (flag state, port state control). Συμπεραίνεται πως λόγω της πληθώρας των κανονισμών και επιθεωρήσεων, είναι προτιμητέα η ανάληψη ευθύνης επιβεβαίωσης των κανονισμών της σημαίας να εκτελείται από σώμα που μπορεί να λειτουργεί υπό τα βέλτιστα πρότυπα επιθεώρησης. Ως εκ τούτου, είναι σύνηθες τα κράτη νηολόγησης να αναθέτουν στους νηογνώμονες τις επιθεωρήσεις των πλοίων τους ή ακόμα και σε άλλα κράτη μέλη.

Το λιμάνι στο οποίο εισέρχεται το πλοίο (Port State Control - PSC).

Είναι η επιθεώρηση πλοίων σε εθνικούς λιμένες ώστε να διασφαλιστεί ότι η κατάσταση και ο εξοπλισμός του πλοίου, καθώς και η λειτουργία και η επάνδρωση αυτού, συμμορφώνονται με τους τοπικά ισχύοντες νόμους και κανονισμούς που διέπουν το λιμάνι που επισκέπτεται το πλοίο.

Ασφαλιστικές εταιρίες / οργανισμοί

Η ασφαλιστική εταιρεία ενός σκάφους μπορεί να πραγματοποιήσει επιθεωρήσεις για μια σειρά από αιτίες. Μετά την εμφάνιση ζημιών, αστοχιών ή ελαττωμάτων, μια ναυτιλιακή εταιρεία ζητά οικονομική αποζημίωση από την εκάστοτε ασφαλιστική εταιρεία υπό μορφή απαιτήσεων. Στη συνέχεια, η ασφαλιστική εταιρεία εξαγγέλλει έρευνες ζημιών για τον καθορισμό της έκτασης της ζημιάς και του ύψους της αποζημίωσης. Σε περιπτώσεις βαρέων ναυτικών ατυχημάτων, ναυαγίου ή απώλειας φορτίου, διενεργούνται υποχρεωτικά έρευνες διάσωσης από την ασφαλιστική εταιρεία για να ακολουθήσει αργότερα η διαδικασία ανάσυρσης του πλοίου και του

φορτίου του . Άλλες επιθεωρήσεις ειδικού σκοπού ενδέχεται να διαταχθούν, σύμφωνα με τους στόχους της εταιρείας (Bennet, 2001)..

Τον πλοιοκτήτη και τη ναυτιλιακή του εταιρεία, σύμφωνα με τις απαιτήσεις τους σχετικά με την κατάσταση του πλοίου.

Μέσω της ναυτιλιακής του εταιρείας, ο πλοιοκτήτης επιβάλλει επιθεωρήσεις που σχετίζονται με ολόκληρο το σκάφος, για να διατηρήσει ακεραία όλα τα συστήματα και τις δομές του (Vetting Inspections). Συστήματα όπως το πηδάλιο, το σύστημα πρόωσης, τα δίκτυα καυσίμου και λιπαντικών είναι ζωτικής σημασίας για τη λειτουργικότητα του πλοίου, επομένως απαιτείται συνεχής παρακολούθηση και συχνές επιθεωρήσεις, σε μερικές περιπτώσεις ακόμη και καθημερινά. Οι συχνοί έλεγχοι και επιθεωρήσεις ενδέχεται να αποτρέψουν σημαντικά ελαττώματα και, κατά συνέπεια, ενδεχόμενα υπέρογκα κόστη. Το σχέδιο επιθεώρησης πλοίων από το προσωπικό ξηράς της εταιρείας (τεχνικούς και μη επόπτες, τεχνικούς διευθυντές, κ.λπ.) συνήθως πραγματοποιείται ανά εξάμηνο ή και συχνότερα με βάση τις προδιαγραφές και στόχους που θέτει η κάθε ναυτιλιακή εταιρεία. Έλεγχοι γίνονται επίσης από το πλήρωμα του πλοίου με εντολή του πλοιάρχου ή του προσωπικού ξηράς της εταιρείας. Αυτοί οι έλεγχοι συνήθως ακολουθούνται από διορθωτικές ενέργειες και σχέδια βελτίωσης μετά την παρουσίαση προβλημάτων ή αστοχιών κατά τη λειτουργία του πλοίου.

Η επιτυχής ολοκλήρωση των ερευνών και των επιθεωρήσεων από το κράτος σημαίας ή τον νηογνώμονα καταλήγει στη χορήγηση ή ανανέωση μιας σειράς πιστοποιητικών για το υπό εξέταση πλοίο, που επιβεβαιώνει ότι οι κανονισμοί δεν παραβιάζονται και ότι το πλοίο είναι πλήρως λειτουργικό και χωρίς σημαντικά κατασκευαστικά και μηχανικά θέματα (IACS, 2022). Εάν εντοπιστούν ζητήματα σχετικά με την ασφάλεια επί του πλοίου τη δομική του ακεραιότητα ή την λειτουργικότητα των μηχανολογικών εξαρτημάτων του, ή εάν παραβιάζονται κανονισμοί, ο οργανισμός που διενεργεί την έρευνα δεν χορηγεί ούτε ανανεώνει το προς χορήγηση ή ανανέωση πιστοποιητικό που αντιστοιχεί στην εκάστοτε παράβαση ή μη συμμόρφωση με τους κανονισμούς. Ακόμη, ενδέχεται να απαιτήσει διορθωτικές ενέργειες σχετικά με τον υπό εκάστοτε εξοπλισμό, εντός καθορισμένου χρονικού περιθωρίου, να επιβάλει πρόστιμα ή ακόμη και να εμποδίσει τον απόπλου σε πλοία που εκτιμάται ότι έχουν ελαττώματα με ενδεχόμενες δυσμενείς επιπτώσεις στη ζωή ή στο περιβάλλον, κάτι που δεν είναι συχνό και φέρει μεγάλο κόστος και ζημιά φήμης στην ναυτιλιακή εταιρεία και τους ναυλωτές του πλοίου της.

Συνοψίζοντας, οι επιθεωρήσεις, ζητούνται ή διενεργούνται από τους νηογνώμονες, το κράτος σημαίας, το Port State Control, την ασφαλιστική εταιρεία του εκάστοτε πλοίου ή μετά από εντολή του πλοιοκτήτη και της ναυτιλιακής του εταιρείας. Στις περισσότερες περιπτώσεις που αφορούν εξωτερικά αιτήματα, οι επιθεωρήσεις διενεργούνται για να πιστοποιηθεί ότι το πλοίο είναι πλήρως λειτουργικό και χωρίς σημαντικά κατασκευαστικά και μηχανικά προβλήματα και κατά συνέπεια ολοκληρώνονται με τη χορήγηση ή ανανέωση σειράς πιστοποιητικών. Οι επιθεωρήσεις που γίνονται μετά από απαίτηση εντολή του πλοιοκτήτη και της ναυτιλιακής του εταιρείας στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του πλοίου και του εξοπλισμού του, αποτρέποντας παράλληλα ελαττώματα, δυσλειτουργίες ή ζημιές. Το πιο συνηθισμένο σχέδιο επιθεώρησης είτε ζητείται εξωτερικά είτε από τον ίδιο τον πλοιοκτήτη, βασίζεται στο χρόνο και γίνεται ανά προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Σύμφωνα με αυτή την παραδοσιακή προσέγγιση, οι επιθεωρήσεις σχεδιάζονται με βάση το χρόνο από την προηγούμενη επιθεώρηση ή τις ώρες λειτουργίας του κάθε υπό εξέταση συστήματος αντίστοιχα. Τα διαστήματα μεταξύ των χρονικών σημείων, ειδικά στην πρώτη περίπτωση, δεν καθορίζονται από τον χειριστή. Ορίζονται

με βάση τους κανόνες που παρέχονται από τον αντίστοιχο οργανισμό ή τον κατασκευαστή, με βάση την εμπειρία λειτουργίας του εκάστοτε εξοπλισμού και τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα.

Τις τελευταίες δεκαετίες, νέες, εναλλακτικές προσεγγίσεις τείνουν να αλλάζουν τις τάσεις στον σχεδιασμό επιθεώρησης (Arunraj and Maiti, 2007). Ειδικότερα, ο συνδυασμός σχεδιασμού επιθεώρησης με το σχεδιασμό συντήρησης μπορεί να οδηγήσει σε πιο αποδοτικό χρονοπρογραμματισμό, ελαχιστοποίηση του κόστους και αύξηση της αξιοπιστίας. Αυτές οι νέες προσεγγίσεις εντάσσονται στο Condition Based Inspection – CBI και Risk Based Inspection – RBI. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το σχέδιο επιθεώρησης καθορίζεται σύμφωνα με κριτήρια κατάστασης λειτουργίας και αξιολόγησης του κινδύνου αντίστοιχα, με στόχο χαμηλότερο κόστος και αποτελεσματικότερη συντήρηση. Επιπρόσθετα, εισάγονται προηγμένες μέθοδοι με διαδικτυακή παρακολούθηση της κατάστασης, που επιτρέπουν συνεχή ροή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση των κατασκευών και των μηχανημάτων. Κατ' αυτό τον τρόπο, οι ενέργειες συντήρησης καθοδηγούνται έγκαιρα. Ωστόσο, ένα μειονέκτημα των προσεγγίσεων αυτών είναι το αυξημένο κόστος ανάπτυξης και εφαρμογής τέτοιων διαδικτυακών διαγνωστικών συστημάτων, γεγονός που δυσκολεύει την υιοθέτησή τους από τη θαλάσσια βιομηχανία σε μεγάλη κλίμακα.

3.2.3 Συντήρηση και σχεδιασμός συντήρησης

Όλοι οι τύποι μηχανημάτων ή κατασκευών πρέπει να συντηρούνται καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, έως ότου δεν είναι πλέον σε θέση να εξυπηρετήσουν τον σκοπό τους. Κατά συνέπεια, η συντήρηση είναι απαραίτητη για όλα τα συστήματα και τις δομές επάνω στο πλοίο, προκειμένου αυτό να διατηρηθεί πλήρως λειτουργικό. Οι ενέργειες συντήρησης, παρόμοια με τις επιθεώσεις, μπορεί να καθορίζονται από τον κατασκευαστή, ειδικά εάν αφορούν μηχανήματα, από τον νηογνώμονα και το κράτος σημαίας, βάσει μιας σειράς συμβάσεων και κανονισμών, ή μπορεί να έχουν οδηγίες από τον πλοιοκτήτη για αύξηση αποτελεσματικότητας και βιωσιμότητας.

Πίσω στα πρώτα χρόνια της σύγχρονης ναυτικής και ναυτιλιακής βιομηχανίας, η συντήρηση ήταν λιγότερο σημαντική λόγω της απλότητας των δομών και της έλλειψης μεθόδων πρόβλεψης, που σήμαινε επίσης μικρό αντίκτυπο στο συνολικό κόστος. Σήμερα, η πρόοδος στη συντήρηση έχει επηρεαστεί από την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των κατασκευών και των μηχανημάτων, την ποικιλία των προϊόντων, την αυξανόμενη συνειδητοποίηση των επιπτώσεων της αστοχίας στο περιβάλλον και την ασφάλεια του προσωπικού (Khan and Haddara, 2003). Πλέον, στη θαλάσσια βιομηχανία, από επιχειρηματική σκοπιά, η συντήρηση μετατρέπεται από προοπτική κέρδους επί του προϋπολογισμού σε επένδυση με στόχο τη συνεχή και αξιόπιστη μεταφορά φορτίου υπό το πρίσμα της διασφάλισης της προστασίας του περιβάλλοντος. Από λειτουργική άποψη από την άλλη, αναδιαρθρώνεται από διορθωτικές σε προληπτικές ενέργειες, περιλαμβάνοντας περισσότερο βαθμό ελέγχου και πληροφόρησης για το εξεταζόμενο μηχάνημα ή σύστημα.

Συχνά, οι ενέργειες συντήρησης ενεργοποιούνται από διαδικασίες επιθεώρησης, ανάλογα με τα αποτελέσματα της έρευνας (Condition Based Maintenance approach). Ωστόσο, η συντήρηση μπορεί να πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από το σχέδιο επιθεώρησης, βάσει προγράμματος συντήρησης. Σκοπός ενός τέτοιου προγράμματος είναι η δημιουργία στρατηγικής που μεγιστοποιεί τη διαθεσιμότητα και την αποτελεσματικότητα του εξοπλισμού, ελέγχει τη φθορά του εξοπλισμού, και είναι βιώσιμη (Ventikos et al., 2022).

Οι κύριες κατηγορίες συντήρησης εξοπλισμού είναι η συντήρηση επιδιόρθωσης εξοπλισμού ή συντήρηση που προκαλείται ως αντίδραση στην αστοχία συστήματος (reactive maintenance) και η προληπτική συντήρηση (preventive maintenance). Η προληπτική, ως πιο εξελιγμένη προσέγγιση, υιοθετείται ευρέως και εφαρμόζεται στα πλοία μέσω του PMS της κάθε εταιρείας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις όπως αυτές διαμορφώθηκαν από τους μηχανικούς που ειδικεύονται στον προγραμματισμό και εφαρμογή πλάνων συντήρησης κατά πάροδο του χρόνου.

3.2.3.1 Διορθωτική συντήρηση (Reactive or Corrective Maintenance – CM)

Αυτός ο τύπος στρατηγικής εφαρμόστηκε αρχικά σε εργοστάσια, στις αρχές της δεκαετίας του 1940 (Arunraj and Maiti, 2007). Περιγράφεται από τη δήλωση «διορθώστε το όταν σπάσει» (“fix it when it breaks”) εκφράζοντας το χαρακτήρα της ως τρόπος αντίδρασης/διόρθωσης. Είναι μια προσέγγιση συντήρησης ρουτίνας, που επικεντρώνεται στην αντικατάσταση ενός εξαρτήματος αφού υποστεί βλάβη. Αυτή η στρατηγική συντήρησης έχει πλέον περιοριστεί, όσον αφορά την εφαρμογή της, λόγω της αναποτελεσματικής φύσης της, τόσο οικονομικά όσο και από άποψη απόδοσης. Η κύρια αδυναμία αυτής της στρατηγικής είναι η έλλειψη σχεδιασμού, με αποτέλεσμα την επιδιόρθωση μεν των εμφανών αστοχιών, αγνοώντας δε τις βαθύτερες αιτίες τους (Mobley, 2008). Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι αυτή η προσέγγιση κρίνεται κατάλληλη για κατασκευές με κόστος επισκευής ή αντικατάστασης αρκετά χαμηλό ώστε να καθιστά περιττή την ενδιάμεση συντήρησή τους. Για περίπλοκα συστήματα με σημαντικά υψηλό κόστος επισκευής ή αντικατάστασης, όπως πολύπλοκα ναυτικά μηχανήματα (π.χ. μηχανισμός πρόωσης, ενέργεια ή μηχανισμός πηδαλιουχίας), αυτού του είδους η συντήρηση πλέον αποκλείεται από τις πρακτικές μίας άρτιας ναυτιλιακής εταιρείας.

3.2.3.2 Προληπτική Συντήρηση (Preventive Maintenance – PM)

Η επόμενη γενιά στρατηγικών συντήρησης που προσδιορίζονται ως Preventive Maintenance εισάγεται στις αρχές της δεκαετίας του 1950 (Arunraj and Maiti, 2007). Κατατάσσεται ως το πρώτο πρόγραμμα διαχείρισης με βάση το χρόνο, που οργανώνεται σε προκαθορισμένες περιόδους στοχεύοντας στην ικανοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων. Ως εκ τούτου, η προληπτική συντήρηση σκοπεύει να μειώσει την πιθανότητα αστοχίας εξαιτίας της φθοράς του εξοπλισμού. Η προληπτική συντήρηση προσπαθεί να διασφαλίσει τη λειτουργία μέσω μιας σειράς ενεργειών συντήρησης, οι οποίες μπορούν να αποτρέψουν με αποτελεσματικότητα την αστοχία. Μπορεί να αναλυθεί σε προσεγγίσεις που βασίζονται στο χρόνο, σε συνθήκες και σε κίνδυνο, καθεμία με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Συντήρηση βάσει κανόνων (Rule-based Maintenance) ή βάσει χρόνου (Time-based Maintenance)

Ένα είδος προληπτικής συντήρησης, στο οποίο οι ενέργειες συντήρησης πραγματοποιούνται σε προκαθορισμένα χρονικά σημεία, με συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα μεταξύ τους. Τα χρονικά διαστήματα καθορίζονται από τον κατασκευαστή, με στόχο τη διασφάλιση της λειτουργίας, ή από τον νηογνώμονα και το κράτος σημαίας, με στόχο την συμμόρφωση σε διεθνείς συμβάσεις και κανονισμούς. Συχνά, η προσέγγιση αυτή επικρίνεται για την επιβολή περιττών ενεργειών, οι οποίες διακόπτουν την κανονική λειτουργία και προκαλεί προβλήματα λόγω χαμένου χρόνου λειτουργίας. Παρόλα αυτά, εξακολουθεί να είναι η στρατηγική που προτιμάται για τα περισσότερα συστήματα και δομές (Khan & Haddara, 2003).

Συντήρηση βάσει συνθηκών (Condition-based maintenance – CBM)

Σε αυτή την περίπτωση, οι αποφάσεις για τη συντήρηση βασίζονται στην κατάσταση του εξοπλισμού ή του εξαρτήματος, ώστε να αποφευχθεί από τη μία η άσκοπη αντικατάσταση λόγω προληπτικής συντήρησης ή από την άλλη η ανάγκη λήψης απροσδόκητων διορθωτικών ενεργειών (Lazakis, 2011). Η κατάσταση μπορεί να παρακολουθείται διαδικτυακά, επιτρέποντας συνεχή ροή δεδομένων, διευκολύνοντας έτσι τη λήψη αποφάσεων για τις ενέργειες συντήρησης (π.χ. ανάπτυξη προγράμματος CEON από την MAN για την παρακολούθηση των καίριων παραμέτρων λειτουργίας της κύριας μηχανής του πλοίου).

Συντήρηση με επίκεντρο την αξιοπιστία (Reliability Centered Maintenance – RCM)

Η συγκεκριμένη προσέγγιση προσφέρει μια αποτελεσματική στρατηγική για προληπτική συντήρηση (Selvik and Aven, 2011). Η αξιοπιστία καθορίζει τη συντήρηση, σύμφωνα με τα ευρήματα σχετικά με το επίπεδο αξιοπιστίας ενός συστήματος ή εξαρτήματος, που μοντελοποιείται και ποσοτικοποιείται. Η συντήρηση με επίκεντρο την αξιοπιστία χρησιμοποιείται ευρέως για τη συντήρηση μηχανημάτων, γενικότερα στα πεδία της μηχανικής και ακόμη και στη θαλάσσια βιομηχανία.

Συντήρηση με γνώμονα το ρίσκο (Risk Based Maintenance – RBM)

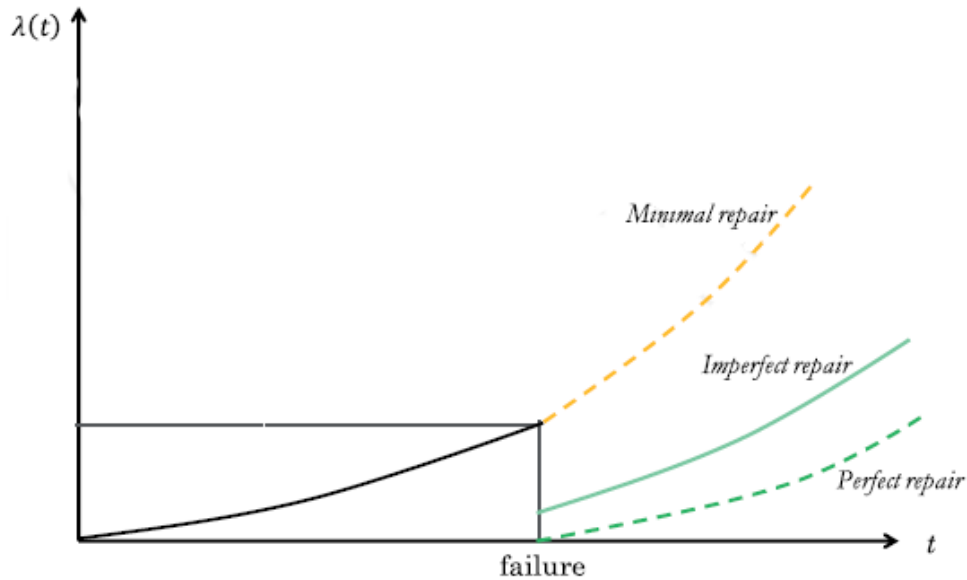
Αυτή η εναλλακτική προσέγγιση βασίζεται στην ανάλυση ρίσκου. Οι ενέργειες συντήρησης ενεργοποιούνται στην περίπτωση υψηλού προβλεπόμενου ρίσκου. Οι στρατηγικές συντήρησης αναπτύσσονται με βάση σενάρια ανάλυσης κινδύνων, προκειμένου να ελέγχεται το επίπεδο ρίσκου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός συστήματος ή εξαρτήματος. Επισημαίνεται ως προληπτική μέθοδος συντήρησης, καθώς η πιθανολογική προσέγγιση λόγω του ρίσκου είναι κύριο χαρακτηριστικό της (Cullum et al., 2018).

3.2.3.3 Ατελής Συντήρηση (Imperfect Maintenance – IM)

Εκτός από την προαναφερθείσα ταξινόμηση των δραστηριοτήτων συντήρησης σε προληπτικές και διορθωτικές - τις τελευταίες δεκαετίες, μια νέα προσέγγιση εμφανίστηκε στη βιβλιογραφία σχετικά με το βαθμό αποκατάστασης του συστήματος μετά από ενέργειες επιθεώρησης και συντήρησης (Carlo et al., 2016). Η ατελής συντήρηση είναι ένας τρόπος προσέγγισης των μοντελοποιήσεων της αποτελεσματικότητας της συντήρησης που αναπτύχθηκε τις τελευταίες δεκαετίες, και ορίζεται ως μια ενέργεια μετά την οποία το σύστημα βρίσκεται σε μια κατάσταση κάπου μεταξύ μιας κατάστασης «καλού σαν καινούργιου» (As Good As New-AGAN) και της προ συντήρησης κατάστασης «κακού και φθαρμένου» (As Bad As Old-ABAO).

Η πρωταρχική προσέγγιση προς την απόδοση του φαινομένου υπολογιστικά, είναι πως η ατελής συντήρηση αντικατοπτρίζεται ως το ποσοστό κατά το οποίο ένα σύστημα επιστρέφει στην ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ AGAN και ABAO (Nakagawa, 1980). Ακολούθησαν πολυάριθμες έρευνες μέχρι και σήμερα, με αποδεκτό γεγονός στον τομέα της μηχανικής ότι μετά τη συντήρηση μία ρεαλιστική προσέγγιση είναι πως το εκάστοτε μηχανήμα επιστρέφει σε μία κατάσταση ενδιάμεση «όχι καινούριο – όχι παλιό», δηλαδή σε μία ηλικία πρότερη της στιγμής που εκτελέστηκε η συντήρηση (Gong et al., 2022). Η προσέγγιση της ατελούς συντήρησης είναι των Whang και Pham (1996), που υποστηρίζουν ότι μετά την συντήρηση ή επισκευή, ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του εξοπλισμού θα μειωθεί κατά ένα ποσοστό της υπολειπόμενης ζωής που είχε στο αμέσως προηγούμενο χρονικό σημείο πριν τη συντήρηση. Ακόμα μία προσέγγιση είναι εκείνης των Chan και Shaw (1993) που προτείνουν την ελάττωση του ρυθμού αστοχίας (failure rate) του εξοπλισμού κατά ένα ποσοστό αμέσως μετά τη συντήρηση (Σχήμα

3.5). Αναλόγως του συντελεστή μείωσης του ρυθμού αστοχίας, η συντήρηση είναι τέλεια, ατελής ή σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο.



Σχήμα 3.5 Τύποι Ατελούς Συντήρησης σύμφωνα με τη θεωρία του συντελεστή μείωσης

3.3 Επιθεώρηση και συντήρηση με γνώμονα τον Ρίσκο

Αρκετές από τις μεθόδους σχεδιασμού επιθεώρησης και συντήρησης που παρουσιάστηκαν υιοθετούνται ευρέως από τη θαλάσσια βιομηχανία και προτιμώνται σε πολλούς κλάδους της. Ωστόσο, οι μέθοδοι σχεδιασμού επιθεώρησης και συντήρησης με βάση το ρίσκο φαίνονται αρκετά υποσχόμενες και δείχνουν αυξανόμενη αποτελεσματικότητα. Η σύγκρισή τους τις με άλλες μεθόδους σχεδιασμού επιθεώρησης και συντήρησης είναι απαραίτητες για την κατανόηση της αξίας και του δυναμικού τους. Οι τελικοί στόχοι της μεθοδολογίας RBI είναι παρόμοιοι με αυτούς των υπόλοιπων προσεγγίσεων. Οι στόχοι αυτοί είναι οι ακόλουθοι (Tan et al., 2011):

1. Η διασφάλιση της ακεραιότητας και την αύξηση της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας των συστημάτων μέσα από τη λήψη απαραίτητων ενεργειών.
2. Η αντικατάσταση προσεγγίσεων που βασίζονται στον χρόνο, οι οποίες τείνουν να είναι ανεπαρκείς στην πρόβλεψη αστοχίας ή τείνουν να οδηγούν σε περιττές επιθεωρήσεις και συντηρήσεις.
3. Η παροχή οικονομικών ωφελειών μέσω υλοποίησης λιγότερων επιθεωρήσεων και συντηρήσεων.
4. Η δραστική μείωση του κινδύνου αποτυχίας που είναι μη-αποδεκτός για εταιρείες και οργανισμούς.

3.3.1 Εισαγωγή στις μεθόδους Επιθεώρησης και Συντήρησης με γνώμονα το Ρίσκο (Risk Based Inspection – RBI)

Η έννοια των μεθοδολογιών RBI συνοψίζεται σε δύο κύριες διεργασίες(API, 2009).

- Εκτίμηση του ρίσκου ώστε να ιεραρχηθούν οι επιθεωρήσεις των υποσυστημάτων σε αυτές που φέρουν το μεγαλύτερο/μικρότερο ρίσκο σε περίπτωση αποτυχίας τους
- Ανάλυση ρίσκου για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό επιθεωρήσεων και ενεργειών συντήρησης.

Πρώτον, η ιεράρχηση των επιθεωρήσεων με βάση την κρισιμότητα του εξοπλισμού, άρα του ρίσκου που αυτό φέρει προς το ολικό σύστημα, μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή εάν το ρίσκο υιοθετηθεί ως δείκτης για την αποσαφήνιση της προτεραιότητας συντήρησης σε ένα μηχανολογικό σύστημα σε κίνδυνο (Sakai, 2009). Πιο αναλυτικά, μετά τη μοντελοποίηση ενός συστήματος σε επιμέρους υποσυστήματα ή εξαρτήματα, εφαρμόζεται η μέθοδος σε κάθε εξάρτημα και μέσω αναγνώρισης αστοχιών και εκτίμησης ρίσκου, πραγματοποιείται η απαραίτητη ιεράρχηση τους. Αυτή η ιεράρχηση υποδεικνύει τα εξαρτήματα με το υψηλότερο ρίσκο. Έτσι, οι πιο συχνές επιθεωρήσεις και οι ενέργειες συντήρησης γίνονται προκειμένου να αποφευχθεί ή να μετριαστεί ο κίνδυνος για αυτά τα εξαρτήματα, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για την ακεραιότητα του συστήματος.

Η ανάλυση ρίσκου χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του κινδύνου αστοχίας για ολόκληρο το σύστημα ή οποιοδήποτε μεμονωμένο στοιχείο (Ventikos et al., 2018). Με αυτές τις διαθέσιμες πληροφορίες, δημιουργείται ένα αποτελεσματικό σχέδιο επιθεωρήσεων ή/και ενεργειών συντήρησης, για τον έλεγχο των επιπέδων κινδύνου ώστε να μη φτάσουν αρκετά υψηλά για να απειλήσουν την ακεραιότητα του συστήματος.

Πρέπει να υπογραμμιστεί πως οι προσεγγίσεις με γνώμονα το ρίσκο έχουν μεγάλες προοπτικές λόγω της ανάπτυξης της επιστήμης ανάλυσης δεδομένων και του προγραμματισμού μάθησης των υπολογιστών/τεχνητής νοημοσύνης. Πιο συγκεκριμένα, σήμερα ένας μεγάλος όγκος ιστορικών δεδομένων από βιομηχανίες μηχανογραφείται μέρα με τη μέρα, κάτι που μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμο στην ποσοτικοποίηση της πιθανότητας αστοχίας και σε δεύτερο στάδιο ρίσκου, στα ερευνητικά μοντέλα, ενώ η τεχνητή νοημοσύνη προσφέρει έναν τρόπο αξιοποίησης αυτών των ιδιαίτερα μεγάλων συνόλων δεδομένων για προγνωστικά μοντέλα. Έτσι, καθώς τα δεδομένα γίνονται πιο αξιόπιστα και διαθέσιμα, οι προσεγγίσεις που βασίζονται στον κίνδυνο κερδίζουν έδαφος απέναντι στις παραδοσιακές μεθόδους. Επιπλέον, οι μέθοδοι RBI μπορούν να ποσοτικοποιηθούν όχι μόνο με βάση παλαιότερα σύνολα δεδομένων, αλλά και από τρέχοντα δεδομένα που προέρχονται από καθημερινή παρακολούθηση (Cullum et al., 2018). Αυτό το πλεονέκτημα, μέσω του προγραμματισμού βάσης τεχνητής νοημοσύνης, μπορεί να οδηγήσει σε μία εξελιγμένη και ευέλικτη ιεράρχηση των διαφορετικών επιθεωρήσεων που διέπουν ένα σύστημα ή ακόμα και του γενικότερου σχεδιασμού επιθεώρησης και συντήρησης (Sakai, 2009). Με άλλα λόγια, οι μεθοδολογίες RBI μπορούν να προσαρμοστούν, ανταποκρινόμενες σε κάθε νέα πληροφορία που ανανεώνει το μοντέλο πρόβλεψης, κάτι που δεν ήταν διαθέσιμο μέχρι και μερικά χρόνια πριν που δεν ήταν ανεπτυγμένα τα μοντέλα και οι μεθοδολογίες ομαδοποίησης και ανάλυσης μεγάλου όγκου και βάσεων δεδομένων.

Επιπλέον, για τις μεθοδολογίες RBI, υπάρχουν δύο μεμονωμένες προσεγγίσεις που σχετίζονται με την ανατροφοδότηση που μπορεί να δώσει ένα σύστημα. Αυτές οι προσεγγίσεις είναι (Ventikos et al, 2022):

- Διαδικτυακά μοντέλα (online)

- Μοντέλα εκτός σύνδεσης (offline)

Σε ένα διαδικτυακό μοντέλο, είναι διαθέσιμη μια σταθερή ροή δεδομένων, πιθανότητας αποτυχίας σε μεθοδολογίες που βασίζονται στο ρίσκο ή άλλων παρακολουθούμενων μεταβλητών. Η ροή αυτή μπορεί να ανατροφοδοτήσει το μοντέλο με νέα στοιχεία που αναδιαμορφώνουν τον σχεδιασμό επιθεώρησης ή συντήρησης ή την ιεράρχηση της σημαντικότητας των εξαρτημάτων.

Σε ένα μοντέλο εκτός σύνδεσης, δεν είναι δυνατή η συνεχής ανάδραση, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο δεν μπορεί να αναδιαμορφωθεί με το πέρας του χρόνου. Επομένως, εξαρτάται από την αρχική ποσοτικοποίηση. Παρόλο που ένα offline μοντέλο φαίνεται λιγότερο αποτελεσματικό, πρέπει να έχουμε κατά νου το εξαιρετικά υψηλό κόστος των online μοντέλων, γεγονός που καθιστά δύσκολη την υιοθέτησή τους. Έτσι, εάν υπάρχουν διαθέσιμα αξιόπιστα σύνολα δεδομένων, τα μοντέλα εκτός σύνδεσης μπορούν να είναι μια καλή λύση για τον προγραμματισμό επιθεώρησης και συντήρησης ή την ιεράρχηση των εξαρτημάτων.

Αν και τα συνεχούς ανανέωσης μοντέλα είναι δύσκολο να υιοθετηθούν, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι με τον καιρό αυτά τα μοντέλα θα μπορέσουν να γίνουν περισσότερο προσβάσιμα. Εάν συνδυαστούν με τα οφέλη της τεχνητής νοημοσύνης/μηχανικής μάθησης (Cullum et al., 2018), οι προσεγγίσεις που βασίζονται στον κίνδυνο ενδέχεται να εξελιχθούν σε μια εξαιρετικά αποτελεσματική λύση για τη συντήρηση, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής των συστημάτων.

3.3.1.1 Διαχείριση γνώσης μέσω των μεθόδων συντήρησης και επιθεώρησης που βασίζονται στο ρίσκο

Οι περισσότερες μέθοδοι επιθεώρησης και συντήρησης συμβάλλουν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Είναι προφανές ότι η λήψη αποφάσεων είναι ευθύνη του πιο έμπειρου προσωπικού, το οποίο με βάση αυτή την εμπειρία του θα μπορούσε να αποφασίσει για το τι είναι βέλτιστο, τι πρέπει να επιθεωρηθεί ή να συντηρηθεί και σε τι πρέπει να δοθεί προτεραιότητα για να διατηρηθεί η ασφάλεια (Sakai, 2009). Μέχρι και σήμερα, στους περισσότερους τομείς της βιομηχανίας, το πιο έμπειρο και υψηλά καταρτισμένο προσωπικό ενός οργανισμού είναι αυτό που λαμβάνει τις αποφάσεις. Ωστόσο, με τον καιρό, αυτό το έμπειρο προσωπικό σταδιακά αποσύρεται και οι αντικαταστάτες τους δεν έχουν την απαραίτητη εμπειρία, τουλάχιστον για κάποιο χρονικό διάστημα, ώστε να αντιμετωπίσουν τις καθημερινές προκλήσεις των νέων καθηκόντων τους. Αυτή η κατάσταση μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα οικονομικής και όχι μόνο φύσεως στους οργανισμούς. Η προτεινόμενη λύση είναι να αντληθεί την τεχνογνωσία, να μετατραπεί σε γραπτή γνώση και σταδιακά να μεταφερθεί στην επόμενη γενιά στελεχών. Η μεγάλη δυσκολία σε αυτή τη διαδικασία είναι το γεγονός ότι το έμπειρο προσωπικό παίρνει αποφάσεις ασυνείδητα, ενώ δυσκολεύεται να εκφράσει τις αρχές στις οποίες βασίζονται αυτές οι αποφάσεις.

Θα ήταν χρήσιμο να εξηγηθεί αυτή η διαδικασία λήψης αποφάσεων μέσω ενός κριτηρίου που να συνδυάζει την πιθανότητα ενός κινδύνου και τον αντίκτυπό του. Η πρώτη εστίαση σε αυτή την εξήγηση, έγινε στον χρηματοοικονομικό τομέα, εισάγοντας την έννοια του ρίσκου μιας επένδυσης. Έτσι, σε άλλους τομείς, όπως η μηχανική, ο κίνδυνος μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων, εφόσον η εμπειρία του πιο έμπειρου προσωπικού θα μπορούσε να

ποσοτικοποιηθεί και να αξιοποιηθεί έτσι στη διεργασία διαχείρισης ρίσκου. Με άλλα λόγια, η αξιολόγηση του ρίσκου στο μυαλό των έμπειρων στελεχών θα μπορούσε να μεταφραστεί σε κατευθυντήριες γραμμές που θα αποτελέσουν υλικά για τη μεταφορά δεξιοτήτων στην επόμενη γενιά. Αυτό το γεγονός αποτελεί ένα ακόμη όφελος της μεθοδολογίας RBI.

3.3.2 Σύγκριση Επιθεώρησης και Συντήρησης με γνώμονα το Ρίσκο με προϋπάρχουσες προσεγγίσεις

Καθεμία από τις προσεγγίσεις συντήρησης που βασίζονται στον χρόνο, τις συνθήκες και την αξιοπιστία, καθώς και οι μέθοδοι επιθεώρησης βάσει χρόνου και συνθηκών έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Με την αυξανόμενη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, οι προσεγγίσεις που βασίζονται στον κίνδυνο ενδέχεται να προτιμώνται από τις υπόλοιπες αυτές προσεγγίσεις. Μέσω της μελέτης σχετικής βιβλιογραφίας, οι βασικές διαφορές είναι εμφανείς και παρατίθενται στον Πίνακα 3.2 σύμφωνα με την ακόλουθη ανάλυση και σύγκριση.

Πίνακας 3.2 Σύγκριση των προσεγγίσεων με γνώμονα το ρίσκο σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους

Προσεγγίσεις Επιθεώρησης και Συντήρησης	Μειονεκτήματα σε σχέση με τις προσεγγίσεις με βάση το ρίσκο (RBI)
Προσεγγίσεις με βάση το χρόνο (Time Based Methods – TBM)	Δυσκολίες στην πρόβλεψη αποτυχίας και αύξηση του κόστους λόγω περιττών ενεργειών.
Προσεγγίσεις με βάση την κατάσταση (Condition Based Methods – CBM)	Δεν περιλαμβάνουν την έννοια του επιπέδου αποτυχίας, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματική ιεράρχηση.
Προσεγγίσεις με επίκεντρο την αξιοπιστία (Reliability Centered Methods – RCM)	Αγνοούν τις εξαρτήσεις αποτυχίας μεταξύ των στοιχείων του συστήματος, με αρνητικές συνέπειες στη διαδικασία αξιολόγησης του ρίσκου.

Πρώτον, η παραδοσιακή time-based μέθοδος υπήρξε αναμφίβολα η κύρια προσέγγιση για μια σειρά βιομηχανιών μέχρι και σήμερα. Ειδικά όταν το κόστος επισκευών ή αντικαταστάσεων είναι χαμηλό, η time-based μέθοδος φαίνεται να είναι η καταλληλότερη. Καθώς όμως η τεχνολογία προχωρά, τα συστήματα γίνονται ολοένα πιο εξελιγμένα και χρειάζονται μια πιο αποτελεσματική προσέγγιση επιθεώρησης και συντήρησης. Σήμερα, σε πολλούς τομείς, λόγω του υψηλού κόστους επισκευής, οι επιθεωρήσεις και η συντήρηση βάσει χρόνου έχουν δύο σοβαρά μειονεκτήματα (Ventikos et al., 2018). Πρώτον, αν και οι αποφάσεις ανά διαστήματα βασίζονται σε αναλυτική έρευνα και δοκιμές, η συμπεριφορά των σημερινών περίπλοκων συστημάτων μπορεί να μην ανταποκρίνεται στις προβλέψεις και έτσι τα συστήματα οδηγούνται σε αποτυχία λόγω λανθασμένου σχεδιασμού επιθεώρησης. Για την αντιμετώπιση του μειονεκτήματος αυτού, συχνά υιοθετούνται συχνοί έλεγχοι και ενέργειες συντήρησης ανά μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτό αποτελεί και το δεύτερο μειονέκτημα, καθώς καταλήγει σε περιττό όγκο επιθεωρήσεων ή/και ενεργειών συντήρησης. Έτσι αυξάνεται το κόστος τόσο από τη διαδικασία επιθεώρησης και συντήρησης όσο και από τη διακοπή λειτουργίας του συστήματος.

Αυτά τα μειονεκτήματα δείχνουν την κατεύθυνση της εφαρμογής μιας άλλης μεθόδου, πιο εξελιγμένης, όπως μπορεί να είναι η RBI, με τρόπο αποτελεσματικής πρόβλεψης αστοχίας και μείωσης του κόστους.

Μια άλλη πολλά υποσχόμενη και πολύ γνωστή προσέγγιση είναι η condition-based μέθοδος. Για πολλούς κλάδους της βιομηχανίας είναι αρκετά αποτελεσματική, καθώς η κατάσταση ενός συστήματος ή των στοιχείων ενός συστήματος αποτελούν συχνά αρκετές πληροφορίες για να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν οι ενέργειες επιθεώρησης και συντήρησης. Ειδικά εάν εφαρμοστεί διαδικτυακά, η συνεχής ανάδραση μπορεί να διαφυλάξει την ακεραιότητα, ενώ μειώνει το κόστος αποφεύγοντας περιττές ενέργειες. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα σε σύγκριση με τις προσεγγίσεις RBI είναι ότι δεν περιέχει καμία έννοια του επιπέδου της επίπτωσης του ρίσκου, καθώς μπορεί μόνο να αξιολογήσει την κατάσταση και να προτείνει ενέργειες, προκειμένου να αποφευχθεί η αποτυχία. Οι μεθοδολογίες RBI, ωστόσο, έχουν μια σοβαρή δυσκολία σε σύγκριση με το CBM, καθώς η μοντελοποίηση των συστημάτων και η ποσοτικοποίηση του ρίσκου που απαιτούν είναι πιο δύσκολα υλοποιήσιμες διαδικασίες που φέρουν υψηλό κόστος κατά την πραγμάτωσή τους (API, 2009).

Τέλος, η αξιοπιστία μπορεί επίσης να αποτελέσει κριτήριο για την ιεράρχηση και τον προγραμματισμό επιθεώρησης και συντήρησης μέσω RCM. Σίγουρα περιέχει την έννοια της συνέπειας εισάγοντας την αξιοπιστία και την ασφάλεια του εξοπλισμού, ενώ εισάγεται και η πιθανότητα αστοχίας. Ωστόσο, η RCM, προκειμένου να καθορίσει κρίσιμα στοιχεία του συστήματος, χρησιμοποιεί ανάλυση επιπτώσεων και κρισιμότητας (Failure Mode and Effects Criticality Analysis - FMECA), η οποία αγνοεί τις εξαρτήσεις αποτυχίας των στοιχείων του συστήματος, με αποτέλεσμα αρνητικά αποτελέσματα στη διαδικασία αξιολόγησης ρίσκου (Chemweno et al., 2018). Αντίθετα, τα μοντέλα RBI δημιουργούνται λαμβάνοντας υπόψη τις εξαρτήσεις αποτυχίας, γεγονός που παράγει μια πιο ακριβή μοντελοποίηση.

4. Πιθανότητες και Δίκτυα Πίστεως στην ανάλυση Ρίσκου

4.1 Μαθηματικό υπόβαθρο

4.1.1 Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων

Η ανάλυση ρίσκου, απαιτεί το συνδυασμό ορθών μαθηματικών υπολογισμών και ευρύτερης θεωρητικής γνώσης ώστε να ερμηνευθούν σωστά τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης ενός συστήματος για την μελέτη του ρίσκου που αυτό ενέχει. Η χρήση της στατιστικής έχει αποβεί αναπόσπαστο κομμάτι της ανάλυσης ρίσκου και αποτελεί ερευνητικό εργαλείο που παρέχει τα απαραίτητα εφόδια στους ερευνητές ώστε αυτοί να εξάγουν αβέβια αλλά ταυτόχρονα κοντά στην πραγματικότητα συμπεράσματα για πολύπλοκα συστήματα (Aven, 2012). Η στατιστική, σαν μια μέθοδος λήψης απόφασης κάτω από συνθήκη αβεβαιότητας, βασίζεται στη θεωρία πιθανοτήτων, αφού πιθανότητα είναι ένα μέτρο της αβεβαιότητας και των ρίσκων που σχετίζονται με αυτή. Προτού αναλυθούν οι στατιστικές διαδικασίες απόφασης απαιτείται η γνώση της θεωρίας των πιθανοτήτων (Ζιούτας, 2014). Η μαθηματική στατιστική διαχωρίζεται στη συμβατική, η οποία συνδυάζει την προσέγγιση συχνότητας με μεθόδους πιθανοτήτων, και στη Μπεϋζιανή στατιστική, η οποία συνδυάζει τα αποτελέσματα ενός πειράματος με προγενέστερη πληροφορία ώστε να εξαχθούν οι πιθανότητες αποτελεσμάτων μελλοντικών πειραμάτων (Leonard & Hsu, 1999).

Η Μπεϋζιανή στατιστική διέπεται από τα αξιώματα της θεωρίας πιθανοτήτων, είναι εύληπτη και κατανοητή καθώς η βάση της, και σε συνέχεια η βάση των Μπεϋζιανών Δικτύων (Bayesian Networks – BN) αποτελείται από την έννοια της κλασικής πιθανότητας, δηλαδή της δυνατότητας κάτι αβέβαιο να συμβεί. Οι τιμές που παίρνει είναι μεταξύ 0 και 1, και μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις διακεκριμένους τύπους:

- Την εκ των προτέρων ή κλασική πιθανότητα: Αφού καθοριστεί το πλήθος των δυνατών αποτελεσμάτων, έστω n , αυτή η μέθοδος δίνει $1/n$ πιθανότητα σε κάθε ένα από αυτά.
- Την πιθανότητα συχνοτήτων ή εμπειρική πιθανότητα: Η οποία προκύπτει αφού εκτελεστεί ένα πείραμα για αρκετές φορές, και είναι το πηλίκο του αριθμού των πρόσφορων περιπτώσεων προς τον συνολικό αριθμό των πιθανών αποτελεσμάτων.
- Την υποκειμενική πιθανότητα: Αυτή διαφέρει από άτομο σε άτομο καθώς επηρεάζεται και σχετίζεται άμεσα με την προσωπική άποψη η οποία διαμορφώνεται από ξεχωριστές εμπειρίες του παρελθόντος.

Τα φυσικά φαινόμενα, τα πειράματα, και πιο συγκεκριμένα τα διάφορα επιστημονικά μοντέλα μπορεί να θεωρηθεί πως εντάσσονται σε δύο κατηγορίες:

- Τα αιτιοκρατικά(deterministic) μοντέλα στα οποία οι γνωστές μεταβλητές (π.χ. αρχικές συνθήκες) αρκούν για την ακριβή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων τους
- Τα στοχαστικά(stochastic, probabilistic) μοντέλα στα οποία οι γνωστές μεταβλητές δεν είναι αρκετές για την ακριβή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων τους και χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα η οποία προσεγγίζεται μέσω της θεωρίας των πιθανοτήτων

Οι πιθανότητες αποτελούν το εργαλείο υπολογισμών των Μπεϋζιανών Δικτύων καθώς αυτές αποδίδουν κατάλληλα την αβεβαιότητα των μεταβλητών που τα αποτελούν. Αυτές οι μεταβλητές κατηγοριοποιούνται σε διακριτές και συνεχείς οι οποίες αντιστοιχούν σε μια τιμή η οποία

μεταβάλλεται ανάλογα τις συνθήκες. Διακριτή είναι αν το πεδίο τιμών της είναι πεπερασμένο και παίρνει ξεχωριστές τιμές, ενώ χαρακτηρίζεται συνεχής όταν το πεδίο τιμών της αντιστοιχεί στο άπειρο και παίρνει οποιαδήποτε τιμή.

4.1.2 Βασικές έννοιες της θεωρίας πιθανοτήτων

Το σύνολο των δυνατών αποτελεσμάτων ενός πειράματος το οποίο δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα, ονομάζεται δειγματικός χώρος και συμβολίζεται με «Ω». Ένα σύνολο πιθανών αποτελεσμάτων του πειράματος αυτού, ονομάζεται ενδεχόμενο και συμβολίζεται συνήθως με κεφαλαία γράμματα π.χ. «Α», «Ε».

Η τιμή των πιθανοτήτων, όπως προαναφέρθηκε, κυμαίνεται ανάμεσα στο 0 και 1 και υποδηλώνει το ποσοστό για ένα ενδεχόμενο «Α» να συμβεί και συμβολίζεται με $P(A)$. Μπορεί να οριστεί η πιθανότητα ενός ενδεχομένου σε σχέση με τη σχετική συχνότητά του (Ross, 2010). Ορίζεται ως $n(A)$ ως ο αριθμός που δείχνει πόσες φορές συμβαίνει το ενδεχόμενο Α στις πρώτες n επαναλήψεις του πειράματος. Τότε, το $P(A)$, δηλαδή η πιθανότητα του ενδεχομένου Α, ορίζεται ως:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n(A)}{n} \text{ (ορισμός πιθανότητας κατά Von Mises)} \quad (4.1)$$

Αν Α και Β είναι δύο ενδεχόμενα του ίδιου δειγματικού χώρου, συμβολίζεται με $P(A|B)$ η υπό συνθήκη ή δεσμευμένη πιθανότητα του να συμβεί του Α, δεδομένου ότι έχει συμβεί το ενδεχόμενο Β. Η από κοινού πιθανότητα δυο ενδεχομένων Α και Β συμβολίζεται με $P(A,B)$ και είναι η πιθανότητα να συμβεί το ενδεχόμενο Α σε συνδυασμό με την ταυτόχρονη πραγματοποίηση του ενδεχομένου Β. Η διαφορά τους είναι πως ο δειγματικός χώρος στην $P(A|B)$ δεσμευμένη πιθανότητα, έχει ελαττωθεί από το Ω στο Β. Η δεσμευμένη πιθανότητα του Α δεδομένου ότι έχει συμβεί το Β ορίζεται ως εξής:

$$P(A|B) = \frac{P(A,B)}{P(B)} \quad (4.2)$$

Ο υπολογισμός της υπό συνθήκη πιθανότητας $P(A|B)$ μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Άμεσα, υπολογίζοντας την πιθανότητα του γεγονότος Α με την κλασική θεωρία συρρικτώνοντας τον δειγματικό χώρο από S σε Β.
- Χρησιμοποιώντας τον ορισμό (4.2), όπου οι πιθανότητες των γεγονότων Α,Β και Β υπολογίζονται σε σχέση με τον αρχικό δειγματικό χώρο Ω.

Η σημαντικότερη συνέπεια του ορισμού της δεσμευμένης πιθανότητας οδηγεί στην παρακάτω θεμελιώδη εξίσωση των πιθανοτήτων, γνωστή και ως πολλαπλασιαστικό θεώρημα. Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πιθανότητας ταυτόχρονης πραγματοποίησης δύο γεγονότων Α και Β, τα οποία ανήκουν στον ίδιο δειγματικό χώρο Ω:

$$P(A|B)P(B) = P(A, B) \quad (4.3)$$

Υπάρχουν και οι περιπτώσεις που το ενδεχόμενο B δεν επηρεάζει την πιθανότητα πραγματοποίησης του A και αντίστροφα, τότε αυτά τα ενδεχόμενα χαρακτηρίζονται ως ανεξάρτητα μεταξύ τους, και ισχύει το εξής:

$$P(A)P(B) = P(A, B) \quad (4.4A)$$

$$P(A|B) = P(A) \quad (4.4B)$$

Επίσης, εδώ θα πρέπει να οριστεί και η έννοια των ασυμβίβαστων γεγονότων, ή αλλιώς των ενδεχομένων, που η πραγματοποίηση του ενός, αποκλείει την πραγματοποίηση του άλλου. Αυτό σημαίνει πως τα δύο αυτά ενδεχόμενα δεν έχουν κανένα κοινό σημείο ενός δειγματικού χώρου, και άρα δεν μπορούν ποτέ να συμβούν και τα δύο ταυτόχρονα:

$$P(A, B) = 0 \quad (4.5)$$

Ο πολλαπλασιαστικός κανόνας για την πιθανότητα τομής ενδεχομένων A_1, \dots, A_k ενός δειγματικού χώρου Ω είναι ο εξής:

$$P(A_1, A_2, \dots, A_k) = P(A_k | A_1, A_2, \dots, A_{k-1}) P(A_{k-1} | A_1, A_2, \dots, A_{k-2}) \dots \\ \dots P(A_3 | A_1, A_2) P(A_2 | A_1) P(A_1) \quad (4.6)$$

Πριν την αναφορά στην επόμενη σημαντική έννοια της θεωρίας των πιθανοτήτων, θα πρέπει να οριστούν τα ενδεχόμενα που αποτελούν διαμέριση ενός δειγματικού χώρου. Έστω τα B_1, B_2, \dots, B_k . Αυτά αποτελούν διαμέριση του δειγματικού χώρου Ω , αν:

1. Είναι ασυμβίβαστα
2. Το πλήθος τους καταλαμβάνει όλο τον δειγματικό χώρο, B_1 και $B_2 \dots$ και $B_k = \Omega$
3. Η πιθανότητα κάθε B_k είναι μεγαλύτερη του μηδέν για κάθε πιθανή τιμή του k .

Ένας ακόμη θεμελιώδης κανόνας της θεωρίας των πιθανοτήτων είναι ο κανόνας της ολικής πιθανότητας ο οποίος προκύπτει έχοντας την από κοινού πιθανότητα δύο ενδεχομένων A και B, $P(A, B)$ του ίδιου δειγματικού χώρου, μέσω της οποίας υπολογίζεται η πιθανότητα του ενδεχομένου A, $P(A)$. Η σχέση αυτή είναι πολύ χρήσιμη καθώς όταν είναι δύσκολο να εκτιμηθεί άμεσα η πιθανότητα $P(A)$, η πληροφορία πραγματοποίησης των B_k , μπορεί να οδηγήσει στην πιθανότητα $P(A|B_k)$ και εφαρμόζοντας τον κανόνα 4.6 υπολογίζεται ευκολότερα η πιθανότητα το A ως εξής:

$$P(A) = \sum_{B_k} P(A|B_k) = P(A|B_1)P(B_1) + P(A|B_2)P(B_2) + \dots + \\ P(A|B_k)P(B_k) \quad \text{όπου } B_1, B_2, \dots, B_k \text{ ξένα ανά δύο και διαμέριση του } \Omega \quad (4.7)$$

Για την εύληπτη αντιστοίχιση των παραπάνω εννοιών με φυσικά φαινόμενα και καθημερινά μοντέλα, ακολουθεί κατανοητό παράδειγμα (Ζιούτας, 2014):

Παράδειγμα 4.1.2. Μία βιομηχανία αυτοκινήτων προμηθεύεται τους κινητήρες από τρεις διαφορετικές εταιρείες. Από το σύνολο των κινητήρων της βιομηχανίας το 50% προέρχεται από την πρώτη εταιρεία A1, ενώ η δεύτερη A2 και τρίτη A3 προμηθεύουν από 25% εκάστη. Είναι επίσης γνωστό ότι από την πρώτη εταιρεία όλοι οι κινητήρες είναι καλοί, ενώ το ποσοστό των ελαττωματικών για την A2 και A3 είναι 2% και 6%, αντίστοιχα. Ποια είναι η πιθανότητα ότι ένα αυτοκίνητο της βιομηχανίας εξοπλίστηκε με ελαττωματικό κινητήρα;

Ορίζονται τα εξής γεγονότα:

$A_1 = \{\text{ο κινητήρας προέρχεται από την πρώτη εταιρεία}\}$,

$A_2 = \{\text{ο κινητήρας προέρχεται από την δεύτερη εταιρεία}\}$,

$A_3 = \{\text{ο κινητήρας προέρχεται από την τρίτη εταιρεία}\}$,

$B = \{\text{ο κινητήρας είναι ελαττωματικός}\}$.

Από τα δεδομένα του προβλήματος είναι γνωστές οι πιθανότητες:

$$P(A_1)=0.5, P(A_2)=0.25, P(A_3)=0.25$$

$$P(B|A_1)=0, P(B|A_2)=0.02, P(B|A_3)=0.06$$

Το πείραμα τύχης ισοδυναμεί με την τυχαία επιλογή κινητήρα στην βιομηχανία και έλεγχος αυτού. Ως προς την προέλευση του κινητήρα, τα τρία ενδεχόμενα A1, A2, A3 αποτελούν προφανώς διαμέριση του δειγματικού χώρου.

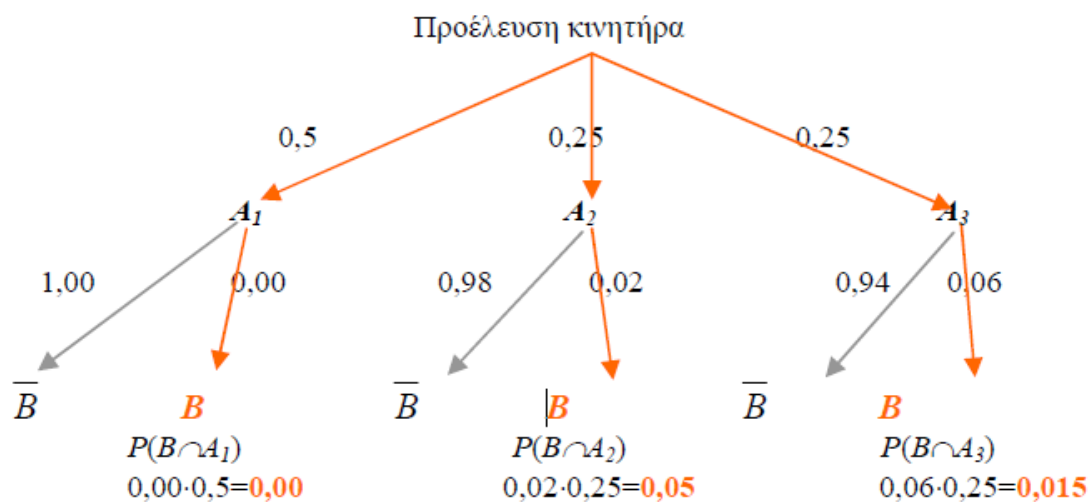
Εφαρμόζοντας τον παραπάνω κανόνα, μπορούμε να γράψουμε για την πιθανότητα του B:

$$P(B) = P(B|A_1)P(A_1) + P(B|A_2)P(A_2) + P(B|A_3)P(A_3)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην τελευταία εξίσωση, η ζητούμενη πιθανότητα είναι:

$$P(B) = 0.5 \cdot 0 + 0.25 \cdot 0.02 + 0.25 \cdot 0.06 = 0.02$$

Η λύση του παραδείγματος παρουσιάζεται πιο εύληπτα και με το εξής διάγραμμα δένδρου:



$$P(B) = 0,00 + 0,05 + 0,015 = 0,02$$

Σχήμα 4.1 Διάγραμμα Δένδρου

4.1.3 Θεώρημα του Bayes

Το θεώρημα ή ο κανόνας Bayes είναι ένα σημαντικό εργαλείο όσον αφορά το χειρισμό της υπό συνθήκης πιθανότητας. Διατυπώθηκε και πήρε το όνομα του από τον μαθηματικό Thomas Bayes. Περιγράφεται ως η μαθηματική φόρμουλα της εκ των υστέρων πιθανότητας και ορίζεται ως εξής:

Αν τα γεγονότα B_1, B_2, \dots, B_k αποτελούν διαμέριση του δειγματικού χώρου Ω , και A είναι ένα γεγονός που σχετίζεται με τον ίδιο χώρο Ω , η υπό συνθήκη πιθανότητα $P(B_k|A)$ ορίζεται από τη σχέση:

$$P(B_k|A) = \frac{P(B_k)P(A|B_k)}{P(A)} \quad k = 1, 2, \dots, i \quad (4.8)$$

Δεδομένου ότι έχει πραγματοποιηθεί το γεγονός A , η φόρμουλα αυτή προσδιορίζει την πιθανότητα πραγματοποίησης ενός γεγονότος της διαμέρισης B_k . Επειδή, ένα και μόνο ένα από τα k γεγονότα της διαμέρισης πραγματοποιείται, η πιθανότητα αυτή εκφράζει την πιθανότητα ότι η πραγματοποίηση του A είχε σαν «αίτιο» την πραγματοποίηση του B_k . Μία εικονογραφημένη παρουσίαση της ολικής πιθανότητας και του θεωρήματος Bayes μπορεί να δοθεί με τα διαγράμματα δέντρου, τα οποία είναι χρήσιμα κατά την ανάλυση προβλημάτων όπως το παράδειγμα 4.1.2. Αποτελεί σημαντικό εργαλείο κατά τη μοντελοποίηση και ανάλυση ρίσκου πολύπλοκων και πολυεπίπεδων συστημάτων μιας και μέσω αυτού, μπορούν να υπολογιστούν πιθανότητες υποσυστημάτων υπό όλες τις διαφορετικές συνθήκες και τελικές καταστάσεις του συστήματος. Αποδίδει ξεκάθαρες ερμηνείες και πληροφορίες στους μελετητές ως προς την αλληλεξάρτηση των διάφορων υποσυστημάτων ενός μοντέλου καθώς και της βαρύτητας τους κατά την πραγματοποίηση οποιουδήποτε γεγονότος του δειγματικού χώρου στον οποίο ανήκουν.

Η από κοινού κατανομή δύο τυχαίων μεταβλητών X, Y είναι $p_{ij} = P(X = x_i, Y = y_j)$ (4.8) όπου p_{ij} αθροίζουν στη μονάδα. Η υπό συνθήκη πιθανότητά τους εκφράζεται ως εξής:

$$P(X = x_i | Y = y_j) = \frac{P(X=x_i, Y=y_j)}{P(Y=y_j)} \quad (4.9)$$

Μία ιδιότητα που έχουν είναι η περιθωριοποίηση (marginalization) και διατυπώνεται ως εξής:

$$P(X = x_i) = \sum_{j=1}^n P(X = x_i, Y = y_j) \quad (4.10)$$

Εάν στην (4.7) εφαρμοστεί η παραπάνω ιδιότητα (4.10) της θεωρίας των πιθανοτήτων τότε ο παρανομαστής στο θεώρημα Bayes μετατρέπεται σε:

$$P(A) = \sum_{B_k} P(A|B_k)P(B_k) \quad (4.11)$$

με τον παρανομαστή να λειτουργεί ως σταθερά κανονικοποίησης ώστε να εξασφαλίζεται πως το άθροισμα της υπό συνθήκης πιθανότητας του αριστερού μέλους της (4.7) $P(B_k|A)$, ισούται με τη μονάδα:

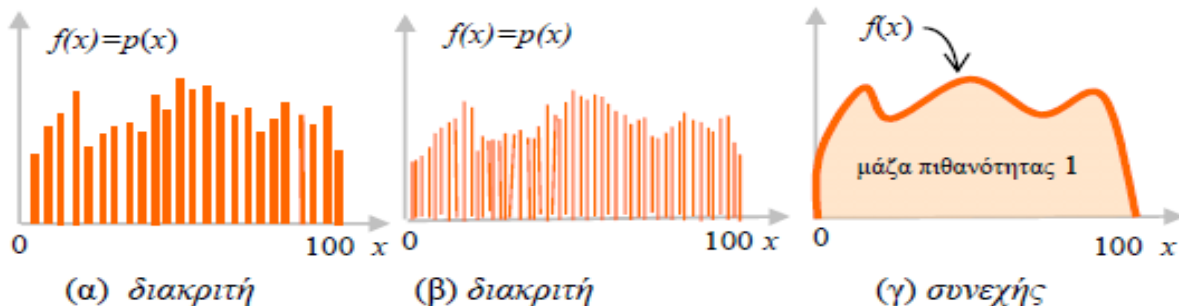
$$P(Bk|A) = \frac{P(Bk)P(A|Bk)}{\sum_{Bk} P(Bk)P(A|Bk)} \quad (4.12)$$

4.1.4 Κατανομή πιθανότητας

Έστω ότι το σύνολο όλων των δυνατών τιμών μια τυχαίας μεταβλητής A είναι πεπερασμένο ή άπειρα αριθμήσιμο, τότε η μεταβλητή A ονομάζεται διακριτή τυχαία μεταβλητή. Όλες οι δυνατές τιμές της A μπορούν να απαριθμηθούν σαν $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$, όπου στην πεπερασμένη περίπτωση η αρίθμηση σταματά σε κάποιο n ενώ η σε περίπτωση άπειρης αρίθμησης αυτή συνεχίζει ατελείωτα.

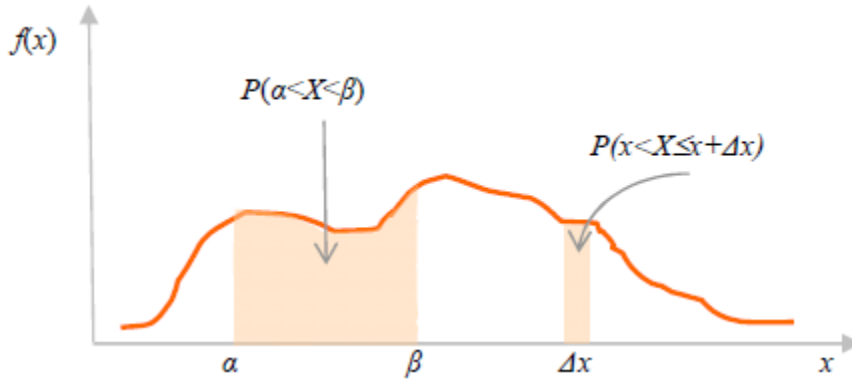
Παράδειγμα 4.1.4 Έστω ένα ζάρι με 6 πλευρές. Εάν κατά τη ρίψη του ζαριού σημειώνουμε τις τιμές που έχει η πάνω πλευρά του, τότε θα παρατηρήσουμε διάφορες ρίψεις και αποτελέσματα τα οποία είναι προφανώς τυχαία. Άρα η μεταβλητή A που δηλώνει πόσες φορές ήρθε μία συγκεκριμένη πλευρά στη ρίψη ενός ζαριού τρεις φορές είναι μια τυχαία μεταβλητή που μπορεί να πάρει τις τιμές $(0, 1, 2, 3)$ με πεδίο τιμών το $R_A = \{0, 1, 2, 3\}$. Κάποιες τυχαίες μεταβλητές είναι ο αριθμός των κεφαλών στη ρίψη ενός νομίσματος δέκα φορές και ο αριθμός αγοριών σε τρία νεογέννητα παιδιά. Η κατανομή πιθανότητας μίας τυχαίας μεταβλητής A , είναι μία περιγραφή των πιθανοτήτων που σχετίζονται με τις δυνατές τιμές της A . Για μία διακριτή τυχαία μεταβλητή, αυτή αποτελεί τη λίστα των δυνατών τιμών που μπορεί να πάρει σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες πιθανότητες των τιμών αυτών. Κάθε δυνατή τιμή A_i σχετίζεται με μία πιθανότητα $p(A_i) = P(A=A_i)$. Το σύνολο που περιέχει τα ζεύγη $(A_i, p(A_i))$ ονομάζεται συνάρτηση μάζας πιθανότητας της A .

Έστω μία διακριτή τυχαία μεταβλητή X που μπορεί να πάρει 25 διακριτές τιμές από το 0 μέχρι το 100 με συνάρτηση μάζας πιθανότητας όπως στο Σχήμα 4.2(α). Έστω ότι αυτή η τυχαία μεταβλητή X μπορεί να πάρει περισσότερες τιμές στο διάστημα 0 έως 100(β), ωστόσο με αυτό τον αριθμό τιμών να είναι επίσης πεπερασμένος αλλά μεγαλύτερος από 25, όπως π.χ. 1, 2, 3, ..., 99, 100. Σε κάθε μία από τις δυνατές τιμές X_i αντιστοιχεί μία πιθανότητα $P(X=X_i)$. Έστω τώρα ότι αυτή η τυχαία μεταβλητή X μπορεί να πάρει άπειρες τιμές στο διάστημα 0 έως 100(γ), π.χ. 0.1, 0.0001, 0.00003 κ.ο.κ. Οι τιμές της τώρα είναι άπειρες και μη μετρήσιμες. Η μάζα των πιθανοτήτων $P(X=X_i)$ είναι μία συνάρτηση f ορισμένη για όλες τις τιμές X_i , η οποία εκφράζει την πυκνότητα της μάζας της πιθανότητας στο πεδίο τιμών της X (Ζιούτας, 2014).



Σχήμα 4.2 Συναρτήσεις μάζας πιθανότητας (α) και (β), συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (γ)

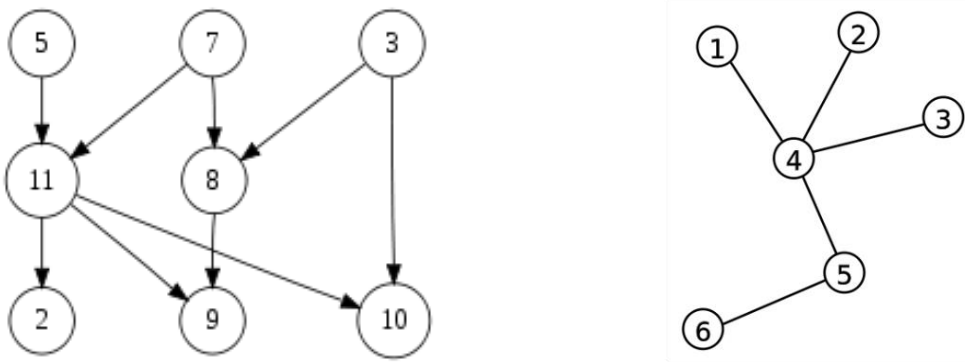
Παρόμοια με τη διακριτή, και στην συνεχή τυχαία μεταβλητή η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, $f(x)$, χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κατανομή πιθανότητας της X . Η τιμή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας $f(x)$ αυξάνει στις πιο πιθανές περιοχές του πεδίου τιμών της X , και μηδενίζεται για εκείνες τις τιμές x που δεν μπορούν να συμβούν.



Σχήμα 4.3 Πιθανότητα προσδιοριζόμενη από την επιφάνεια κάτω από την $f(x)$

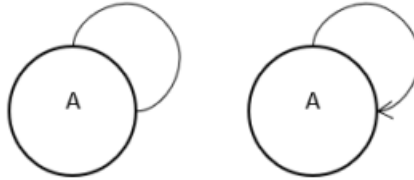
4.1.5 Γραφικά μοντέλα και Θεωρία γράφων

Τα γραφικά μοντέλα έχουν γίνει ένα σημαντικό εργαλείο για τη στατιστική ανάλυση πολύπλοκων και μεταβλητών συνόλων δεδομένων, τα οποία όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται σε πολλούς επιστημονικούς τομείς. Τα γραφικά μοντέλα μας δίνουν μία γραφική αναπαράσταση των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών ή διαδικασιών με τη βοήθεια γράφων. Γράφος ή γράφημα είναι η γενικότερη μορφή δομής δεδομένων ή πιο ειδικά μια απεικόνιση αποτελούμενη από ένα σύνολο σημείων (κορυφών ή κόμβων) που συνδέονται με γραμμές (ακμές). Οι κόμβοι-κορυφές αντιστοιχούν στις μεταβλητές που έχει το σύστημα που εξετάζουμε, ενώ οι ακμές αντιστοιχούν απευθείας στην αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των μεταβλητών ή διαδικασιών. Συνεπώς ένας γράφος ορίζεται από δύο σύνολα, ένα είναι το σύνολο των κορυφών του και το άλλο τα ζεύγη των κορυφών του, που ενώνονται με τις ακμές τους. Μπορεί να διαχωριστεί σε κατευθυνόμενο και μη κατευθυνόμενο (Jordan, 2004). Αν μία ακμή που ταυτόχρονα δηλώνει πορεία (δηλαδή ένα τόξο) πηγαινει από μία μεταβλητή A σε μια μεταβλητή B τότε λεμέ ότι το A είναι ο «γονέας» και B το «παιδί». Μια μεταβλητή μπορεί να αποκλίνει σε πολλές μεταβλητές και αντίστροφα πολλές μεταβλητές μπορούν να συγκλίνουν σε μία.



Σχήμα 4.4 Παραδείγματα Γράφων, κατευθυνόμενων και μη

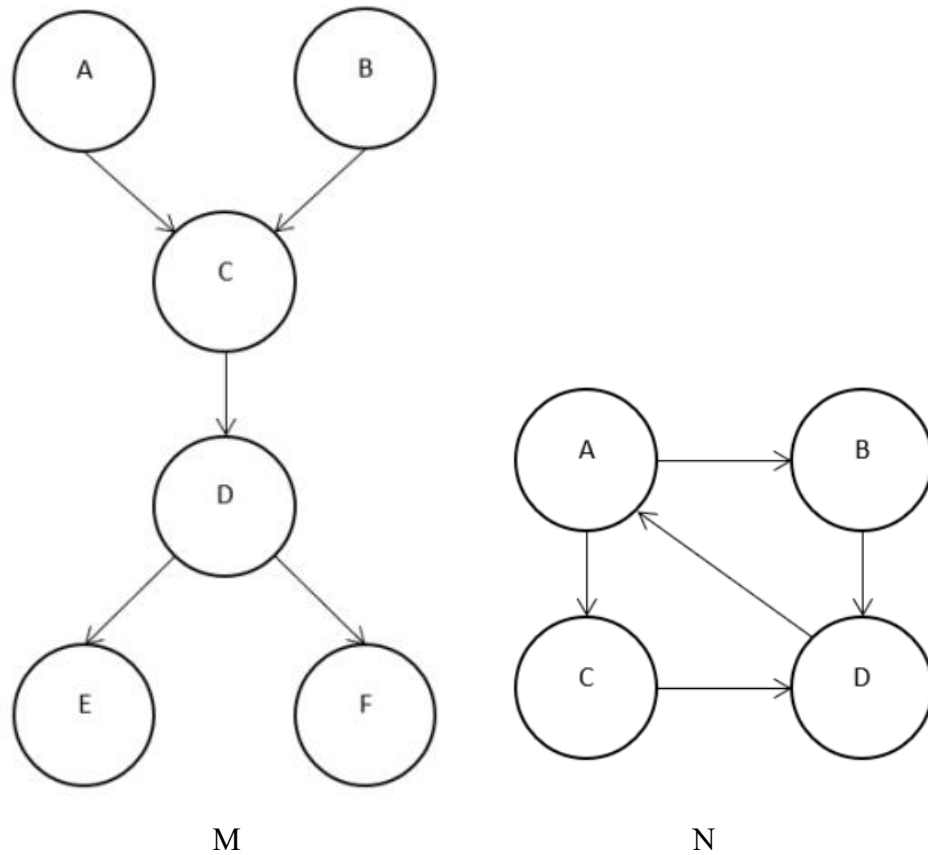
Στο Σχήμα 4.4, στον αριστερό γράφο, αντικατοπτρίζεται η σχέση μεταξύ των κόμβων του με κατεύθυνση των ακμών από τους κόμβους «γονείς» στους κόμβους «παιδιά», ενώ στον δεξιό γράφο, έχουμε παράδειγμα ενός μη κατευθυνόμενου γράφου. Σημαντική έννοια ενός γραφήματος ειδικά στα συστήματα που ανανεώνεται η πληροφορία, είναι ο κόμβος «βρόχος» (Σχήμα 4.5) που είναι η σύνδεση του με τον εαυτό του έσω μίας ακμής κατευθυνόμενης ή μη.



Σχήμα 4.5 Κόμβος «βρόχος» γραφικού μοντέλου

Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να σημειωθούν οι έννοιες συνδέσεων μεταξύ των κόμβων ενός γραφικού μοντέλου. **Αλυσίδα** θεωρείται η ομάδα που δημιουργούν κόμβοι που κάθε κόμβος είναι συνδεδεμένος με τον προηγούμενο με μία ακμή ανεξαρτήτως κατεύθυνσης της ακμής. **Περίπατος** για ένα γράφημα είναι μια ακολουθία των κορυφών του, αλλά με την δυνατότητα μία κορυφή να επαναληφθεί. Το **μονοπάτι** είναι ένας περίπατος χωρίς όμως να μπορούν να επαναληφθούν κορυφές του. **Κύκλος** είναι ένα μονοπάτι με ταυτόσημη αρχική και τελική κορυφή η οποία αποτελεί και την μόνη εξαίρεση στον κανόνα περί μη επαναλαμβανόμενων κορυφών. **Χορδή** είναι μία ακμή που ενώνει δύο κόμβους σε ένα μονοπάτι(ή κύκλο) που όμως αυτοί δεν έχουν τη σχέση γονέα-παιδιού, άρα δεν είναι άμεσα συνδεδεμένοι. Κατά συνέχεια, **τριγωνικός** είναι ο γράφος χωρίς κατεύθυνση που κάθε κύκλος με ελάχιστο τέσσερις κόμβους έχει και από μία χορδή. Ένας γράφος χωρίς κατεύθυνση που κάθε κόμβος συνδέεται με τους υπόλοιπους ονομάζεται **ολοκληρωμένος** και **κλίκα** είναι το υποσύνολο κόμβων που είναι ολοκληρωμένο (Stephenson, 2000).

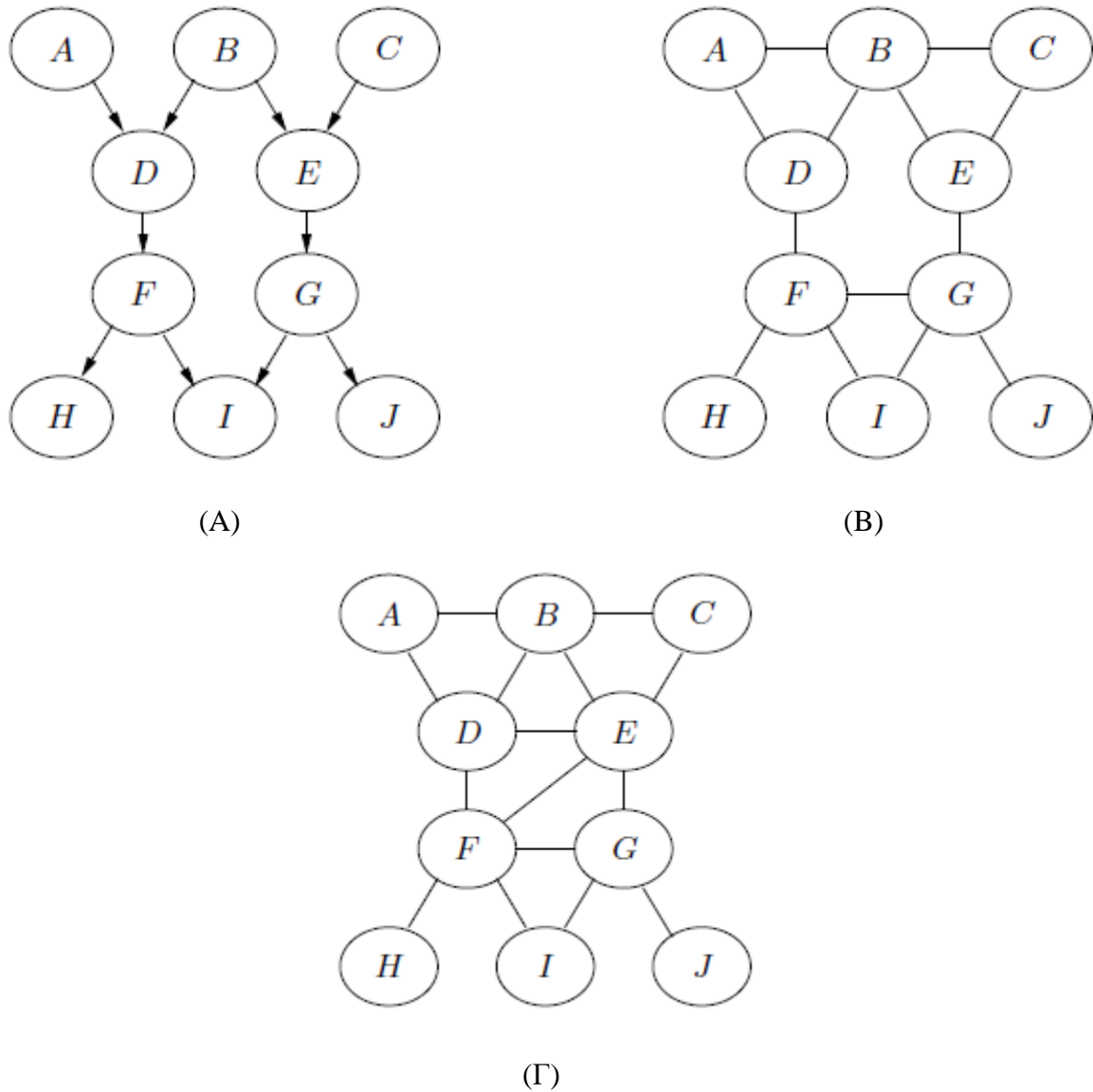
Ένας κατευθυνόμενος γράφος χωρίς κύκλους, αποκαλείται απ' τους ερευνητές **κατευθυνόμενος μη κυκλικός γράφος** ή **Directed Acyclic Graph** ή **DAG**. **Δάσος** καλείται ένα DAG που κάθε κόμβος έχει είτε ένα γονέα είτε τίποτα και **δένδρο** είναι ένα δάσος που μόνο ένας κόμβος δεν έχει γονέα.



Σχήμα 4.6 Αναπαράσταση κατευθυνόμενου κυκλικού (B) και μη κυκλικού (A) γράφου

Στο παραπάνω Σχήμα 4.6, γονέας είναι ο κόμβος «A» και «B» και παιδί του καθ' ενός ο κόμβος «C». Γονέας είναι επίσης και ο κόμβος «C» καθώς έχει παιδί τον κόμβο «D». Ο κόμβος «D» έχει παιδιά τον «E» και «F». Πρόγονοι του «E» και «F» κόμβου είναι όλοι οι υπόλοιποι κόμβου του γραφήματος «M».

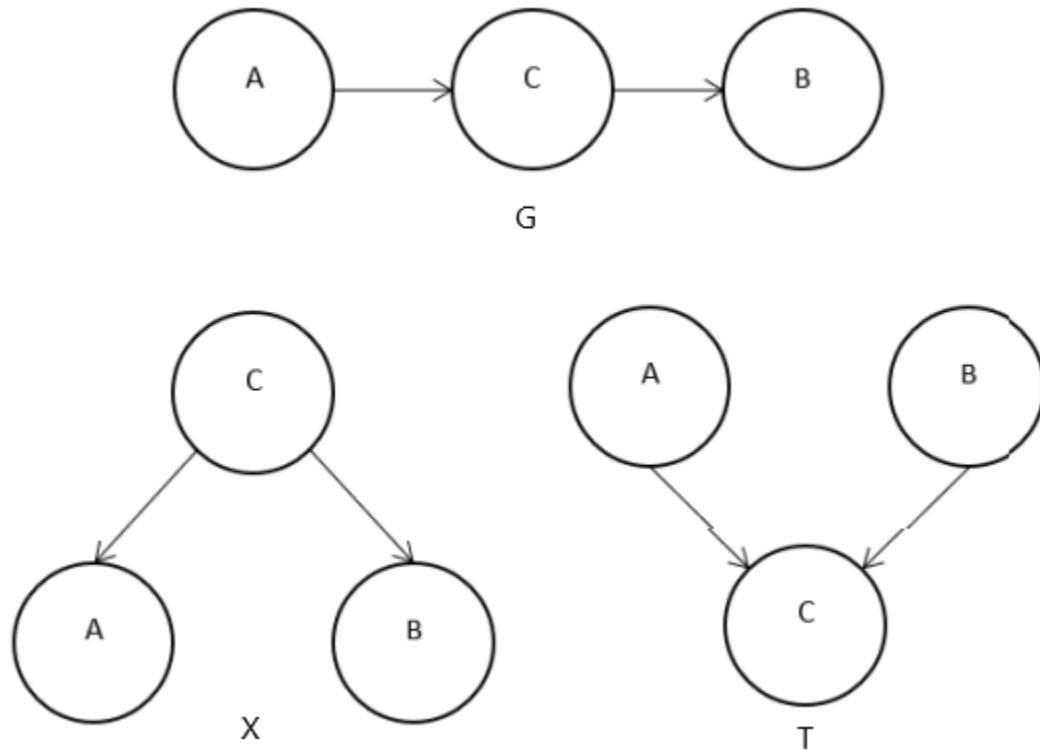
Από ένα DAG, προκύπτει γράφος χωρίς κατευθυνόμενη ακμή μέσω της ένωσης των γονέων κάθε κόμβου με μη κατευθυνόμενες ακμές. Στη συνέχεια αφαιρούνται οι κατευθύνσεις και από τις αρχικές ακμές με αποτέλεσμα να μετατρέπεται ο αρχικός γράφος σε μη κατευθυνόμενο και ονομάζεται **Moralized** (Jensen and Nielsen, 2007).



Σχήμα 4.7 Αναπαράσταση BN (A), που μετατρέπεται σε μη τριγωνικό Moralized Graph(B) και σε τριγωνικό (Γ) μέσω της εισαγωγής επιπλέον ακμών

4.1.6 Υπό Συνθήκη Ανεξαρτησία (d-separation)

Χρησιμοποιώντας το Σχήμα 4.8, οι τρόποι σύνδεσης μεταξύ των κόμβων ενός κατευθυνόμενου μη κυκλικού γραφήματος είναι τρεις:



Σχήμα 4.8 Πιθανοί τρόποι σύνδεσης τριών κόμβων ενός DAG

- Στο γραφικό μοντέλο G, η σύνδεση των A, B και C ονομάζεται σύνδεση σε σειρά ή αλλιώς αιτιακή σύνδεση. Οποιαδήποτε πληροφορία για την κατάσταση του A θα επηρεάσει την κατάσταση του C και κατά συνέχεια του B. Αν η κατάσταση του C είναι γνωστή, τότε είναι και του B. Αν όμως ήταν γνωστή και του C και του A, τότε δεν θα επηρεαζόταν η πεποίθηση για την κατάσταση του B περισσότερο από όταν ήταν γνωστή μόνο η κατάσταση του C. Άρα αν είναι γνωστός ο C τότε δεν εξαρτάται πια ο κόμβος B από τον A και άρα οι A και B δεν έχουν ροή πληροφορίας μεταξύ τους, και τότε καλούνται **d-separated**(directedly) δεδομένου του C.
- Στο γραφικό μοντέλο X, η σύνδεση του C με τους A και B ονομάζεται αποκλίνουσα σύνδεση. Αν υπάρχει πληροφορία για τον A τότε υπάρχει ροή πληροφορίας στον C και κατά συνέπεια και στον B. Τότε οι A και B ονομάζονται **d-connected**. Σύμφωνα με τα παραπάνω όμως, οι A και B είναι d-separated σε περίπτωση που είναι γνωστός ο C καθώς δεν επηρεάζεται η γνώση των ερευνητών για τον κόμβο A ή B σε περίπτωση που είναι γνωστός κάποιος απ' τους δύο μιας και έχει παρατηρηθεί πρώτα η κατάσταση του C.
- Στο γραφικό μοντέλο T, η σύνδεση των A και B με τον C ονομάζεται συγκλίνουσα σύνδεση ή V-δομή. Αν γνώση του C δεν είναι δεδομένη, τότε οποιαδήποτε γνώση για το A δεν επηρεάζει το B και αντίστροφα. Αν είναι γνωστή η κατάσταση του C και μία εκ των δύο A ή B, τότε προφανώς επηρεάζεται η κατάσταση του άγνωστου κόμβου.

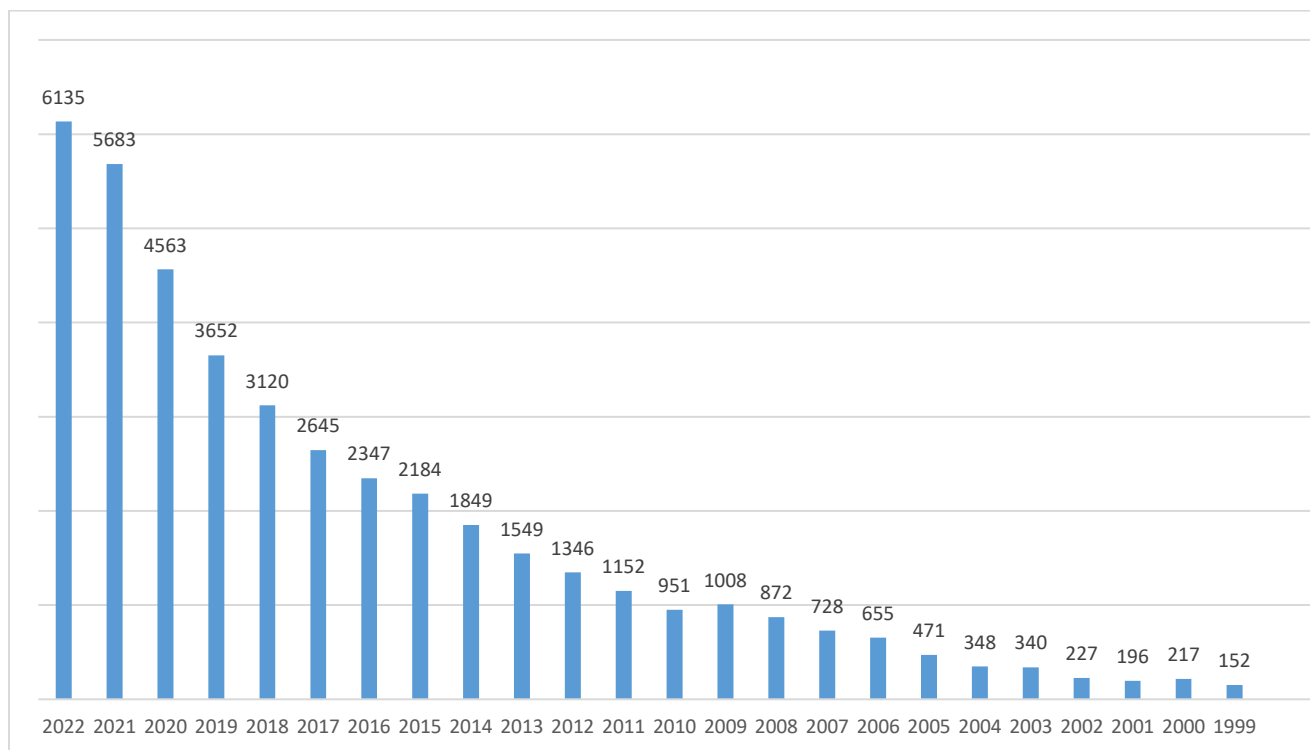
Τα γραφικά μοντέλα διέπονται από πιθανοκρατικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών τους. Σύμφωνα με τα παραπάνω παραδείγματα και τον ορισμό του d-separation κατά (Pearl, 2009) που δεν αποτελεί πεδίο αυτής της έρευνας, προκύπτει πως αν δύο μεταβλητές ενός DAG είναι d-separated, τότε είναι και υπό συνθήκη ανεξάρτητες. Ένα σημαντικό αποτέλεσμα για τους μελετητές μέσω της χρήσης των γραφικών μοντέλων, είναι πως μέσω αυτών έχουν τη δυνατότητα να συσχετίζουν δύο υπό συνθήκη ανεξάρτητες μεταβλητές μέσω μιας τρίτης μεταβλητής με την οποία είναι υπό συνθήκη εξαρτημένες και οι δύο. Δηλαδή, είναι δυνατό να εξεταστεί με τη βοήθεια αυτών των μοντέλων η υπό συνθήκη ανεξαρτησία δύο ή και παραπάνω, διαδικασιών.

4.2 Μπεϋζιανά Δίκτυα – Bayesian Networks

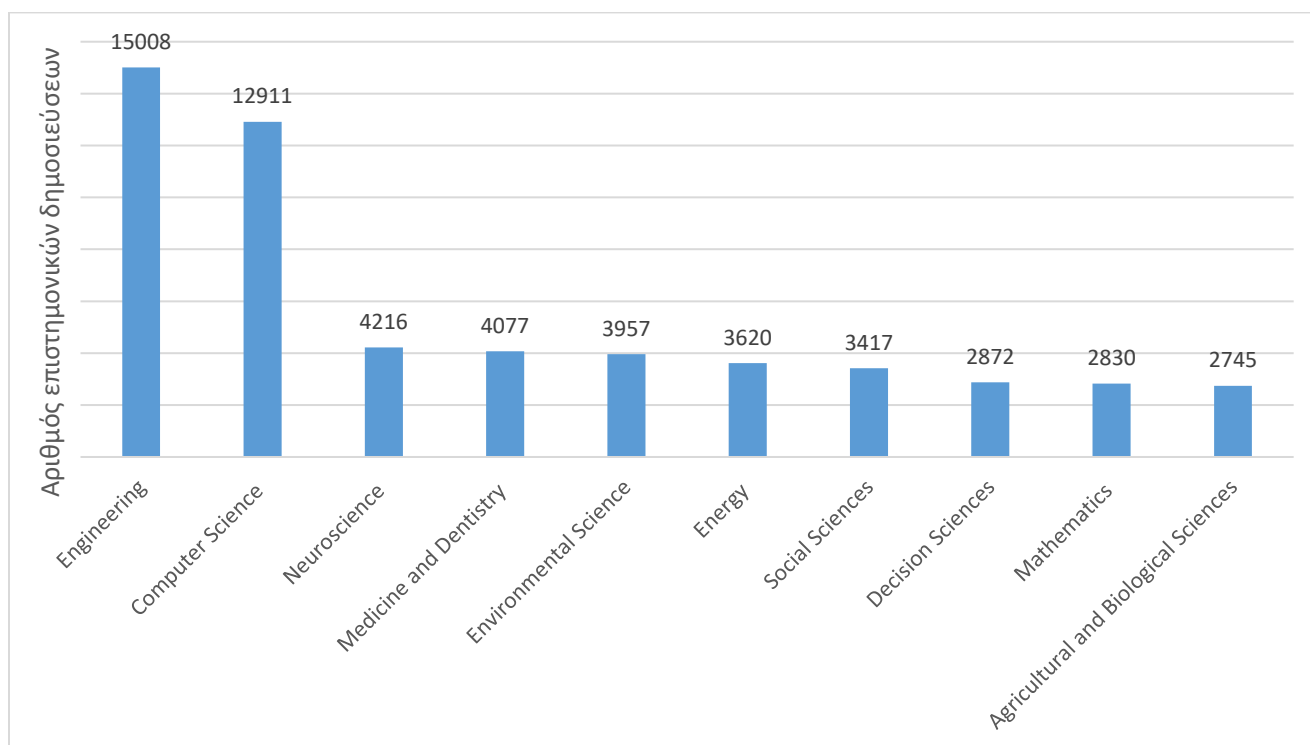
4.2.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο κεφ. 3.1.2 όπου παρουσιάστηκε η έννοια της αβεβαιότητας, η ανάγκη των ερευνητών να προσδιορίσουν με τον ακριβέστερο δυνατό τρόπο αποτελέσματα πολύπλοκων μοντελοποιήσεων, σχετιζόμενα με επιστήμες όπως η πληροφορική, στατιστική, χημεία κ.ά., οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων γραφικών μοντέλων. Ένα γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως κατά την προσέγγιση πολύπλοκων συστημάτων αποτελούν τα Μπεϋζιανά Δίκτυα (BN). Είναι μια οπτική απεικόνιση η οποία αποτελείται από μεταβλητές που αναπαρίστανται ως κόμβοι, όπου κάθε κόμβος διαθέτει καταστάσεις σύμφωνα με τις πιθανές τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή (Langseth et al., 2009). Το βασικό τους γνώρισμα είναι πως σε κάθε μία μεταβλητή μπορεί να αντιστοιχεί μια συνάρτηση κατανομής πιθανοτήτων διακριτή ή συνεχής, και οι συνδέσεις μεταξύ αυτών συμβολίζονται με τόξα όμοια με αυτά της θεωρίας γράφων που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.1.5. Συνεπώς σε κάθε κόμβο αποδίδονται πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων για κάθε κατάσταση του κόμβου, που αποδίδουν τις πιθανότητες που αυτός υποθέτουν οι ερευνητές πως ακολουθεί κατά τη μελέτη του συστήματος, βάση των διαφόρων καταστάσεων που βρίσκονται οι γονείς του. Σε περίπτωση που δεν έχει γονέα ένας κόμβος, τότε ο πίνακας που του αντιστοιχεί είναι η συνάρτηση πιθανότητας του ίδιου του κόμβου και άρα είναι απλώς η κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής.

Τα δίκτυα πίστωσης, κατά τη δεκαετία του 1990, αποτέλεσαν μεγάλο σημείο ενδιαφέροντος από τους ερευνητές διάφορων επιστημών ως ένα μοντέλο που μπορούσε να υλοποιήσει πολύπλοκα συστήματα της βιομηχανίας (Jensen and Nielsen, 2007). Αποτελούν γραφικά μοντέλα που ικανά μοντελοποιούν οποιοδήποτε σύστημα: πορεία μιας ιατρικής ανάλυσης συμπτωμάτων-πιθανών ασθενειών, του καιρού, ενός μηχανολογικού συστήματος, ενός πολύπλοκου μοντέλου υπολογισμού ρίσκου κ.ά. Η ενσωμάτωσή αυτών και των επεκτάσεών τους (DBN) για την μελέτη πολύπλοκων συστημάτων τα καθιστά σημαντικό και αξιόπιστο εργαλείο ολοένα και πιο διαδεδομένο με χιλιάδες έρευνες κάθε χρόνο σε διάφορους τομείς των επιστημών (βλ. Σχήμα 4.9, Σχήμα 4.10, πηγή αποτελεσμάτων: sciencedirect.com/dynamicbayesiannetworks).

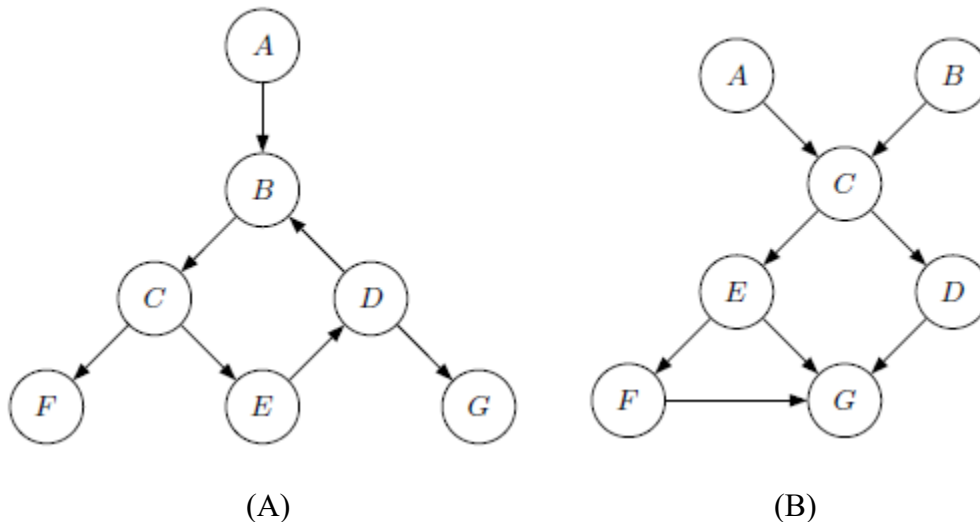


Σχήμα 4.9 Δημοσιεύσεις που ενέχουν την μελέτη/εφαρμογή των DBN ανά χρόνο



Σχήμα 4.10 Τομείς επιστημών που έχουν εφαρμοστεί τα DBN

Είναι σημαντικό πως τα BN επιτρέπουν την άμεση ανάλυση ενός συστήματος με τυχαία πρότερη γνώση της κατάστασης των κόμβων τους, άρα είναι χρήσιμα σε μοντέλα που οι πληροφορίες σχετικά με το παρελθόν και την τρέχουσα κατάσταση είναι ασαφής και μη συγκεκριμένες. Τα γραφικά μοντέλα μπορούν να προσαρμοσθούν σε οποιαδήποτε κατανομή και αυτό είναι ένα γνώρισμα που τα διακρίνει ως ένα απ' τα πιο πολυχρησιμοποιημένα εργαλεία μοντελοποίησης πολύπλοκων συστημάτων με ανεξάρτητες και πολύπλοκες διαδικασίες στο εσωτερικό του. Αποτελούν μία αναπαράσταση των γνώσεων των ερευνητών για ένα αβέβαιο γεγονός. Σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.1.5 της θεωρίας γράφων, το BN είναι ένας κατευθυνόμενος γράφος χωρίς κύκλους (directed acyclic graph ή DAG).



Σχήμα 4.11 Παράδειγμα από Γραφικά Μοντέλα (A) Κατευθυνόμενος κυκλικός Γράφος, (B) Κατευθυνόμενος μη κυκλικός Γράφος

Το (A) αντικατοπτρίζει κατευθυνόμενο γράφο που έχει ως μέρος του μονοπάτι με ταυτόσημη αρχική και τελική κορυφή (B,C,D,E). Το (B) αποτελεί κατευθυνόμενο μη κυκλικό γράφο ή DAG μιας και δεν υπάρχει σε κανέναν κόμβο «X» επανακυκλοφορία πληροφορίας, δηλαδή ακμή που κατέληξε σε αυτόν από κόμβο «Y» που χρησιμοποίησε πληροφορία από τον κόμβο «X».

4.2.2 Ένδειξη και Συμπερασμός στα Μπεϋζιανά Δίκτυα

Το Μπεϋζιανό Δίκτυο είναι ένα μοντέλο που εκδηλώνει τις πιθανές καταστάσεις για ένα συμβάν. Οι ενδείξεις(evidence), είναι δεδομένα για μία τρέχουσα κατάσταση, διαχωρίζονται σε ισχυρές και ασθενείς, όπου ισχυρή ένδειξη όταν η γνώση της κατάστασης ενός κόμβου είναι γνωστή και βέβαιη. Ασθενής ονομάζεται οποιαδήποτε άλλη μορφή ένδειξης, άρα όταν στη διαθέσιμη πληροφορία υπάρχει αβεβαιότητα. Οι ερευνητές προσθέτουν τις δικές τους ενδείξεις σε ένα υπό μελέτη σύστημα για την μελέτη της συμπεριφοράς του υπό διαφορετικά δεδομένα και καταστάσεις του.

Πρακτικά, χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Bayes και την Μπεϋζιανή στατιστική, τα BN ξεκινούν με μία προγενέστερη πιθανότητα (**prior probability**), αλλά και την πιθανότητα ενός αποτελέσματος για μια συγκεκριμένη τιμή παραμέτρων(**likelihood**), ώστε να καταλήξουν

σε μια μεταγενέστερη πιθανότητα (**posterior probability**) που ζητείται από τους ερευνητές του υπό μελέτη συστήματος (Stephenson, 2000). Προγενέστερη καλείται η πιθανότητα που αποδίδεται σε ένα γεγονός ή μεταβλητή του BN, χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση των κόμβων του υπόλοιπου συστήματος. Ουσιαστικά είναι η κατανομή πιθανότητας που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο και αυτή συνήθως προκύπτει από πρωτογενή και δευτερογενή δεδομένα όπως τα στοιχεία που αντλούνται από την εμπειρία των ερευνητών ή ειδικών (experts) του υπό μελέτη συστήματος ή και από βιβλιογραφία και έρευνες που αναπτύχθηκαν για τη μελέτη αυτού. Η σημαντικότητα της επιλογής ορθής και κατά το δυνατόν πιο προσεγγιστικής προς την πραγματικότητα προγενέστερης πιθανότητας είναι καταλυτική για την περιγραφή ενός μοντέλου μιας και τα τελικά αποτελέσματα μπορεί να μη σχετίζονται με τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου, ειδικότερα εάν τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περιορισμένα ή δύσκολα μετρήσιμα. «Likelihood» είναι ο όρος που εκφράζει την πιθανότητα κατάστασης ενός κόμβου δεδομένης μίας κατάστασης ή ενός γεγονότος. Μεταγενέστερη πιθανότητα είναι η ανανεωμένη πια πιθανότητα ενός γεγονότος δεδομένης μίας νέας πληροφορίας ή υπόθεσης και είναι αυτή που ουσιαστικά υπολογίζεται μέσω του θεωρήματος του Bayes ως εξής:

$$Posterior = \frac{Likelihood \times Prior}{Evidence}$$

Πολύ συχνά, οι μελετητές ανανεώνουν τις ενδείξεις ή αποδίδουν στους κόμβους που επιθυμούν συγκεκριμένες καταστάσεις, ώστε να μελετήσουν μέσω του συμπερασμού όπως περιγράφεται πιο πάνω την εξέλιξη και την πια ανανεωμένη αβεβαιότητα που διέπει το Μπεϋζιανό δίκτυο. Ο συμπερασμός λοιπόν στα Μπεϋζιανά δίκτυα προϋποθέτει τον ορισμό και παρατήρηση της προγενέστερης πιθανότητας η οποία είναι καταλυτική για τα μεταγενέστερα αποτελέσματα του μοντέλου και ανανεώνεται ανάλογα με τις ενδείξεις που παρατηρούνται σε μία επιλεγμένη κατάσταση μελέτης του δικτύου. Επιτρέπει την μετάδοση της πρότερης γνώσης και των γνώσεων που παρέχουν οι κόμβοι ενδείξεις (evidence nodes) στην τελική μελέτη της ολικής πιθανότητας ενός Μπεϋζιανού δικτύου.

Παράδειγμα 4.2.2 Έστω πως κάποιος κάνει μοριακό έλεγχο για μόλυνση από τον ιό Covid-19. Προγενέστερη είναι η πιθανότητα να έχει τον ιό χωρίς καμία πρώτα παρατήρηση των αποτελεσμάτων του μοριακού τεστ ανίχνευσης Covid-19. Ένδειξη είναι η πιθανότητα να βγει το τεστ θετικό και likelihood είναι η πιθανότητα με δεδομένη τη μόλυνση από Covid-19 να βγει το τεστ θετικό. Μεταγενέστερη είναι η πιθανότητα να φέρει τον ιό Covid-19 δεδομένου του θετικού μοριακού ελέγχου. Άρα η μεταγενέστερη πιθανότητα που περιγράφεται, έχει λάβει υπόψη την αρχική γνώση που υπάρχει για την εμφάνιση του ιού σε κάποιον, και των νέων δεδομένων αφού έχει βγει το τεστ θετικό σε αυτό τον ιό.

4.2.3 Ορισμός Bayesian Networks

Ένα BN αναπαριστά τη στοχαστική εξάρτηση μεταξύ των τυχαίων μεταβλητών του, όπου κάθε κόμβος του αντιστοιχεί σε μία τέτοια και αποτελείται από τα εξής (Jensen and Nielsen, 2007):

- Μία ομάδα μεταβλητών που συνδέονται με ένα σετ κατευθυνόμενων ακμών μεταξύ τους οι οποίες ικανοποιούν τα κριτήρια ενός κατευθυνόμενου μη κυκλικού γραφικού μοντέλου

- Κάθε μεταβλητή έχει ένα πεπερασμένο σύνολο διαφορετικών μεταξύ τους καταστάσεων
- Κάθε μεταβλητή A με γονείς A_1, A_2, \dots, A_k αντιστοιχεί πίνακα της δεσμευμένης συνάρτησης πιθανότητας $P(A|A_1, A_2, \dots, A_k)$. ▪

4.2.4 Κανόνας αλυσίδας για Bayesian Networks

Ο κανόνας της αλυσίδας είναι πολύ σημαντικός για την έρευνα αναφορικά με τα αποτελέσματα στα Μπεϋζιανά Δίκτυα. Επιτρέπει τον υπολογισμό της κοινής πορείας της κατανομής πιθανοτήτων για ένα σύνολο μεταβλητών χρησιμοποιώντας μόνο υπό συνθήκη πιθανότητες, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τον υπολογισμό της μεταγενέστερης πιθανότητας μιας μεταβλητής με σημαντική ελάττωση των ενδιάμεσων πράξεων που προκύπτουν απ' την κλασική μελέτη πιθανοτήτων σε γραφικά μοντέλα. Ο κανόνας της αλυσίδας είναι μια γενίκευση του θεμελιώδη κανόνα των πιθανοτήτων όπως αυτός παρουσιάστηκε στο 4.1.2, και είναι ο εξής:

Έστω BN με γραφικό μοντέλο και με τυχαίες μεταβλητές από πεδίο $U = \{A_1, \dots, A_n\}$. Έστω η από κοινού συνάρτηση πιθανότητας $P(A_1, A_2, \dots, A_k)$. Το BN καθορίζει μια ξεχωριστή κοινή κατανομή πιθανοτήτων $P(U)$ που δίνεται από το γινόμενο όλων των υπό συνθήκη πινάκων πιθανοτήτων. Σύμφωνα με τον πολλαπλασιαστικό τύπο των πιθανοτήτων (4.6) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P(A_1, \dots, A_k) = P(A_1|P(A_2|A_1)) \dots P(A_k|A_1, A_2, \dots, A_{k-1}) = \prod_1^k P(A_k|A_1, A_2, \dots, A_{k-1}) \quad (4.13)$$

Όμως στα BN ισχύει πως οι τυχαίες μεταβλητές είναι ανεξάρτητες από τις μεταβλητές που δεν είναι απόγονοι τους υπό τη συνθήκη των γονέων τους, και τότε:

$$P(A_k|A_1, A_2, \dots, A_{k-1}) = P(A_k|pa_{A_k}) \quad (4.14)$$

Όπου pa_{A_k} είναι οι γονείς των μεταβλητών A_k και άρα η από κοινού συνάρτηση της πιθανότητας του δικτύου γράφεται ως εξής:

$$P(A_1, \dots, A_k) = \prod_1^k P(A_k|pa_{A_k}) \quad \blacksquare \quad (4.15)$$

Συνεπώς, οι υπό συνθήκη ανεξαρτησίες ενός Μπεϋζιανού δικτύου αποτυπώνονται στη συγκεκριμένη ανάλυση της από κοινού συνάρτησης της πιθανότητας του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εάν για παράδειγμα κάθε μεταβλητή είχε 2 πιθανές καταστάσεις και n πλήθος γονέων με k πλήθος όλων των μεταβλητών να χρειάζονται $k * 2^n$ πράξεις για τον υπολογισμό όλων των πιθανοτήτων. Με μη χρήση του παραπάνω τύπου, τότε προφανώς θα έπρεπε να εκτελεστούν 2^n πράξεις για την εκτίμηση όλων των πιθανοτήτων. Σε κάθε μεταβλητή αντιστοιχεί λοιπόν ο πίνακας δεσμευμένης συνάρτησης πιθανότητας $A_k|pa_{A_k}$ και ονομάζονται πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων (Conditional Probability Tables - CPT). Μέσω της από κοινού συνάρτησης πιθανότητας και των CPT, μπορεί να βρεθεί η πιθανότητα κάθε δυνατής κατάστασης των μεταβλητών ενός BN και αυτή είναι η ιδιότητα που επιτρέπει στους ερευνητές να αντλούν διάφορα στοιχεία για τις εξαρτήσεις των στοιχείων ενός πολύπλοκου συστήματος και να επιλέγονται τα BN στην ανάλυση οποιουδήποτε συστήματος σε κάθε επιστήμη.

4.2.5 Διάδοση πεποίθησης – Αλγόριθμοι Υπολογισμού

Η διάδοση πεποίθησης επιτυγχάνεται μέσω της διάδοσης της βέβαιης γνώσης ή παρατήρησης της αβέβαιης κατάστασης ενός ή περισσότερων κόμβων (μεταβλητών) δικτύου σε

επόμενους και τον υπολογισμό των καταστάσεων τους με βάση αυτή την πληροφορία και άρα της ολικής πιθανότητας του συστήματος μέσω μίας ένδειξης ή παρατήρησης. Το πρώτο στάδιο της είναι η διάδοση της πληροφορίας στους κόμβους του δικτύου και δεύτερο στάδιο είναι η ανανέωση της πεποίθησης για έναν κόμβο με υπολογισμό των μεταγενέστερων πιθανοτήτων μετά την απαραίτητη ανάλυση των ενδείξεων που υπάρχουν σε μία συγκεκριμένη υπόθεση για την οποία μελετάται το δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων αλγορίθμων που έχουν αναπτυχθεί από τους ερευνητές μέσω υπολογιστικών διαδικασιών με τη χρήση των βασικών κανόνων των πιθανοτήτων όπως ο κανόνας Bayes και ο πολλαπλασιαστικός κανόνας που παρουσιάστηκαν στο 4.1. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι όπως ο Junction Tree αλγόριθμος που αναλύεται στη συνέχεια, ο αλγόριθμος του Pearl (Pearl, 1988) που χρησιμοποιείται για τον συμπερασμό στα BN μέσω του υπολογισμού των μεταγενέστερων πιθανοτήτων του δικτύου λόγω της διάδοσης πληροφορίας στους γειτονικούς της ένδειξης κόμβου (evidence node), και ο αλγόριθμος της απαλοιφής μεταβλητών που συγχωνεύει ή εξαλείφει τις μη-παρατηρούμενες μεταβλητές μετατρέπει το δίκτυο σε ένα πιο εύκολο υπολογίσιμο (Romer, 2020).

Παράδειγμα 4.2.5.1. Έστω το γραφικό μοντέλο T από το Σχήμα 4.8(T) όπου αποτυπώνει μία συγκλίνουσα σύνδεση τριών κόμβων A, B, C με τους A και B να είναι γονείς του C . Έστω πως οι κατανομές δεσμευμένης πιθανότητας κάθε μεταβλητής είναι οι εξής:

$P(A)=0.6$, $P(B)=0.5$ και $P(C|A,B)$ είναι ο ακόλουθος Πίνακας 4.1:

Πίνακας 4.1 Δεσμευμένες πιθανότητες παραδείγματος διάδοσης πεποίθησης σε συγκλίνουσα σύνδεση

A	B	C=True	C=False
0	0	0.1	0.9
0	1	0.3	0.7
1	0	0.2	0.8
1	1	0.9	0.1

Ζητούμενο σε αυτό το παράδειγμα είναι ο υπολογισμός της μεταγενέστερης πιθανότητας του A δεδομένου του C να είναι αληθές, άρα της πιθανότητας $P(A|C)$.

Η διάδοση πεποίθησης γίνεται με τη ροή της πληροφορίας από τον κόμβο C στους A και B με το νόμο του Bayes ως εξής:

Πεποίθηση($C \rightarrow A$)(a) = $P(C=True | A=a, B=0) * P(B=0) + P(C=True | A=a, B=1) * P(B=1)$
(δεσμευμένη πιθανότητα $P(C|A,B)$ για γνωστή τη μεταβλητή B)

Πεποίθηση($C \rightarrow B$)(b) = $P(C=True | A=0, B=b) * P(A=0) + P(C=True | A=1, B=b) * P(A=1)$
(δεσμευμένη πιθανότητα $P(C|A,B)$ για γνωστή τη μεταβλητή A)

Αυτό ισχύει καθώς για την αναγνώριση της κατάστασης των γονέων λόγω της σύνδεσης του δικτύου και του πίνακα των δεσμευμένων πιθανοτήτων, απαιτείται η γνώση της κατάστασης του άλλου γονέα κόμβου εάν είναι γνωστή η κατάσταση του παιδιού C όπως αναλύθηκε και στο 4.1.

Η διάδοση πεποίθησης από τους A και B στον C γίνεται ως εξής:

$$\text{Πεποίθηση}(A \rightarrow C)(c) = P(C=c \mid A=a, B=b)$$

$$\text{Πεποίθηση}(B \rightarrow C)(c) = P(C=c \mid A=a, B=b)$$

Σύμφωνα με τον (12) όπως παρουσιάζεται στο 4.1., ο υπολογισμός της ζητούμενης πιθανότητας θα εκτελεστεί ως εξής:

$$P(A=1 \mid C=1) = \frac{\text{Πεποίθηση}(C \rightarrow A)(A=1) * P(A=1)}{[\text{Πεποίθηση}(C \rightarrow A)(A=0) + \text{Πεποίθηση}(C \rightarrow A)(A=1)]} = \mathbf{0.733}$$

$$P(A=0 \mid C=1) = \frac{\text{Πεποίθηση}(C \rightarrow A)(A=0) * P(A=0)}{[\text{Πεποίθηση}(C \rightarrow A)(A=0) + \text{Πεποίθηση}(C \rightarrow A)(A=1)]} = \mathbf{0.267}$$

4.2.6 Αλγόριθμος Junction Tree

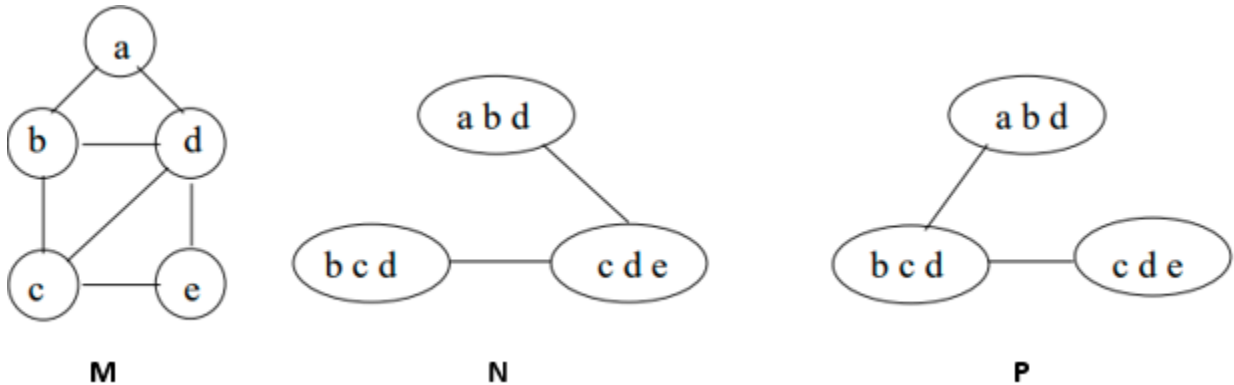
Ένας αλγόριθμος που χρησιμοποιείται ευρέως σε πολύπλοκα γραφικά μοντέλα για τη διάδοση της πεποίθησης και κατά συνέπεια διευκόλυνση των ερευνητών στον υπολογισμό των καταστάσεων των κόμβων του δικτύου είναι ο αλγόριθμος Junction Tree (Byun et al., 2021). Χρησιμοποιείται μεταξύ άλλων, σε περιπτώσεις όπου μελετάται η αξιοπιστία συστημάτων σε πιθανοθεωρητικά γραφικά μοντέλα. Ο αλγόριθμος για την κατασκευή του Junction Tree είναι ο εξής (Jordan, 2004):

- Μετατρέπεται το κατευθυνόμενο γράφημα σε μη κατευθυνόμενο. Πραγματοποιείται η σύνδεση μεταξύ όλων των γονέων που έχουν ένα κοινό παιδί, αφαιρώντας στη συνέχεια την κατεύθυνση από όλες τις ακμές. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Moralization.
- Καθορίζεται η σειρά εξάλειψης των κόμβων του γραφήματος, που αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας μη κατευθυνόμενες συνδέσεις μεταξύ των γειτονικών κόμβων σε ομάδες κατά το ελάχιστο των τεσσάρων κόμβων. Αυτό ορίστηκε στο **κεφ. 4.1.5** ως ένας τριγωνικός γράφος, δηλαδή όταν σε μη κατευθυνόμενο γράφο κάθε κύκλος με ελάχιστο τέσσερις κόμβους έχει μία χορδή.
- Κατασκευή του Junction Tree: Σε ένα γράφημα που έχουν λάβει χώρα οι πιθανές τριγωνοποιήσεις των κόμβων του, κατασκευάζονται κατά το δυνατό μεγαλύτερες πιθανές κλίκες – δηλαδή υποσύνολα κόμβων που όλοι συνδέονται μη κατευθυνόμενα μεταξύ τους – έτσι ώστε κατά την ένωσή τους, να δημιουργείται ένα δένδρο με τους λιγότερους δυνατούς κόμβους (κάθε κόμβος είναι μία κλίκα).
- Διάδοση Πεποίθησης και υπολογισμοί Junction Tree: Σε κάθε κλίκα υπολογίζεται η από κοινού πιθανότητα των κόμβων της και αυτή ονομάζεται **potential** της κλίκας. Υπολογίζεται μέσω των αρχικών δεσμευμένων πιθανοτήτων που διέπουν τις σχέσεις μεταξύ των κόμβων της εκάστοτε κλίκας. Είναι το πιο σημαντικό βήμα μιας και δίνει όλες τις πιθανές περιπτώσεις κατά τις οποίες πραγματοποιείται αυτή η κλίκα σε σχέση με τους κοινούς κόμβους που έχει με τις γειτονικές της. Αυτό σημαίνει πως ο αλγόριθμος αναγνωρίζει μετά την κατασκευή του Junction Tree, εφόσον ζητηθεί μία τυχαία πιθανότητα με συγκεκριμένες ενδείξεις, το από που θα χρειαστούν πληροφορίες για τον υπολογισμό της ζητούμενης πιθανότητας καθώς δεν θα χρειαστεί να γίνουν υπολογισμοί σε όλες τις διαφορετικές κλίκες του δένδρου. Τέλος, οι

κλίκες θα αλληλοεπιδράσουν μεταξύ τους μέσω των κόμβων τους που είναι κοινοί με τις γειτονικές τους κλίκες ώστε να υπολογισθεί η από κοινού πιθανότητα όλου του δένδρου.

Σε κάθε κλίκα υπολογίζονται οι κατανομές πιθανοτήτων των κόμβων μέσω των κανόνων των πιθανοτήτων όπως ο πολλαπλασιαστικός κανόνας, κανόνας του Bayes και μέσω της περιθωριοποίησης (marginalization) του κάθε κόμβου μέσω της εξίσωσης (4.10).

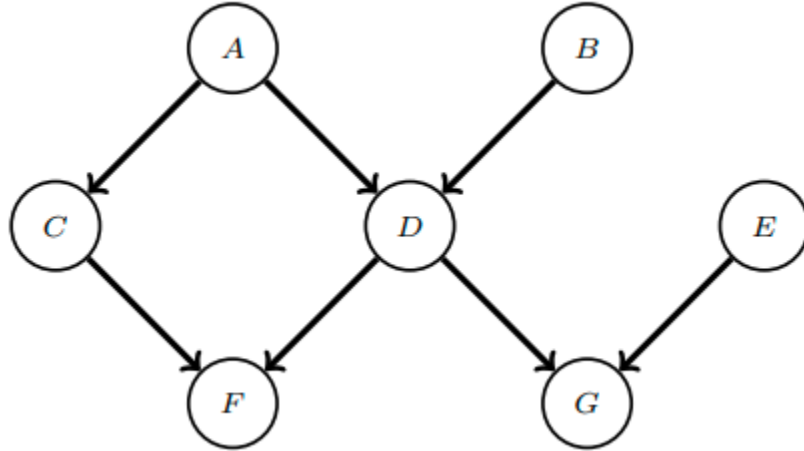
Πιο κατανοητά, μέσω της μεθοδολογίας moralization γράφων, δημιουργούνται τριγωνικοί γράφοι, και επιλέγονται κλίκες που συλλέγουν το κατά το δυνατόν περισσότερους κόμβους. Στη συνέχεια εξετάζεται αν η επιλογή κλικών είναι κατάλληλοι ώστε οι ενώσεις μεταξύ τους να έχουν κοινά στοιχεία ώστε να διασφαλίζεται η ροή πληροφορίας μεταξύ αυτών των κλικών. Ωστόσο Junction Tree, καλείται το δένδρο του οποίου οι κλίκες που έχουν κοινούς κόμβους μεταξύ τους (είτε αυτές συνδέονται με ακμή είτε όχι) έχουν στο μονοπάτι μεταξύ τους την παρουσία αυτών των κόμβων. Για να γίνει αυτό κατανοητό:



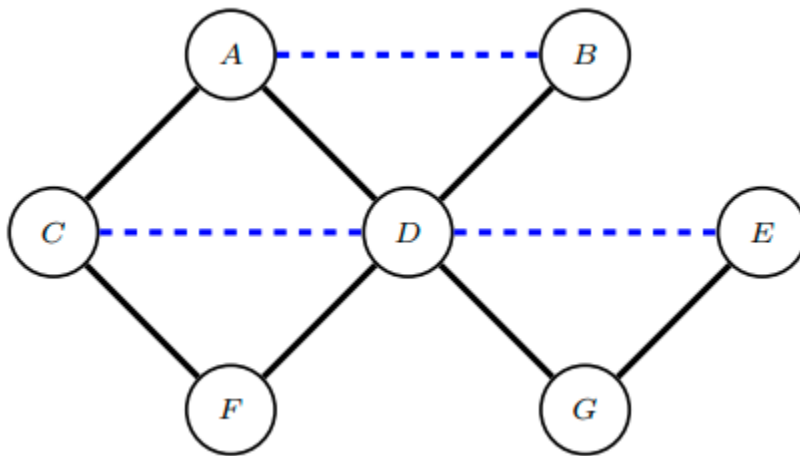
Σχήμα 4.12 Γράφοι M-Moralized Graph, N- Δένδρο Κλίκα, P- Junction Tree

Οι κόμβοι **b** και **d** στον γράφο **N** δεν εμφανίζονται στο μονοπάτι μεταξύ των κλικών $\{a, b, d\}$ και $\{b, c, d\}$ αφού η κλίκα $\{c, d, e\}$ έχει μόνο τον κόμβο **d** μεταξύ των κοινών τους. Το πόρισμα που προκύπτει από το παραπάνω είναι πως τα Junction Trees είναι δένδρα κλικών, όμως το αντίστροφο δεν ισχύει μιας και δεν ικανοποιείται πάντα η παραπάνω συνθήκη των Junction Tree αλγορίθμων.

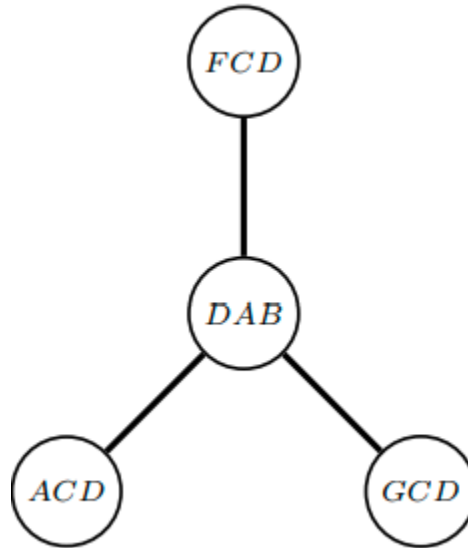
Παράδειγμα 4.2.6. Έστω γραφικό μοντέλο **M**, που είναι κατευθυνόμενος μη κυκλικός γράφος με τους κόμβους **A, B, C, D, E, F** και **G**. Ακολουθείται η γραφική αναπαράσταση της μετατροπής του **M** σε Junction Tree μέσω ταυτόχρονα της επεξήγησης της διαδικασίας με την αναπαράσταση αποτυχημένων προσπαθειών στον καθορισμό κλικών που ικανοποιούν της ιδιότητες του Junction Tree αλγόριθμου.



Σχήμα 4.13 Γραφικό μοντέλο M (κατευθυνόμενος μη κυκλικός γράφος-DAG)

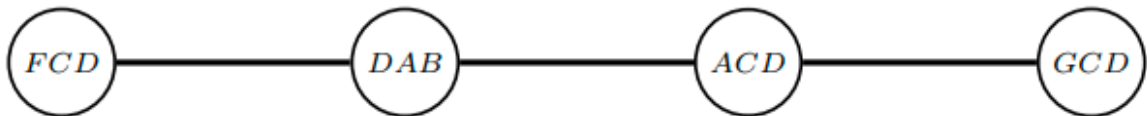


Σχήμα 4.14 Γραφικό μοντέλο M μετά τη διαδικασία Moralization (μη κατευθυνόμενος κυκλικός γράφος)



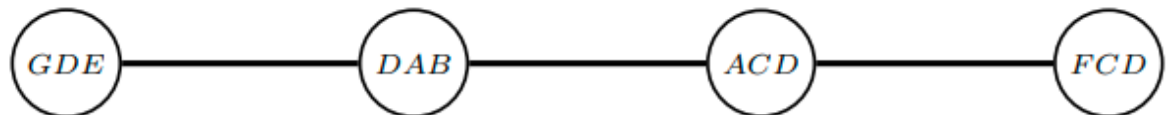
Σχήμα 4.15 Δοκιμή 1: Μετατροπή του αρχικού γράφου M σε Junction Tree

Δοκιμή 1: Μετατροπή του αρχικού γράφου M σε γράφο κλίκα, μέσω της σύνταξης κλικών $\{A,C,D\}$, $\{F,C,D\}$, $\{D,A,B\}$, $\{G,C,D\}$. Δεν αποτελεί Junction Tree καθώς μεταξύ των κλικών $\{F,C,D\}$ και $\{G,C,D\}$, δεν υπάρχουν οι κόμβοι C και D αλλά μόνο ο D στην κλίκα $\{D,A,B\}$.



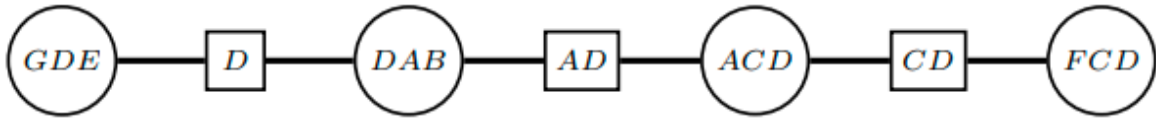
Σχήμα 4.16 Δοκιμή 2: Μετατροπή του αρχικού γράφου M σε Junction Tree

Δοκιμή 2: Μετατροπή του αρχικού γράφου M σε γράφο κλίκα, μέσω της σύνταξης κλικών $\{A,C,D\}$, $\{F,C,D\}$, $\{D,A,B\}$, $\{G,C,D\}$ και στοίχισής τους σε δένδρο όπου κάθε παιδί έχει ένα γονέα. Δεν αποτελεί Junction Tree καθώς μεταξύ των κλικών $\{F,C,D\}$ και $\{A,C,D\}$, δεν υπάρχουν οι κόμβοι C και D αλλά μόνο ο D στην κλίκα $\{D,A,B\}$.



Σχήμα 4.17 Δοκιμή 3: Επιτυχής μετατροπή του αρχικού γράφου M σε Junction Tree

Δοκιμή 3: Μετατροπή του αρχικού γράφου M σε γράφο κλίκα, μέσω της σύνταξης κλικών $\{F,C,D\}$, $\{A,C,D\}$, $\{D,A,B\}$, $\{G,D,E\}$ και στοίχισής τους σε δένδρο όπου κάθε παιδί έχει ένα γονέα. Αποτελεί Junction Tree καθώς στα πιθανά μονοπάτια μεταξύ δύο κλικών, ικανοποιείται η συνθήκη της εμφάνισης όλων των κοινών τους κόμβων.



Σχήμα 4.18 Δοκιμή 3: Αποτύπωση των κοινών κόμβων-διόδων-της πληροφορίας μεταξύ των κλικών του Junction Tree

4.3 Δυναμικά Μπεϋζιανά Δίκτυα – DBN

4.3.1 Εισαγωγή

Τα Δυναμικά Μπεϋζιανά δίκτυα - DBN αποτελούν το προϊόν της αναγνώρισης της ευχρηστίας και αξιοπιστίας των BN στην ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων της πραγματικότητας (Jensen and Nielsen, 2007). Είναι μία διεύρυνση του πεδίου των BN μιας και στα DBN εισέρχεται ο όρος του χρόνου στην ανάλυση των συστημάτων τα οποία από στατικά πια περιγράφονται δυναμικά κατά την πάροδο του χρόνου αλλά και της ροής της πληροφορίας μεταξύ των κόμβων διαδοχικών ή μη χρονικά βημάτων. Αποτυπώνεται γραφικά μέσω δύο ή και παραπάνω πανομοιότυπων BN που εκπροσωπούν διαφορετικές εκφάνσεις του υπό μελέτη συστήματος χρονικά.

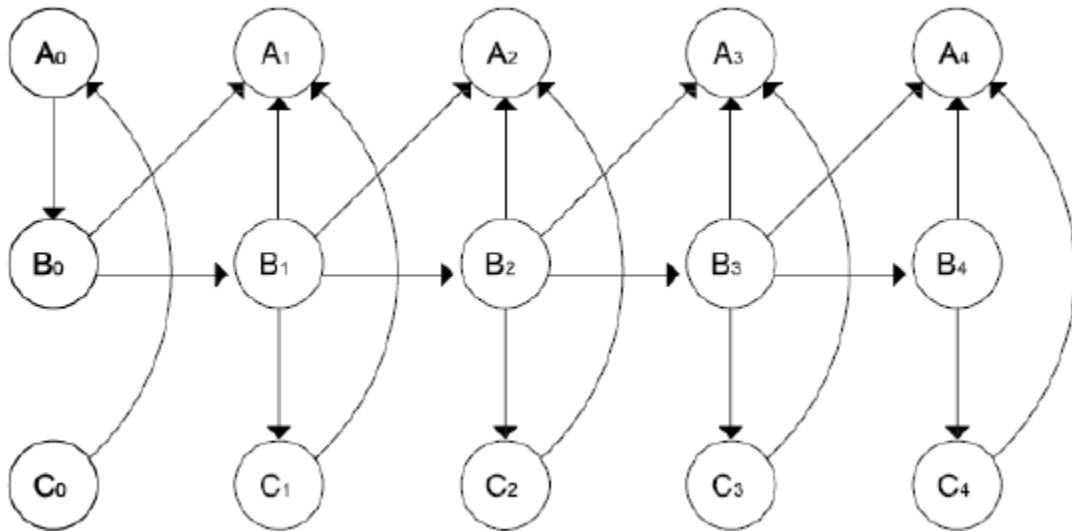
4.3.2 Στοχαστικά πεδία Markov - Hidden Markov Models

Τα στοχαστικά πεδία Markov προήλθαν από τον Ρώσο μαθηματικό Andrei Markov (1856-1922), που μελέτησε αλληλουχίες εξαρτώμενων τυχαίων μεταβλητών. Για καιρό τα HMM παρέμειναν αχρησιμοποίητα εξαιτίας των δύσκολων υπολογισμών που απαιτούσαν, ωστόσο με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών έγιναν ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάπτυξη της μηχανικής μάθησης. Η κουβέρτα Markov (Markov Blanket) είναι μία από τις έννοιες που αναπτύχθηκαν, και ορίζεται ως το ελάχιστο υποσύνολο ενός συνόλου τυχαίων μεταβλητών, που υπό τη συνθήκη του, καθιστά μία μεταβλητή ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες μεταβλητές του συνόλου. Αυτό σημαίνει πως μία μεταβλητή θα είναι ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες μεταβλητές του συνόλου υπό τη συνθήκη της κουβέρτας Markov της. Στα BN, η κουβέρτα Markov μιας μεταβλητής A είναι το σύνολο των γονέων της, των παιδιών της, και των μεταβλητών που έχουν κοινά παιδιά με την ίδια.

Πρακτικά, σε ένα DAG, κάθε τυχαία μεταβλητή είναι ανεξάρτητη από τους μη απογόνους της υπό τη συνθήκη των γονέων της. Για έναν κόμβο A , δεδομένων των καταστάσεων των κόμβων που ανήκουν στη Markov blanket του, ο κόμβος A είναι d -separated από τους υπόλοιπους του δικτύου. Αυτή η ιδιότητα απλοποιεί την πολυπλοκότητα και το πλήθος των υπολογισμών του BN ενός πολυδιάστατου συστήματος (Boudali & Dugan, 2006).

4.3.3 Δυναμικά Μπεϋζιανά Δίκτυα – DBN

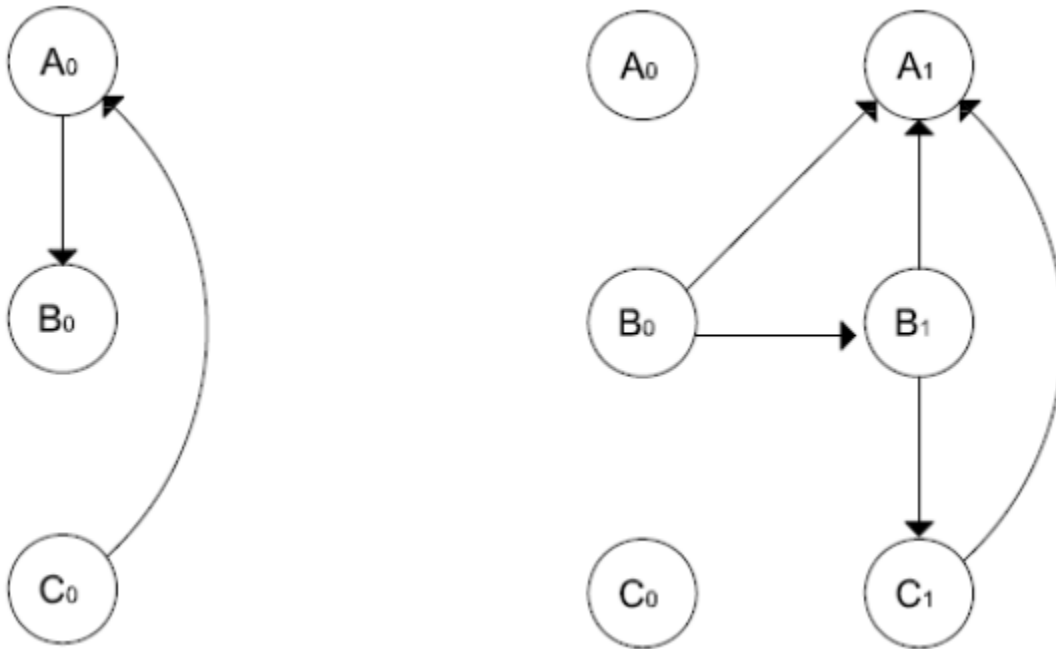
Ένα χαρακτηριστικό των DBN είναι πως οι δεσμευμένες πιθανότητες και άρα οι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων (CPT) παραμένουν ίδιοι στα χρονικά βήματα της πιθανοθεωρητικής ανάλυσης του υπό μελέτη συστήματος. Η κατανομή πιθανότητας ενός κόμβου X στο χρονικό βήμα t σε ένα DBN εξαρτάται από την κατανομή πιθανότητας των γονέων του στο t και των υπολοίπων κόμβων του DBN στο χρονικό βήμα $t-1$ (Medjaher et al., 2009). Οι κόμβοι του DBN είναι συνήθως τυχαίες μεταβλητές και η εξάρτηση μεταξύ τους συμβολίζεται μέσω ενός DAG. Τα DBN μπορούν να μελετηθούν σε διαφορετικά χρονικά βήματα τα οποία είναι ικανά για να παρουσιαστούν αλλαγές στις καταστάσεις του υπό μελέτη συστήματος.



Σχήμα 4.19 Αναπαράσταση DBN σε πέντε χρονικά βήματα 0-1-2-3-4 για τρεις μεταβλητές A, B και C.

Όπως παρατηρείται από τη γραφική αναπαράστασή ενός DBN, αυτό αποτελείται από τα εξής δίκτυα (Stephenson, 2000):

- Αρχικό Δίκτυο: Περιγράφονται οι προγενέστερες κατανομές πιθανοτήτων των μεταβλητών του DAG όπως αυτές υπολογίζονται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα.
- Μεταβατικό Δίκτυο, όπου περιγράφονται οι κατανομές πιθανοτήτων υπό τη συνθήκη του προηγούμενου χρονικού βήματος του δικτύου. Απεικονίζει την εξέλιξη στα μετέπειτα απ' το αρχικό δίκτυο βήματα εξέλιξης του υπό μελέτη συστήματος.



Σχήμα 4.20 Αναπαράσταση αρχικού και μεταβατικού δικτύου

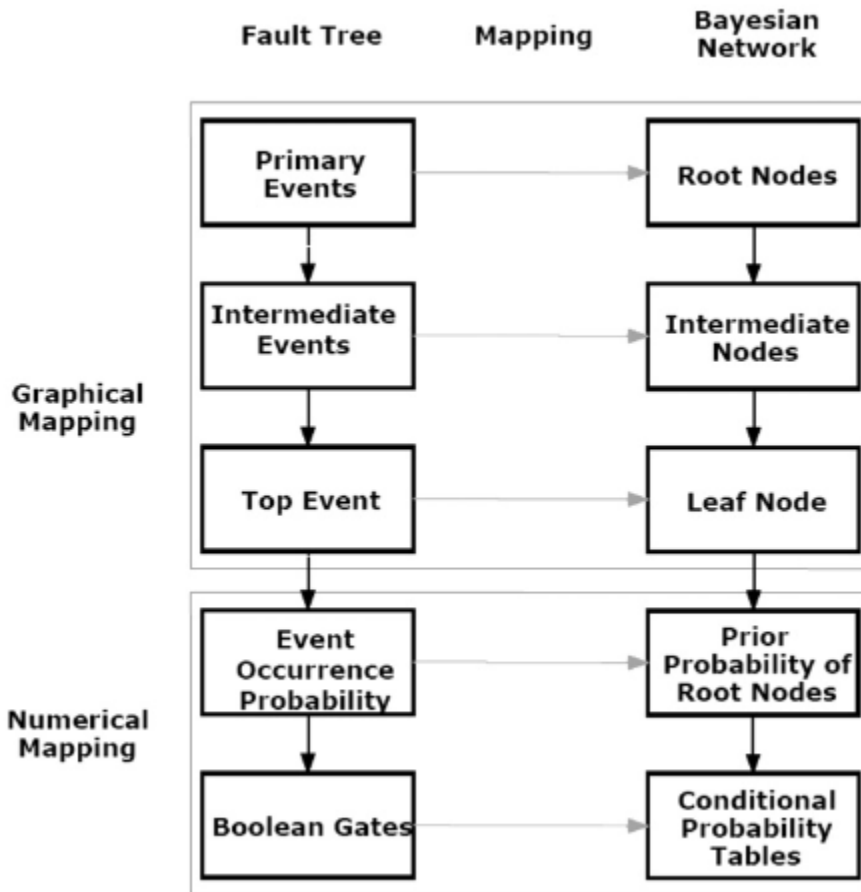
4.3.4 Μετάβαση από τα Δένδρα Σφαλμάτων στα Δυναμικά Μπεύζιανά Δίκτυα

Κάποιες από τις βασικές μεθόδους που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται ευρέως και σήμερα για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας πολύπλοκων και μη συστημάτων ήταν των δένδρων σφαλμάτων (FT), τα οποία μπορεί να είναι στατικά (FT) ή δυναμικά (DFT). Αποτελούν μία μεθοδολογία που διερευνά τις αιτίες και τα γεγονότα που έχουν ως αποτέλεσμα την πραγματοποίηση ενός κρίσιμου ατυχήματος (Ventikos, 2012). Τα FT αποτυπώνουν το συνδυασμό γεγονότων και όχι τη διαδοχική σειρά εμφάνισής τους. Συνεπώς, σε σύγχρονα δυναμικά συστήματα που πρέπει να μελετάται αυτή η αλληλεξάρτηση μεταξύ των στοιχείων τους καθίστανται ανεπαρκή. Τα DFT αποτελούν συνέχεια της ανάλυσης των FT, καθώς νέες λογικές πύλες εντάσσονται σε αυτά που δηλώνουν τις διαφορετικές ακολουθίες αποτυχίας και εξαρτήσεις των στοιχείων ενός συστήματος (Marquez et al., 2008). Παρατηρείται πως η έννοια του χρονικά μεταβαλλόμενου συστήματος δεν εισέρχεται στις προαναφερθέντες μεθοδολογίες αποτίμησης αξιοπιστίας συστημάτων και ένας νέος τρόπος μοντελοποίησης μπορεί να αναπτυχθεί για την επέκταση της μελέτης τους χρονικά.

Τα DBN μπορούν να υπερκεράσουν τα προβλήματα της στατικότητας που ενέχουν τα προαναφερθέντα μοντέλα και ταυτόχρονα να αναδείξουν τις εξαρτήσεις μεταξύ των υποσυστημάτων ενός σύγχρονου και χρονικά μεταβαλλόμενου μοντέλου. Τα βήματα που ακολουθούνται για τη μετάβαση από τα FT στα BN και στη συνέχεια στα DBN είναι τα εξής (Khazad et al., 2011):

1. Προδιαγράφεται μέσω των FT το υπό μελέτη σύστημα, με τον καθορισμό του τελικού γεγονότος (Top Event) και των βασικών γεγονότων (Primary Events) και των ενδιάμεσων αυτών (Intermediate Events).

2. Αναπτύσσεται το BN που να αποτυπώνει τα γεγονότα του FT σε ρίζες (Root Nodes=Primary Events) ενδιάμεσων κόμβων του DAG (Intermediate Nodes=Intermediate Events) και του τελικού γεγονότος (Leaf Node=Top Event)
3. Σε λογική συνέχεια του βήματος 2, στους κόμβους ρίζες του BN, αποδίδεται η πιθανότητα πραγματοποίησης των βασικών γεγονότων του FT, και στη συνέχεια μέσω των λογικών πυλών του FT αποδίδονται πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων στους ενδιάμεσους κόμβους και στον κόμβο κορυφή (Leaf Node) που αντιπροσωπεύει το τελικό γεγονός (Top Event).



Σχήμα 4.21 Αλγόριθμος Μετάβασης FT- BN

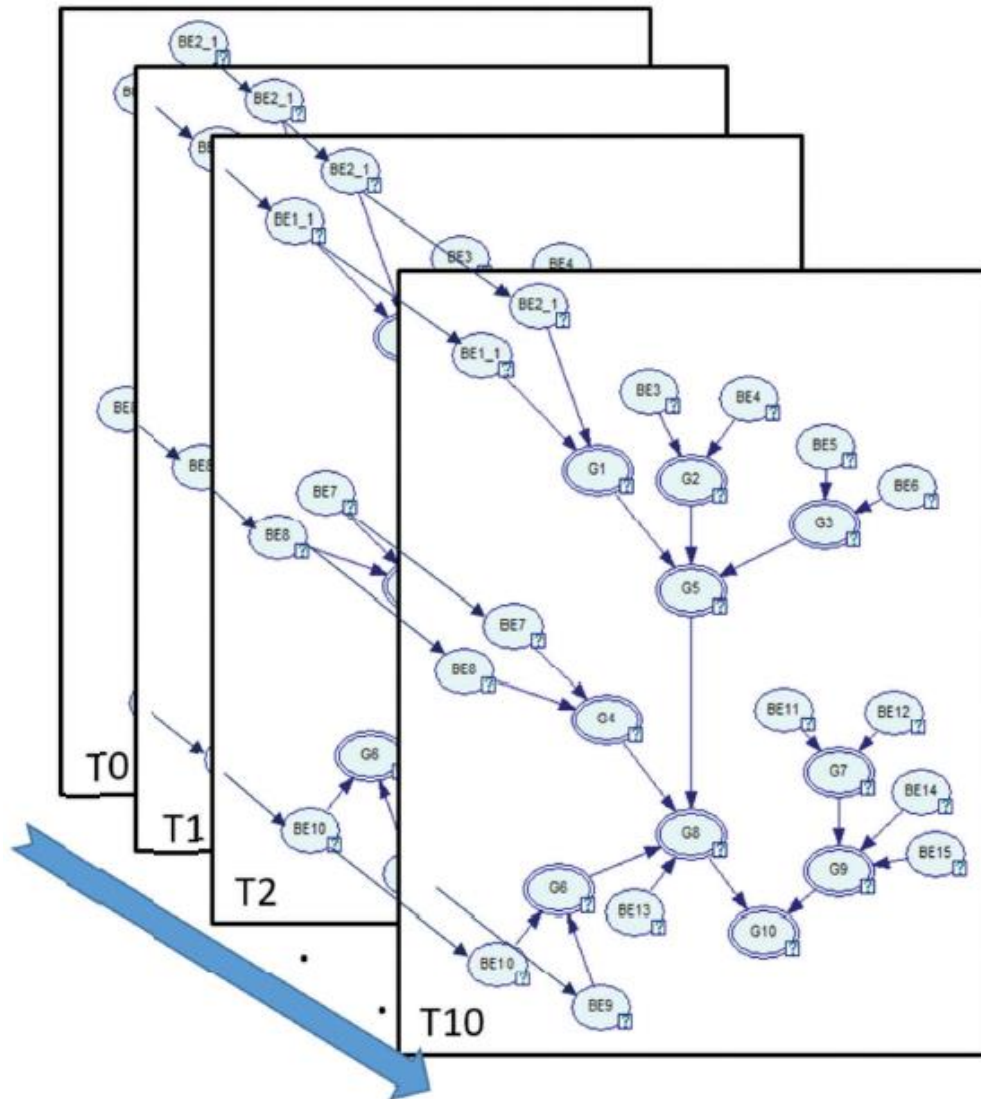
Ένα DBN μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω ενός DAG που ενσωματώνει την σχέση μεταξύ συμβάντων που οδηγούν σε ένα τυχαίο γεγονός, και μπορεί να χαρακτηριστεί ως $(B, B \rightarrow)$ όπου «B» αντιπροσωπεύει το στατικό BN και « $B \rightarrow$ » την επέκτασή του σε σειριακά χρονικά βήματα (Xu et al., 2023). Για την ολοκλήρωση της μετάβασης από τα BN στα DBN, μπορούν να ακολουθηθούν τα εξής βήματα (Kabir et al., 2019):

1. Καταστρώνεται πλάνο της παρατήρησης του υπό μελέτη συστήματος. Καθορίζεται ο χρόνος στον οποίο είναι επιθυμητή η ανάλυση και μελέτη του. Το FT έχει μέσω των προηγούμενων βημάτων ήδη μετατραπεί σε BN για το οποίο τώρα καθορίζονται τα χρονικά πλαίσια μελέτης του.

2. Οι κόμβοι/γεγονότα που η πιθανότητα αστοχίας τους μεταβάλλεται χρονικά αντιπροσωπεύουν την πιθανότητα αστοχίας των αντίστοιχων στοιχείων-μηχανημάτων του συστήματος, όπως προς παράδειγμα την πιθανότητα αστοχίας των σωληνώσεων σε ένα δίκτυο κυκλοφορίας θαλάσσης. Χαρακτηρίζονται από τις προγενέστερες πιθανότητες που αυτές φέρουν και μεταβάλλονται στην πάροδο του χρόνου μέσω της απόδοσης σε αυτές, κατανομών πιθανότητας όπως η εκθετική ή Weibull, που αποτελούν τις πιο διαδεδομένες στον τομέα της αξιοπιστίας πολύπλοκων συστημάτων (Gong et al., 2022).
3. Οι κόμβοι που δεν είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι, αποτελούν κόμβους παιδιά των προαναφερθέντων και μεταβάλλονται βάση των δεσμευμένων πιθανοτήτων που του αποδίδονται μέσω της ποσοτικοποίησης της σχέσης του με τους γονείς τους χρησιμοποιώντας τις λογικές πύλες του προηγούμενως ανεπτυγμένου FT. Η επιλογή κατάλληλων σχέσεων μέσω της μελέτης διεθνούς βιβλιογραφίας για υπό μελέτη συστήματα και εξαρτήματα αυτών συχνά είναι δύσκολη λόγω περιορισμένων δεδομένων και πολλές φορές για την ανάπτυξη των δυναμικών σχέσεων μεταξύ των διαφορετικών κόμβων του BN αντλούνται στοιχεία μέσω της γνώμης των ειδικών, έμπειρων επαγγελματιών της ναυτιλίας (Ventikos et al., 2022).
4. Το τελικό βήμα είναι ο συμπερασμός στο DBN για τα διάφορα χρονικά πλαίσια μελέτης του μέσω αλγόριθμων, όπως αυτός του Junction Tree, και εκτελείται υπολογισμός για κάθε επιλεγθείσα χρονική στιγμή. Υπολογίζεται η πιθανότητα του τελικού γεγονότος και στη συνέχεια μέσω της χρήσης της μπεϋζιανής θεωρίας όπως αναπτύχθηκε πρότερα, μπορεί να γίνει ανάλυση της εξάρτησης και των σχέσεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφορετικών κόμβων του υπό μελέτη συστήματος (Kabir et al., 2019).



(α)



(β)

Σχήμα 4.22 Διαδικασία Μετάβασης από FT σε DBN, παράδειγμα υπολογισμού πιθανότητας σβησίματος φλόγας για την καύση των αποβαλλόμενων προς την ατμόσφαιρα προϊόντων διύλισης

Στη συνέχεια, για το επιθυμητό πλαίσιο της ανάλυσης, γίνεται υποδιαίρεσή του σε χρονικά βήματα που θα γίνει ο συμπερασμός των BN. Εκτελείται ο αλγόριθμος junction tree σε κάθε ένα από αυτά και τα αποτελέσματα αυτής της επαναληπτικής διαδικασίας συνθέτουν τις πιθανές καταστάσεις του μοντέλου στο πέρασμα του χρόνου βάση των αρχικών συνθηκών των προγενέστερων πιθανοτήτων των ριζών του BN και των δεσμευμένων πιθανοτήτων των παιδιών τους. Παράδειγμα υπολογισμού των BN παρουσιάζεται για το σύστημα αναρροφήσεων του δικτύου με σύγκριση των αποτελεσμάτων των πράξεων πινάκων με Α) Τα αποτελέσματα του FT Β) Τα αποτελέσματα της MATLAB και Γ) Τα αποτελέσματα του GeNIe (Παράρτημα ΙΙΙ).

4.3.5 Μέθοδοι προγραμματισμού BN

Η μελέτη της πραγματικότητας και συστημάτων που ενδιαφέρουν τους ερευνητές μέσω BN και DBN γίνεται μέσω λογισμικών που ακόμα δεν έχουν αναπτυχθεί στο βαθμό που είναι εύχρηστα για έναν νέο χρήστη που μπορεί να επιθυμούσε μία γρήγορη και ευνόητη μοντελοποίηση ενός υπό το ενδιαφέρον του συστήματος. Αυτό συμβαίνει μιας και τα περισσότερα προγραμματιστικά περιβάλλοντα που επιτρέπουν την ανάπτυξη αλγορίθμων για τη μελέτη πολύπλοκων συστημάτων, υλοποιούνται σε γλώσσες προγραμματισμού που προϋποθέτουν ο χρήστης να είναι εξοικειωμένος με γλώσσες προγραμματισμού όπως Matlab, Python, C++ κ.ά. που συνήθως δε διαθέτουν περιβάλλον χρήστη φιλικό προς νέους ενδιαφερόμενους πέραν του ερευνητικού ενδιαφέροντος του τομέα. Καθώς όμως οι έρευνα μέσω των BN αυξάνεται (βλ. Σχήμα 4.9, Σχήμα 4.10) τόσο και περισσότερα προγράμματα και αλγόριθμοι έτοιμοι προς χρήση αναπτύσσονται σε κάθε γλώσσα προγραμματισμού. Κάποια από τα διαθέσιμα λογισμικά είναι τα εξής:

1. BAYES NET TOOLBOX – MATLAB

Η βιβλιοθήκη του BNT ήταν από τις πρώτες που αναπτύχθηκαν σε αξιοπρεπή βαθμό με αρκετές μεθόδους συμπερασμού και γραφικών αναπαραστάσεων που ήταν και ελεύθερες για το ευρύ κοινό. Το BN απεικονίζεται ως μία δομή που περιλαμβάνει γράφο, τις κατανομές των υπό συνθήκη πιθανοτήτων ή Conditional Probability Distribution (CPD) και άλλες πληροφορίες που αναπτύχθηκαν και πιο πάνω όπως evidence, likelihood κ.ά. Το BNT προσφέρει ποικιλία αλγορίθμων συμπερασμού, κάθε ένας κάνει απλουστεύσεις μεταξύ ακρίβειας, γενικότητας, απλότητας, ταχύτητας κτλ. Όλοι οι μέθοδοι συμπερασμού έχουν την ίδια βάση, οπότε μπορεί εύκολα ο χρήστης να τις εναλλάσσει. Οι υπό συνθήκη πιθανότητες των καθορισμένων μεταβλητών μπορούν να είναι συνεχείς ή διακριτές. Η εργαλειοθήκη ήταν πρώτη στο είδος της και έθεσε το πρότυπο των DBN βιβλιοθηκών. Είναι και σήμερα ευρέως διαδεδομένη η χρήση της, επειδή ο κώδικας είναι εύκολα να επεκταθεί και είναι καλώς καταγεγραμμένος.

2. Genie – Software BAYESFUSION

Το Graphical Network Interface (GeNIe) είναι το γραφικό περιβάλλον χρήστη της SMILE βιβλιοθήκης. Έχει υλοποιηθεί σε C++ και κάνει βαριά χρήση των Microsoft Foundation κλάσεων. Η έμφαση του δίνεται στην προσβασιμότητα και φιλικότητα του περιβάλλοντος χρήστη και στην κατασκευή μοντέλων απόφασης χρησιμοποιώντας διαισθητικά ένα γραφικό click-and-drop περιβάλλον.

3. BayesServer – BAYES SERVER

Εύληπτο λογισμικό με κατανοητό και φιλικό γραφικό περιβάλλον χρήστη που επιτρέπει την κατασκευή BN, DBN και MDP (Markov Decision Processes). Είναι ένα πολύπλευρο και φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον για την κατασκευή γραφικών μοντέλων απόφασης και για την εκτέλεση διαγνώσεων.

4. BayesiaLAB – BAYESIA

Λογισμικό γραμμένο σε JAVA με εφαρμογή API φιλικό προς το χρήστη για την κατασκευή γραφικών μοντέλων απόφασης. Ιδανικό για τη δημιουργία μοντέλων μηχανικής μάθησης και εφαρμογή μεθόδων συμπερασμού σε υπάρχοντα BN.

4.3.6 Χρησιμότητα και εφαρμογές στη μελέτη Ρίσκου

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η ιδιότητα Δυναμικών Μπεϋζιανών δικτύων να μπορούν να αναπαραστήσουν αποτελεσματικά αλλαγές στην κατάσταση του συστήματος εξαιτίας της παρόδου του χρόνου έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη για αρκετές εφαρμογές. Αυτή ωστόσο είναι μια πολύ απλουστευμένη προσέγγιση για τις δυνατότητες που έχει ένα DBN και τα αποτελέσματα που μπορεί να εξάγει ένας ερευνητής αξιοποιώντας πλήρως. Δημιουργώντας την κατάλληλη δομή και μέσω κατά το δυνατόν βέλτιστης συλλογής δεδομένων για την ελαχιστοποίηση της αβεβαιότητας, ένα πλήθος συστημάτων μπορεί να μοντελοποιηθεί ώστε να προβλέψει τις μεταβολές που συμβαίνουν σε αυτό αλλά και τις εξαρτήσεις των διαφορετικών γεγονότων/μεταβλητών του μεταξύ τους (Ventikos et al., 2022). Αυτή η ικανότητα των DBN έχει συνεισφέρει στην κατανόηση πολύπλοκων συστημάτων αλλά, και το σημαντικότερο, στις λήψεις αποφάσεων για τη διαχείριση του ρίσκου που αυτά ενέχουν. Η αναθεώρηση στις διαδικασίες επιθεώρησης, συντήρησης ή αναδιαμορφώσεων που μπορεί να χρειάζονται λόγω αυξημένου ρίσκου που άλλοτε δεν είχε παρατηρηθεί λόγω της δυσκολίας προσέγγισης ρίσκου ενός πολύπλοκου δικτύου μεταβλητών, αποτελεί βασικό αίτιο της χρήσης των DBN σε συστήματα όλων των βιομηχανιών, της ιατρικής και άλλων που κρύβουν κινδύνους προς την ανθρώπινη ζωή.

Με την εξέλιξη και ανάπτυξη αλγορίθμων υπολογισμού DBN αλλά και αποτύπωσής τους σε γραφικό περιβάλλον φιλικό προς τους ερευνητές, διαδίδονται ταχύτατα και τα λογισμικά που χρησιμοποιούνται από εταιρείες και εκπαιδευτικά ιδρύματα για τη μοντελοποίηση συστημάτων μέχρι πρότινος δυσνόητων ως προς την κατανόηση της λειτουργίας τους. Μέσω των DBN, μπορεί να προβλεφθεί η γήρανση πολύπλοκων συστημάτων και να ανακαλυφθούν σημαντικοί κίνδυνοι που τα διέπουν. Αυτό επιτυγχάνεται στην παρούσα εργασία μέσω της RBI μεθοδολογίας όπως αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3.3 και της ταυτόχρονης μοντελοποίησης με DBN. Λόγω του υπολογισμού της μεταγενέστερης πιθανότητας υπό καθεστώς αβεβαιότητας, ποσοτικοποιείται το ρίσκο και άρα αναπτύσσεται μέθοδος που μπορεί να συμπεριληφθεί στη διαδικασία λήψης αποφάσεων ως προς τη λειτουργία, χρήση, συντήρηση και την επιθεώρηση πολύπλοκων μηχανολογικών συστημάτων.

5. Συστήματα ψύξης στη θαλάσσια βιομηχανία

5.1 Εισαγωγή – Επιλογή του υπό μελέτη συστήματος

Το δίκτυο κυκλοφορίας θαλάσσης – Sea Water Cooling System - SWCS, επηρεάζει άμεσα και σε σημαντικό βαθμό την αποδοτικότητα του πλοίου μιας και η περίσσεια θερμότητας οδηγεί σε βλάβη των μηχανημάτων εάν αυτή δεν είναι αυστηρώς ελεγχόμενη (Ιωαννίδης, 2002). Για να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία των μηχανημάτων εντός των αποδεκτών ορίων θερμοκρασίας, η θερμότητα θα πρέπει να απελευθερωθεί σε κάποιο μέσο. Το θαλασσινό νερό το πλέον προτιμητέο μέσο απελευθέρωσης της θερμότητας των μηχανημάτων του πλοίου μιας και υπάρχει σε αφθονία κατά τη διάρκεια του ταξιδιού κάθε πλοίου. Τα είδη του συστήματος ψύξης σε ένα σύγχρονο πλοίο θα μπορούσαν να διαχωριστούν σε δύο κύρια συστήματα, το σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού και το σύστημα ψύξης γλυκού νερού. Το πρώτο λόγω του ισχυρού διαβρωτικού χαρακτήρα του θαλασσινού νερού, χρησιμοποιείται πια κυρίως μόνο σαν μέσο απελευθέρωσης θερμότητας του συστήματος γλυκού νερού (Κυρτάτος, 1996). Είναι ανοιχτό κύκλωμα, μιας και το θαλασσινό νερό διοχετεύεται μέσω αντλιών στους εναλλάκτες θερμότητας και στη συνέχεια διαχέεται πάλι πίσω στη θάλασσα. Διατηρώντας σταθερή τη θερμοκρασία στο κλειστό κύκλωμα γλυκού νερού, τα κύρια συστήματα πρόωσης του πλοίου και οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας του διατηρούνται στην κατά τους κατασκευαστές τους βέλτιστη θερμοκρασία λειτουργίας.

Τα κύρια και βοηθητικά μηχανήματα στα σημερινά πλοία, όπως η κύρια μηχανή, ηλεκτρομηχανές, αεροσυμπιεστές, συμπυκνωτές, εγκαταστάσεις κλιματισμού κ.ά. παράγουν σημαντική ποσότητα θερμότητας. Η θερμότητα αυτή είτε χρησιμοποιείται σε επόμενα στάδια για να είναι ενεργειακά αποδοτικότερο το πλοίο, όπως για παράδειγμα για τη χρήση παραγωγής γλυκού νερού στην αντίστοιχη μονάδα μέσω της χρήσης του θερμού γλυκού νερού μετά την ψύξη των χιτωνίων της κύριας μηχανής, είτε περιορίζεται η εκτεταμένη διάχυσή της από τα συστήματα ψύξης που βρίσκονται πάνω σε αυτό. Οι κατασκευαστές όλων των εξαρτημάτων και συστημάτων που αποτελούν ένα σύγχρονο πλοίο, προδιαγράφουν συγκεκριμένα όρια θερμοκρασίας, στα οποία καθίσταται ασφαλής η λειτουργία κάθε μηχανήματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η αδυναμία ικανής ψύξης στα συστήματα πρόωση και μη του πλοίου, αποτελεί κατά αρχή την βασικότερη προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται σε ένα πλοίο για την αδιάκοπη και ασφαλή λειτουργία του.

Η συνεχής κυκλοφορία της θάλασσας, εντός των δικτύων του μηχανοστασίου και του πλοίου γενικότερα, αποτελεί μία οικονομική και αποτελεσματική μέθοδο ψύξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα συστήματα ψύξης να έχουν αναπτυχθεί και πια να σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε επιτρεπόμενα ύψη το ρίσκο που φέρει η λειτουργία τους. Αρχικά το σύστημα ψύξης που χρησιμοποιούταν πάνω στα πρώτα πλοία, είχε ως αρχή σχεδιασμού του την ψύξη και όλων των συστημάτων που πια καλύπτει το γλυκό νερό σήμερα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Αυτό φυσικά είχε ως αποτέλεσμα την γρηγορότερη διάβρωση όλου του εξοπλισμού και άρα παρουσίαζε αυξημένο ρίσκο προς όλη τη μηχανολογική εγκατάσταση του πλοίου.

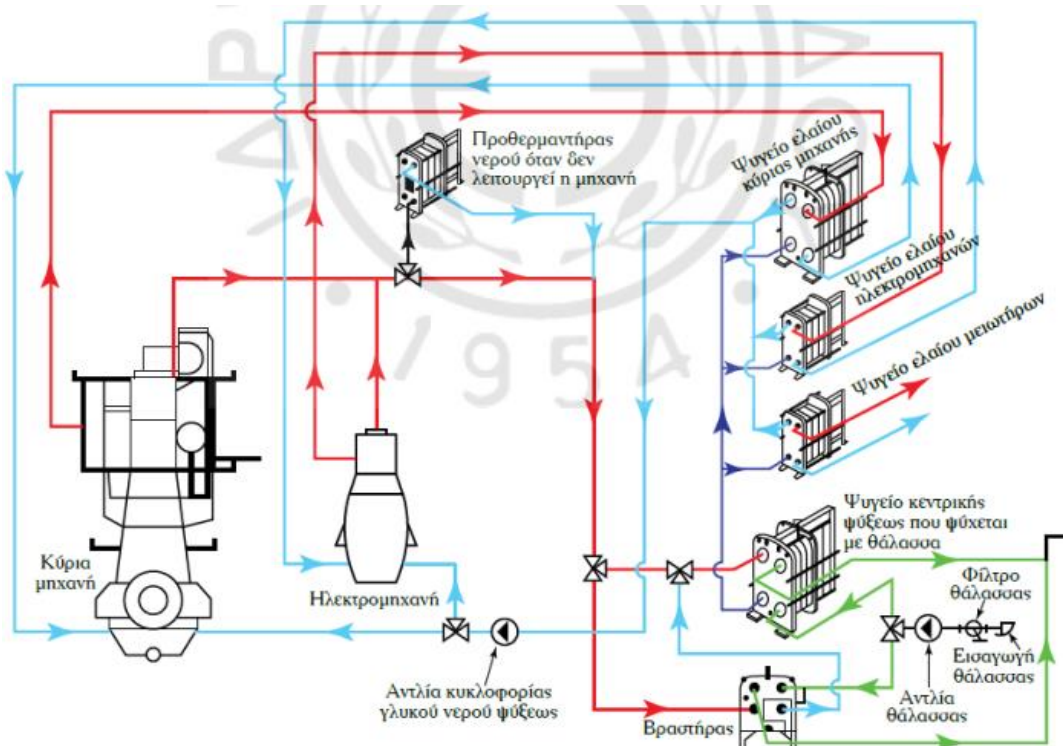
- Η αντοχή του μηχανολογικού εξοπλισμού διαφυλάσσεται περεταίρω μιας και δεν υπάρχουν πια «κρύες» εκκινήσεις αφού μπορεί να γίνει επανακυκλοφορία του γλυκού νερού κατά την εκκίνηση των μηχανημάτων χωρίς να χρειάζεται άντληση του χαμηλότερου θερμοκρασιακά αλμυρού νερού στα συστήματα πρόωσης ή παραγωγής ενέργειας του πλοίου

Λόγω των πολυάριθμων προτερημάτων που προσέφερε αυτή η αλλαγή στη λειτουργία του πλοίου αλλά και στο απαιτούμενο κόστος εγκατάστασής του, το δίκτυο ψύξης του σύγχρονου πλοίου αποτελείται από δύο κύρια υποσυστήματα των οποίων η μελέτη παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια:

I. Δίκτυο Κυκλοφορίας Θαλάσσης – Sea Water Cooling System

II. Δίκτυο Ψύξεως Γλυκού Νερού – Fresh Water Cooling System, το οποίο με τη σειρά του διακρίνεται στα εξής:

- Κύριο δίκτυο ψύξεως – Main Central Cooling Fresh Water System που διαχωρίζεται στα:
 - Δίκτυο υψηλής θερμοκρασίας – High Temperature ή HTFWCS
 - Δίκτυο χαμηλής θερμοκρασίας – Low Temperature ή LTFWCS
- Δευτερεύον δίκτυο ψύξεως – Auxiliary Central Cooling Fresh Water System



Σχήμα 5.2 Τυπική Διάταξη Δικτύων Ψύξεως μηχανοστασίου Σύγχρονων πλοίων (Δαγκίνη και Γλύκα, 2017)

Τη σημερινή εποχή, έρευνες εκτελούνται για τη μοντελοποίηση του ρίσκου που φέρουν τα μηχανολογικά μέρη ενός πλοίου με ιδιαίτερη έμφαση στα συστήματα πρόωσης. Το δίκτυο ψύξης γλυκού νερού της κύριας μηχανής, κρατείται στην απαιτούμενη και πολύ συγκεκριμένη θερμοκρασία για την ομαλή λειτουργία της, μέσω του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας πολυάριθμων συστημάτων πάνω στα σύγχρονα πλοία. Η κύρια μηχανή του πλοίου πρέπει να ψύχεται συνεχώς κατά τη λειτουργία της αλλά και το δίκτυο ψύξης να είναι ήδη σε λειτουργία προτού εκείνη ξεκινήσει, ώστε να επιτευχθούν τα παρακάτω:

- Μείωση της θερμοκρασίας των διαφόρων μερών του κινητήρα ώστε οι αναπτυσσόμενες τάσεις να μην ξεπερνούν τις επιτρεπόμενες για κάθε υλικό
- Διατήρηση κατά το δυνατόν ομοιόμορφης διανομής θερμοκρασιών ώστε να μειώνονται οι θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την καύση
- Περιορισμός των θερμοκρασιών ώστε να αποφεύγεται η ψυχρή και η θερμή διάβρωση
- Περιορισμός της επιφανειακής θερμοκρασίας των μερών που ολισθαίνουν το ένα πάνω στο άλλο (π.χ. έμβολο-χιτώνιο) ώστε να μη μειώνεται το ιξώδες του εργαζόμενου λιπαντικού
- Επίτευξη καλύτερου βαθμού πληρώσεως με ψύξη και αύξηση της πυκνότητας του αέρα πληρώσεως

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται τα αποτελέσματα μελέτης μέσω στατικών Μπεϋζιανών δικτύων στο σύστημα της κύριας μηχανής πλοίου και των κύριων υποσυστημάτων του (Dikis et al., 2015).

Πίνακας 5.1 Κύρια Μηχανή και Υποσυστήματα - πιθανότητα αστοχίας

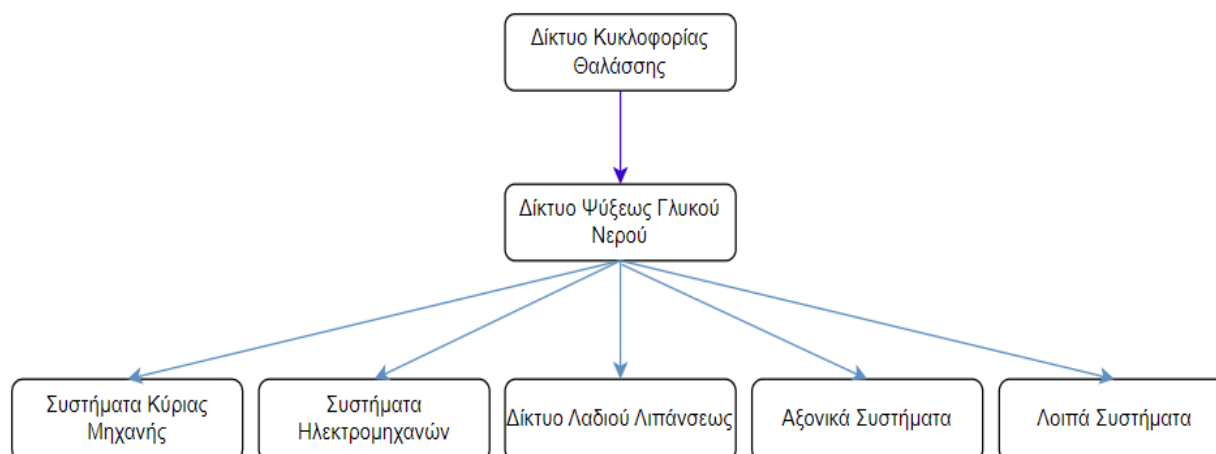
Ομαδοποίηση Συστημάτων ΚΜ	Πιθανότητα Αστοχίας(%)
Κύρια Μηχανή	0.5874
Σύστημα Λίπανσης	0.0563
Εσωτερικά μηχανικά μέρη	1.7509
Εξωτερικά μηχανικά μέρη	0.5919
Σύστημα πληρώσεως	0.2848
Σύστημα αυτοματισμών	0.1881
Σύστημα Ψύξης	0.5639

Από τα παραπάνω διακρίνεται η σημαντικότητα του συστήματος ψύξης στην κύρια μηχανή του σύγχρονου εμπορικού πλοίου καθώς κατέχει την επόμενη θέση σε πιθανότητα αστοχίας από τα μηχανικά μέρη της κύριας μηχανής (έμβολα, χιτώνια κ.ά.) και τα εξωτερικά

(αντλίες καυσίμων, στροφαλοφόρος άξονας κ.ά.) της. Η συγκεκριμένη έρευνα έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος INCASS (Inspection Capabilities for Enhanced Ship Safety) το οποίο αποτελεί σύμπραξη σημαντικών οργανισμών όπως νηογνώμονες, ναυτιλιακών εταιρειών και πανεπιστημίων στοχεύοντας στην καλυτέρευση της επιθεώρησης και της στοχευμένης επίβλεψης των συστημάτων του πλοίου ώστε να αποφευχθούν τα ατυχήματα στα πλοία, με ταυτόχρονη μέριμνα του περιβάλλοντος και του συνολικού ρίσκου που φέρουν κατά τη λειτουργία τους. Επιπλέον το INCASS παρουσιάζει μεθοδολογίες αντιμετώπισης ρίσκου μέσω CBM που θα μπορέσουν να παρέχουν στα πλοία αποδοτικότερες και πιο δομημένες εφαρμογές επιθεώρησης και συντήρησης. Η προαναφερθείσα έρευνα αποτελεί και έναν απ' τους λόγους επιλογής στην παρούσα εργασία του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης, το οποίο ρυθμίζει το δίκτυο ψύξης γλυκού νερού, για τη μοντελοποίηση και προσέγγιση ως προς το ρίσκο που αυτό φέρει κατά την πάροδο του χρόνου.

Αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την κατανόηση της σημαντικότητας της σωστής λειτουργίας των δικτύων ψύξης του πλοίου, η καταγραφή των συστημάτων που ρυθμίζουν την θερμική τους ενέργεια μέσω αυτού. Ωστόσο, ανά τύπο πλοίου, μεγέθους αλλά και σχεδιαστή, αυτά τα συστήματα μπορεί να διαφέρουν, έχοντας πάντα όμως κάποια βασικά συστήματα του πλοίου που υπόκεινται σε ψύξη μέσω θαλασσινού ή γλυκού νερού. Για την κατανόηση του ισχυρισμού αυτού, παρουσιάζονται τα συστήματα επίδρασης αυτών, μέσω της μελέτης σχεδίων σύγχρονων (<10 έτη) εμπορικών πλοίων ναυτιλιακής εταιρείας.

- Δίκτυο Κυκλοφορίας Θαλάσσης → Ρυθμίζει τη θερμοκρασία του δικτύου ψύξης γλυκού νερού
 - Δίκτυο ψύξης γλυκού νερού ψύχει τα εξής:
 1. Κύρια Μηχανή
 2. Ηλεκτρομηχανές
 3. Αεροσυμπιεστές κύριας μηχανής (Main air compressors)
 4. Δίκτυο λαδιού λιπάνσεως
 5. Αξονικό σύστημα μέσω της ψύξης του εδράνου στήριξης του άξονα (intermediate shaft bearing)
 6. Δίκτυο ψύξης λαδιού λίπανσης εδράνων στη χοάνη του πλοίου (Stern tube LO Cooler)
 7. Δίκτυο τροφοδοσίας καυσίμου στους ατμολέβητες
 8. Δικτύων καυσίμου (ψύξη χαμηλών σε θείο <0.1% καύσιμο πριν την καύση υπό περιπτώσεις)
 9. Πολλαπλά συστήματα κλιματισμού



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα επηρεασμού των δικτύων ψύξης θαλασσινού και γλυκού νερού

Συνεπώς η επίδραση που έχει το δίκτυο ψύξης πάνω στο πλοίο είναι καταλυτική και καθορίζει την εύρυθμη λειτουργία του σε σημαντικό βαθμό, καθιστώντας το ως ένα υποψήφιο βοηθητικό σύστημα του πλοίου προς μελέτη και ανάλυση του ρίσκου που ενέχει (Ceylan et al., 2022).

Επιπροσθέτως η έρευνα, ανάπτυξη και βελτιστοποίηση σε δευτερεύοντα της κύριας μηχανής συστήματα του πλοίου, όπως το δίκτυο ψύξης, είναι σημαντική μιας, και η ελεγχόμενη λειτουργία και η βελτιστοποίηση της ψύξης όλου του εξοπλισμού του πλοίου, μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερη λειτουργία του (Theotokatos et al., 2016). Τα τελευταία χρόνια αυτή η ανάγκη που δημιουργήθηκε για αποδοτικότερη ναυπήγηση και λειτουργία των πλοίων, μέσω κανονισμών του IMO οδήγησε στην προσπάθεια έρευνας και ανάπτυξης της απόδοσης των κυρίων μηχανημάτων όπως η κύρια μηχανή, οι ηλεκτρομηχανές, η γάστρα και προπέλα μεταξύ άλλων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να παραμεριστούν από έρευνες τα δευτερεύοντα συστήματα του πλοίου. Ωστόσο στην περίπτωση του δικτύου ψύξης του σύγχρονου πλοίου, τα κύρια μηχανήματα του όπως οι αντλίες και οι εναλλάκτες θερμότητάς του, έχουν σχεδιαστεί για τη λειτουργία τους στις χειρίστες συνθήκες όπως τροπικά κλίματα ή για να καλύπτουν τις ανάγκες της κύριας μηχανής κατά τις δυσμενέστερες συνθήκες λειτουργίας της όπως το υψηλό φορτίο της. Στην προαναφερθείσα έρευνα, γίνεται μελέτη της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται το σύστημα αντλιών ώστε να λειτουργήσει μέσω μηχανισμού VFD, δεδομένων των πραγματικών συνθηκών που δεν είναι στις περισσότερες περιπτώσεις οι δυσμενέστερες για τις οποίες και σχεδιάστηκε το υπό μελέτη σύστημα. Η ρύθμιση των αντλιών του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης με βάση τις πραγματικές ανάγκες σε κάθε περίπτωση, οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας του.

Από τα παραπάνω, καθώς και μέσω της προηγηθείσας ανάλυσης της βιβλιογραφικής επισκόπησης της παρούσας εργασίας, αναγνωρίζεται ο καταλυτικός ρόλος της σωστής λειτουργίας του συστήματος ψύξης για τα κύρια και βοηθητικά συστήματα του σύγχρονου πλοίου. Είναι κατανοητό πως η έρευνα για την ανάλυση ρίσκου του υπό μελέτη δικτύου προς την βελτιστοποίηση της επιθεώρησης και συντήρησής του είναι καίρια και μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω ανάπτυξη ορθότερων προσεγγίσεων στη συντήρησή του με γνώμονα πάντα το ρίσκο

και να έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του ρίσκου που φέρουν τα συστήματα που emπίπτουν σε αυτό.

5.2 Δίκτυα ψύξης πλοίων

5.2.1 Οριοθέτηση Μελέτης Δικτύων - Συστημάτων Ψύξης Πλοίων

Παρουσιάζεται επισκόπηση του δικτύου γλυκού νερού και στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση, ο τρόπος μελέτης και σχεδίασης του δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης. Ως παράδειγμα προς ανάλυση των συστημάτων του, χρησιμοποιούνται τα σχέδια σύγχρονων πλοίων ναυτιλιακής εταιρείας.

Αναφέρονται ως **συστήματα** για την υποδήλωση της μελέτης των προαναφερθέντων δικτύων υποδιαιρέμένα σε υποομάδες (υποσυστήματα) και εξαρτήματα του εξοπλισμού τους.

5.2.2 Δίκτυο Ψύξης Γλυκού Νερού

Η αποτροπή της υπερθέρμανσης της κύριας μηχανής, του υπερπληρωτή (Turbochager), του ελέγχου του αέρα υπερπληρώσεως, των ηλεκτρομηχανών και των λοιπών εναλλακτών θερμότητας όπως παρουσιάστηκε στο 5.2.1, αποτελεί τη βασική προϋπόθεση λειτουργίας του μηχανοστασίου ενός πλοίου. Για την ψύξη τους χρησιμοποιείται δίκτυο θεωρητικά κλειστού τύπου, δηλαδή χωρίς να δέχεται ανατροφοδοτήσεις από κάποια εξωτερική πηγή. Ωστόσο στην πραγματικότητα, οι απώλειες ενδέχεται να είναι αρκετές κάθε ημέρα λειτουργίας, χωρίς να μπορεί να δοθεί ακριβές νούμερο αυτών των απωλειών από τη βιβλιογραφία. Η συμπλήρωση γλυκού νερού στο σύστημα επιτυγχάνεται με τη διαδικασία της αφαλάτωσης, που συμβαίνει μέσω του βραστήρα ή Fresh Water Generator, στον οποίο περιληπτικά, το θαλασσινό νερό φιλτράρεται, εξαερώνεται και η μέσω της συμπύκνωσης των ατμών που παράγονται στην έξοδο από το βραστήρα προέρχεται το γλυκό νερό που χρησιμοποιείται στο πλοίο. Τα αίτια των απωλειών στο σύστημα ψύξης γλυκού νερού είναι τα εξής:

1. Το νερό εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα μέσω των διαφόρων αεραγωγών που υπάρχουν στο σύστημα. Ο ρυθμός αυτής της απώλειας επηρεάζεται από τη θερμοκρασίας και την υγρασίας του περιβάλλοντος και του μηχανοστασίου.
2. Διαρροές στις σωληνώσεις και στα πολυάριθμα επιστόμια του δικτύου.
3. Διαρροές στους εναλλάκτες θερμότητας
4. Διαρροές στις δεξαμενές του δικτύου και στον υπόλοιπο μηχανολογικό εξοπλισμό λόγω διάβρωσης ή ζημιάς στο έλασμα τους

Κατά τη διάρκεια της ζωής ενός πλοίου, στο μηχανοστάσιο και ειδικά στα δίκτυα του θαλασσινού αλλά και γλυκού νερού, οι διαρροές που απαντώνται είναι πολλές λόγω της φυσικής φθοράς του εξοπλισμού ανεξαρτήτως υλικών ή σχεδίασης του. Ο αποτελεσματικότερος τρόπος για τον περιορισμό αυτών των απωλειών είναι μόνο μέσω της τακτικής επιθεώρησης του συστήματος για τυχόν διαρροές και έγκαιρης συντήρησης του μετά την αναγνώριση των σημείων στα οποία αυτές αναπτύσσονται.

Όπως προαναφέρθηκε, το δίκτυο ψύξης γλυκού νερού διαχωρίζεται σε δύο κύρια υποσυστήματα, τα οποία αποτελούνται από τα παρακάτω μέρη και εξοπλισμό.

1. Βραστήρας: Αφαίρεση άλατος και ακαθαρσιών από το θαλασσινό νερό μέσω της διαδικασίας της αφαλάτωσης.
2. Αντλίες: Χρησιμοποιούνται για την κυκλοφορία του νερού ψύξης στο σύστημα
3. Εναλλάκτες θερμότητας: Επιτρέπουν τη μεταφορά θερμότητας από το θερμότερο προς στο ψυχρότερο μέσο που τους διαρρέει
4. Φίλτρα μέσω των οποίων απομακρύνονται τυχόν ακαθαρσίες που μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στα μηχανήματα.
5. Σύστημα ελέγχου μέσω επιστομιών που ελέγχονται από θερμοστάτες για την αυτόματη λειτουργία τους. Αυτό το υποσύστημα παρακολουθεί και ελέγχει τη ροή του νερού ψύξης ώστε να διατηρείται η επιθυμητή θερμοκρασία και πίεση στο δίκτυο.
6. Σωληνώσεις και επιστόμια
7. Δεξαμενή Εκτόνωσης Συστήματος – Fresh Water Expansion Tank: Επιτρέπει τη διαστολή και τη συστολή του νερού ψύξης καθώς αυτό θερμαίνεται και ψύχεται.
8. Δεξαμενή Εξαέρωσης – Deaerator Tank – που χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση του οξυγόνου και του διοξειδίου του άνθρακα από το νερό ψύξης καθώς σε μεγάλες συγκεντρώσεις προκαλούν διάβρωση στα μηχανήματα και μειώνουν την απόδοση του συστήματος ψύξης.

Η λειτουργία των υποσυστημάτων του και ο ρόλος τους στην περιγράφεται ως εξής:

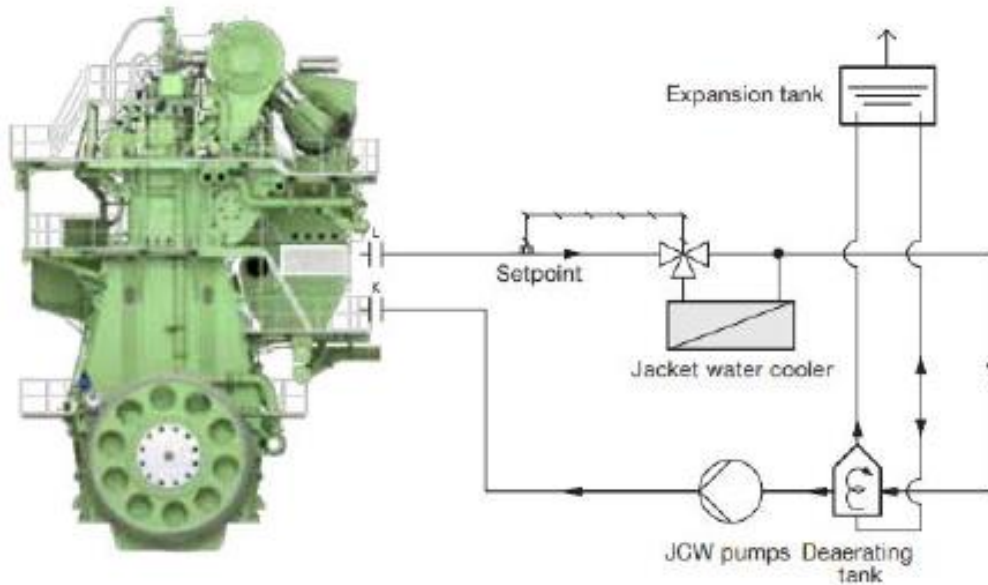
➤ **Κύριο Δίκτυο Ψύξης Γλυκού Νερού**

- Δίκτυο υψηλής θερμοκρασίας

Το δίκτυο αυτό έχει ως κύριο στόχο τη ρύθμιση της θερμοκρασίας των μερών της κύριας μηχανής του πλοίου. Είναι κλειστό δίκτυο και ρυθμίζεται η θερμοκρασία του από τον εναλλάκτη θερμότητας με ψυκτικό μέσο το γλυκό νερό του συστήματος χαμηλής θερμοκρασίας. Στα εγχειρίδια και σχέδια των μεγαλύτερων κατασκευαστών, αυτό το σύστημα χαρακτηρίζεται αλλιώς ως Jacket Cooling Water System ή Δίκτυο Ψύξης της κύριας μηχανής. Για την αποφυγή του θερμικού σοκ των τμημάτων της μηχανής, το νερό κατευθύνεται γύρω από τους κυλίνδρους, στο εσωτερικό των βάκτρων, του εμβόλου και στις βαλβίδες εξαγωγής των καυσαερίων προτού εξέλθει από το μπλοκ της μηχανής.

Κύρια μέρη του είναι οι δεξαμενές εκτόνωσης και εξαέρωσης, σύστημα αντλιών που κατευθύνουν το γλυκό νερό εντός της εγκατάστασης της κύριας μηχανής ώστε να ψύξει τα μέρη αυτής, εναλλάκτης θερμότητας για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας του νερού προτού εισέλθει στην κύρια μηχανή και ο βραστήρας μιας και το θερμό νερό μετά την κύρια μηχανή χρησιμοποιείται για την αύξηση της θερμοκρασίας του θαλασσινού νερού που βρίσκεται μέσα σε αυτόν. Επίσης γίνεται και εγκατάσταση εναλλάκτη θερμότητας μέσω ατμού που προέρχεται από τους λέβητες, ώστε να αυξηθεί η θερμοκρασία του νερού του συστήματος

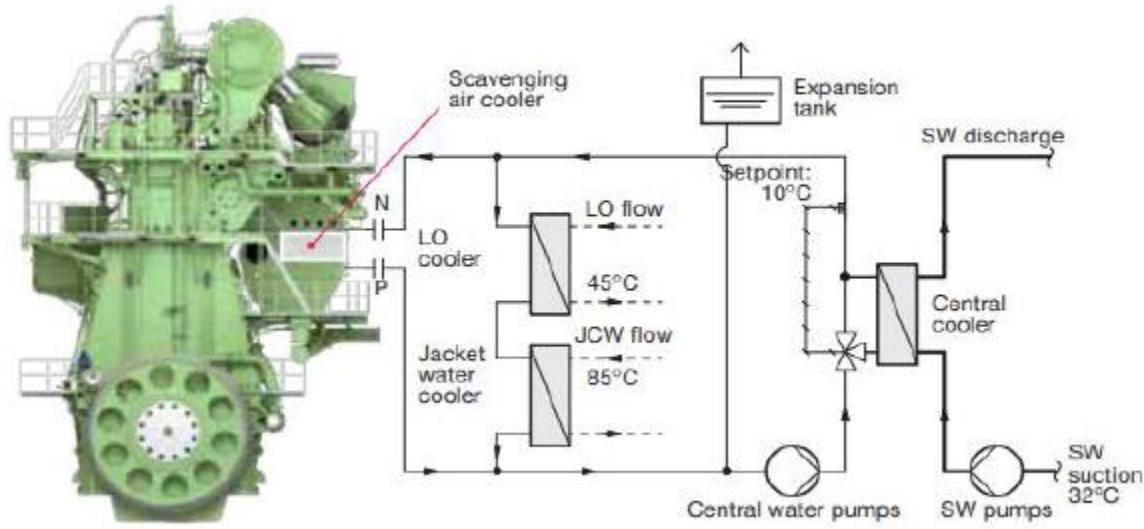
υψηλής θερμοκρασίας σε περίπτωση που η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι πολύ χαμηλή και δεν επιτρέπει αποδεκτό εύρος στη θερμοκρασία ψύξης των χιτωνίων (70-90 °C σύμφωνα με τους κατασκευαστές). Τέλος, δίκτυο αυτοματισμών παρακολουθεί τις θερμοκρασίες στους εναλλάκτες του συστήματος και αυτόματα περιορίζει ή ενισχύει τη ροή νερού στο δίκτυο των σωληνώσεών του, ανάλογα με τις ανάγκες για ψύξη κάτω υπό όλες τις πιθανές συνθήκες λειτουργίας του πλοίου.



Σχήμα 5.4 MAN B&W S70MC-C8.2 IMO Tier II Project Guide Απλοποιημένο Διάγραμμα συστήματος Ψύξης Υψηλής Θερμοκρασίας

- Σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας

Αποτελεί καίριο βοηθητικό σύστημα του πλοίου, μιας και η ψύξη του λαδιού λίπανσης της κύριας μηχανής, του νερού ψύξης της κύριας μηχανής και του συστήματος υπερπληρώσεως εκτελείται μέσω αυτού. Μέρη του είναι και εκτός από τους παραπάνω εναλλάκτες, και αυτός για την ελάττωση θερμοκρασίας του αέρα που χρησιμοποιείται για την ψύξη των μηχανικών μερών του κινητήρα. Έχει το σύστημα αντλιών του, το σύστημα αυτοματισμών ρύθμισης ροής στο δίκτυο, και τέλος σαν μέρος του μπορεί να υποτεθεί το δευτερεύον σύστημα ψύξης μιας και η ροή σε αυτό προέρχεται από το σύστημα χαμηλής θερμοκρασίας.



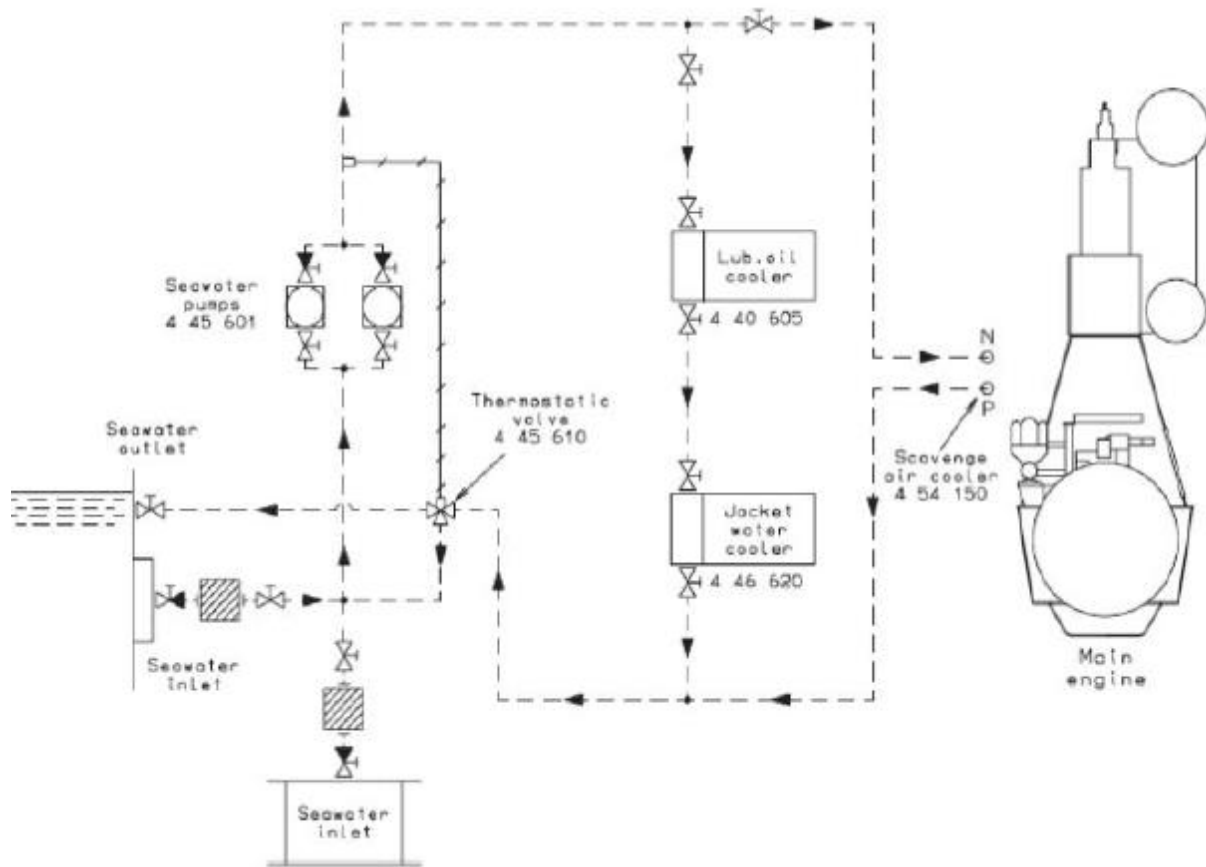
Σχήμα 5.5 MAN B&W S70MC-C8.2 IMO Tier II Project Guide Απλοποιημένο Διάγραμμα Συστήματος Ψύξης Χαμηλής Θερμοκρασίας

➤ Δευτερεύον Δίκτυο Ψύξης Γλυκού Νερού

Περιλαμβάνονται σε αυτό όλοι οι εναλλάκτες που χρησιμοποιούνται για την ψύξη των ηλεκτρομηχανών του πλοίου, του λαδιού λίπανσης και αέρα ψύξης τους, του ενδιάμεσου εδράνου στηρίξεως του άξονα (intermediate shaft bearing) των αεροσυμπιεστών της κύριας μηχανής, του υδραυλικού λαδιού ανάλογα την εγκατάσταση και τύπο πλοίου, του συστήματος κλιματισμού, των ηλεκτρολογικών πινάκων που απαιτούν ψύξη, των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (MGO). Επίσης σε εγκαταστάσεις πλοίων που υπάρχει σύστημα καθαρισμού του έρματος (BWTS), χρησιμοποιείται το γλυκό νερό που παρέχει το δευτερεύον δίκτυο ψύξης.

5.2.3 Δίκτυο Ψύξης Θαλάσσης

Η κατανόηση της σκέψης πίσω απ' τη σχεδίαση του υπό μελέτη δικτύου-συστήματος, πέρα από την προφανή, εκείνη της ψύξης του μηχανολογικού εξοπλισμού, επιβάλλεται και είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ορθής προσέγγισης και ανάλυσης ως προς το ρίσκο του συστήματος. Οι αναδυόμενοι κίνδυνοι, τα πιθανά σημεία αστοχίας και η αποτελεσματικότητα του συστήματος προδιαγράφονται μέσα από την ανάλυση της εγκατάστασης ενός συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού. Η σωστή του λειτουργία δεν αποτρέπει απλώς πιθανή αστοχία στα μηχανολογικά συστήματα που περιρρέει, αλλά ταυτόχρονα βελτιώνει την απόδοση του κινητήρα και η σωστή θερμοκρασία λειτουργίας του έχει ως αποτέλεσμα τη λιγότερη φθορά των μερών του. Διασφαλίζει λοιπόν την απόδοση και τη μακροζωία της κύριας μηχανής, ηλεκτρομηχανών και του υπερπληρωτή μεταξύ άλλων εμμέσως, μέσω του δικτύου ψύξης γλυκού νερού. Αποτρέπει πιθανές πυρκαγιές ή εκρήξεις λόγω πιθανών επιπλοκών της κύριας μηχανής και άρα διασφαλίζει πρωτίστως την ανθρώπινη ζωή, την ασφάλεια του φορτίου και κατά συνέπεια του περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.6 Πρωταρχική τυπική διάταξη δικτύου ψύξης θαλάσσης (Κυρτάτος, Ναυτικοί κινητήρες Diesel, 1993)

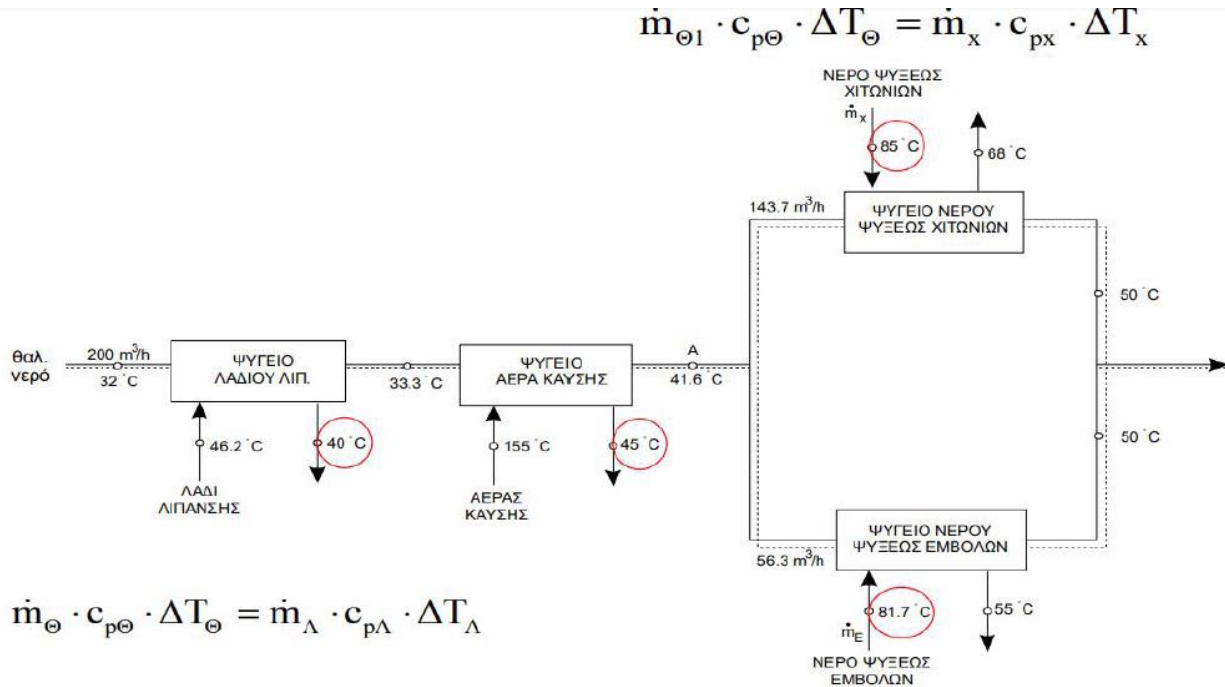
Παρουσιάζεται ένα από τα αρχικά και βασικά μοντέλα του συστήματος ψύξης όπου το θαλασσινό νερό εισέρχεται από την αναρρόφηση του μηχανοστασίου - Sea water inlet - μέσω συστήματος δύο αντλιών - Sea water Pumps - που βρίσκονται σε λειτουργία παράλληλα, και στη συνέχεια διέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας του συστήματος του λαδιού λίπανσης - Lube Oil Cooler - και στη συνέχεια από τον εναλλάκτη θερμότητας για το γλυκό νερό που ψύχει τα έμβολα, χιτώνια και τα μέρη της μηχανής - Jacket Water Cooler - και παράλληλα από τον εναλλάκτη του αέρα υπερπληρώσεως - Scavenge Air Cooler - που τροφοδοτείται στο θάλαμο καύσης του δίχρονου ναυτικού κινητήρα. Στη συνέχεια το νερό επιστρέφει μέσω ενός θερμοστατικού επιστομίου τριών κατευθύνσεων - Thermostatic Valve (Three Way) είτε στο δίκτυο μετά τις αντλίες, είτε στην εξαγωγή του δικτύου προς τη θάλασσα. Η επιλογή της πορείας και της ποσότητας του θαλασσινού νερού που θα επανακυκλοφορήσει στο δίκτυο, γίνεται αυτόματα μιας και το προαναφερθέν επιστόμιο ελέγχεται αυτόματα μέσω θερμοστάτη που έχει σχεδιαστεί και ρυθμίζεται ώστε να επιτρέπει το διαμοιρασμό του νερού κατά τέτοιο τρόπο ώστε η θερμοκρασία του νερού μετά τις αντλίες να συμπίπτει με τη θερμοκρασία που απαιτεί ο σχεδιαστής του δικτύου. Ωστόσο, όπως συμπεραίνεται και από το κεφ. 5.2.2, το σύστημα ψύξης του θαλασσινού νερού στα σύγχρονα πλοία δεν έχει άμεση επίδραση στους εναλλάκτες των συστημάτων της κύριας μηχανής. Το εύρος του έχει περιοριστεί ώστε να ελαττώνεται το κόστος συντήρησης και εγκατάστασης που φέρουν οι ανθεκτικότερες στη διάβρωση εγκαταστάσεις

θαλασσινού νερού. Βάση των σχεδίων που αντλούνται από τα σχέδια πλοίων ναυτιλιακής εταιρείας, ακολουθεί στο 5.2.4 η παρουσίαση των πιο πρόσφατων ως προς τη σχεδιάσή τους συστημάτων ψύξης θαλασσινού νερού.

Η μεταφορά της θερμότητας και η διάχυσή της στο θαλασσινό νερό αποτελούν καίριο αντικείμενο μελέτης κατά τη φάση προμελέτης και σχεδίασης του πλοίου. Αποτελεί σημαντική μελέτη καθώς αυτή είναι που διαμορφώνει το μέγεθος και την ικανότητα του εξοπλισμού και των μηχανημάτων του συστήματος ψύξης ώστε να καλύπτουν τις απαιτήσεις που αυτό θα πρέπει να φέρει κατά το ελάχιστο ώστε να είναι ομαλή η λειτουργία του πλοίου και κυρίως των συστημάτων πρόωσης του. Τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου όπως ο τύπος και το μέγεθος της κύριας μηχανής έχουν προκαθοριστεί κατά τη διαπραγμάτευση πλοιοκτήτη-ναυπηγείου. Κατά τη σύσταση αμοιβαίως αποδεκτού συμβολαίου μεταξύ τους, καθορίζεται το μέγεθος και η υπηρεσιακή ταχύτητα που πρέπει να καλύπτει το πλοίο στις γραμμές για τις οποίες ο πλοιοκτήτης το προορίζει. Οι βασικές απαιτήσεις που έχουν οι πλοιοκτήτες ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλοίου, ορίζονται και συμφωνούνται πλήρως κατά τη φάση του συμβολαίου. Μεταξύ αυτών είναι οι εξής (Α. Παπανικολάου, 2009):

- Τύπος Πλοίου
- Μεταφορική Ικανότητα
- Μήκος μεταξύ καθέτων
- Ακτίνα Ενέργειας
- Ταχύτητα υπηρεσίας

Ο καθορισμός της υπηρεσιακής ταχύτητας επηρεάζει πρωταρχικά το σύστημα πρόωσης (Διαστάσεις κύριας μηχανής, Προπέλα, Αξονικό σύστημα), το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Ηλεκτρογεννήτριες, Πίνακες παροχής ηλεκτρικής ενέργεια-Switchboards κ.ά.) ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις σε ενέργεια σε όλες τις πιθανές απαιτήσεις σε ηλεκτρικό φορτίο (μέσω της επονομαζόμενης μελέτης του Ενεργειακού Ισολογισμού ή Electric Load Analysis). Επιπτώσεις έχει και στο σύστημα αποθήκευσης και μεταφοράς καυσίμου, μαζί με την προβλεπόμενη περιοχή λειτουργίας του πλοίου, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις της καύσης λόγω του επηρεασμού του ρυθμού τροφοδοσίας καυσίμου αναλόγως μεγέθους της κύριας μηχανής, και στο σύστημα ψύξης που θα πρέπει να απορροφά όλη την περίσσεια θερμότητας που παράγεται κατά τη λειτουργία των κύριων και βοηθητικών συστημάτων του πλοίου μέσω της μελέτης θερμικού ισολογισμού της μηχανολογικής εγκατάστασης του πλοίου (Thermal Load Analysis).



Σχήμα 5.7 Αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες δικτύου ψύξης θαλάσσης πλοίου (Ν. Π. Κυρτάτος, 1993)

Στο παραπάνω σχήμα, αποτυπώνεται ο θερμικός ισολογισμός που εκτελείται στους εναλλάκτες θερμότητας συστήματος ψύξης πλοίου. Αυτός επιτυγχάνεται ως ακολούθως με την εφαρμογή της παρακάτω εξίσωσης:

$$P = m \cdot c \cdot \Delta T, \tag{5.1}$$

όπου:

P : η ψυκτική ισχύς σε kW

m : η παροχή σε kg/h

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας εισόδου-εξόδου του μέσου στον εναλλάκτη

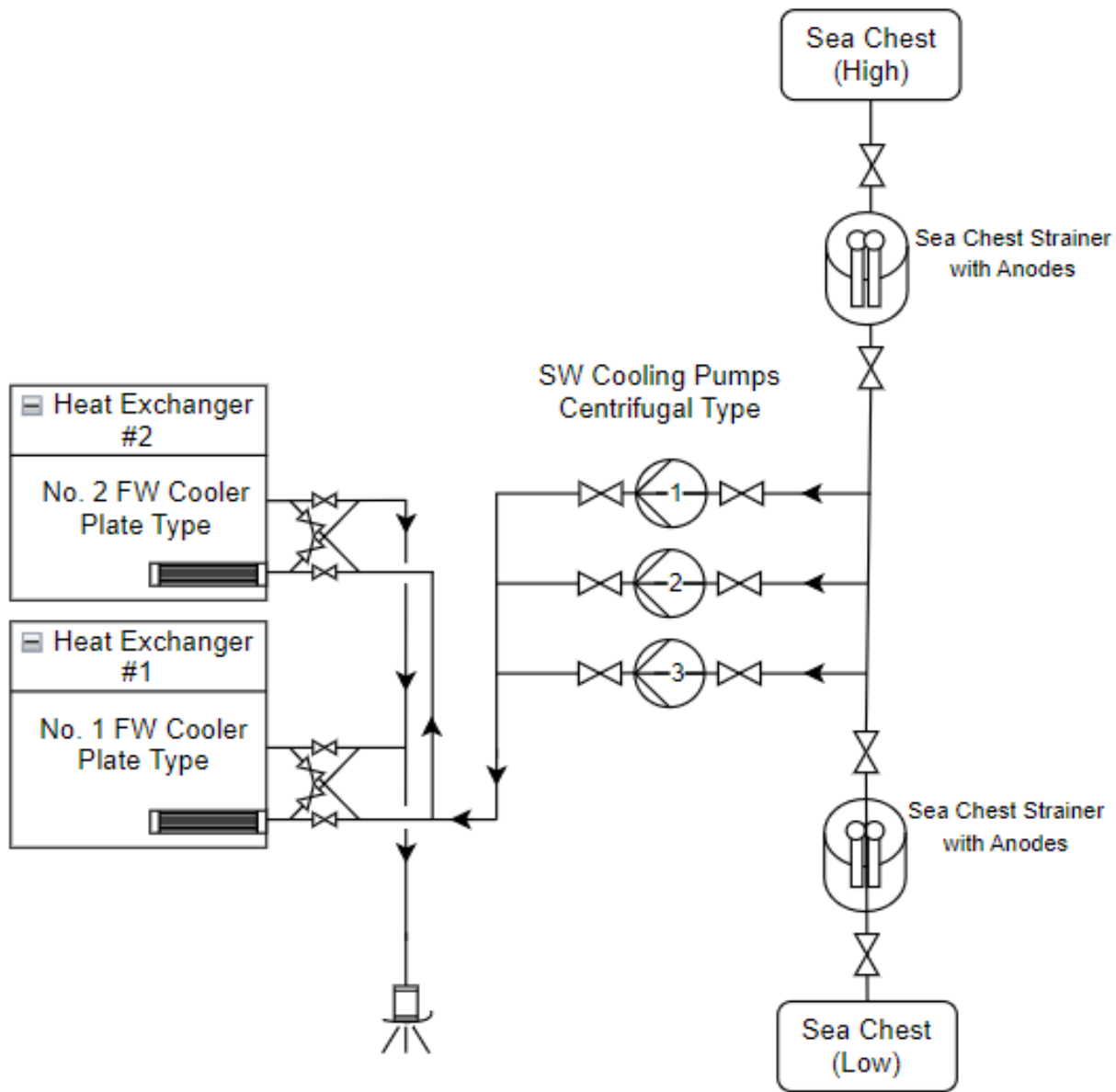
Μέσω της εξίσωσης των δύο ενεργειών που μεταβάλλονται κατά τη μεταφορά θερμότητας σε έναν εναλλάκτη, δηλαδή μέσω της εξίσωσης της θερμικής ενέργειας που «χάθηκε» από το μέσο που ψύχθηκε και της θερμικής ενέργειας που «έλαβε» το θαλασσινό νερό, υπολογίζεται η διαφορά της θερμοκρασίας του μέσου του κάθε υποσυστήματος, με αποτέλεσμα να γίνεται ανάλυση αποτελεσματικότητας του συστήματος ψύξης. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, εκτελείται αρκετές φορές αυτή η ανάλυση για τις επιλεγμένες αντλίες, σωληνώσεις, εναλλάκτες και λοιπού εξοπλισμού που απαιτήθηκε μέσω της βελτιστοποίησης κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας που ακολουθεί. Η σχεδίαση του συστήματος ψύξης και ο θερμικός ισολογισμός στα βοηθητικά και κύρια μηχανολογικά συστήματα του πλοίου, αποτελείται από τα εξής βήματα, τα οποία εκτελούνται κατά το στάδιο σχεδιασμού των βοηθητικών συστημάτων του πλοίου:

1. Καθορισμός των πηγών θερμικής ενέργειας πάνω στο πλοίο. Προδιαγραφή των μηχανημάτων που θα πρέπει να διατηρούνται σε συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας κατά τους κατασκευαστές τους.
2. Υπολογισμός θερμικού φορτίου που φέρει το εκάστοτε μηχάνημα. Αυτό προκύπτει μέσω επικοινωνίας με τους κατασκευαστές του κινητήρα, ηλεκτρογεννήτριας, αντλιών κ.ά. ή μέσα από δευτερογενή δεδομένα όπως τα εγχειρίδια λειτουργίας και χρήσης του ή προηγούμενες μελέτες στη βιβλιογραφία.
3. Καθορισμός της ενέργειας που θα πρέπει να απαχθεί στο σύστημα ψύξης μέσω του υπολογισμού του μέγιστου ολικού θερμικού φορτίου που μπορεί να παραχθεί κατά τη λειτουργία του πλοίου.
4. Σχεδίαση του συστήματος ψύξης ώστε να καλύπτει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις μέσω εναλλακτών θερμότητας, σωληνώσεων ικανοποιητικού μεγέθους, αντλιών, επιστομίων και άλλων εξαρτημάτων του συστήματος.
5. Αξιολόγηση του συστήματος ψύξης που αναπτύχθηκε μέσω μοντελοποιήσεων σε προγράμματα υπολογιστών ή άλλων τεχνικών και μεθοδολογιών που μπορεί να ακολουθεί το τμήμα σχεδίασης του ναυπηγείου. Ελέγχονται οι πτώσεις θερμοκρασίας των υπολοίπων συστημάτων που επηρεάζει το σύστημα ψύξης, οι πιέσεις που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία της μηχανολογικής εγκατάστασης, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε κάθε σημείο του δικτύου και η ροή στο δίκτυο.
6. Βελτιστοποίηση του υπάρχοντος συστήματος μέσω της αποτελεσματικότητας και αποδοτικότητας που έχει τόσο σε ψύξη όσο και σε ελάττωση κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας, μιας και το τελικό σχέδιο και άρα σύστημα θα έχει τις διαστάσεις και τον εξοπλισμό που απαιτείται επιτυγχάνοντας τη χρυσή τομή μεταξύ της ψυκτικής του απόδοσης και ολικού κόστους του.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη του θερμικού ισολογισμού, προωθούνται στη συνέχεια ως απαιτήσεις του ναυπηγείου, στους κατασκευαστές του κάθε μηχανήματος και εξοπλισμού του συστήματος ψύξης, ώστε να ολοκληρωθεί η διαστασιολόγηση και η ανάπτυξη του σχεδίου της γάστρας στα πεδία εγκατάστασής τους.

5.2.4 Μηχανολογικά μέρη του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού και η λειτουργία τους

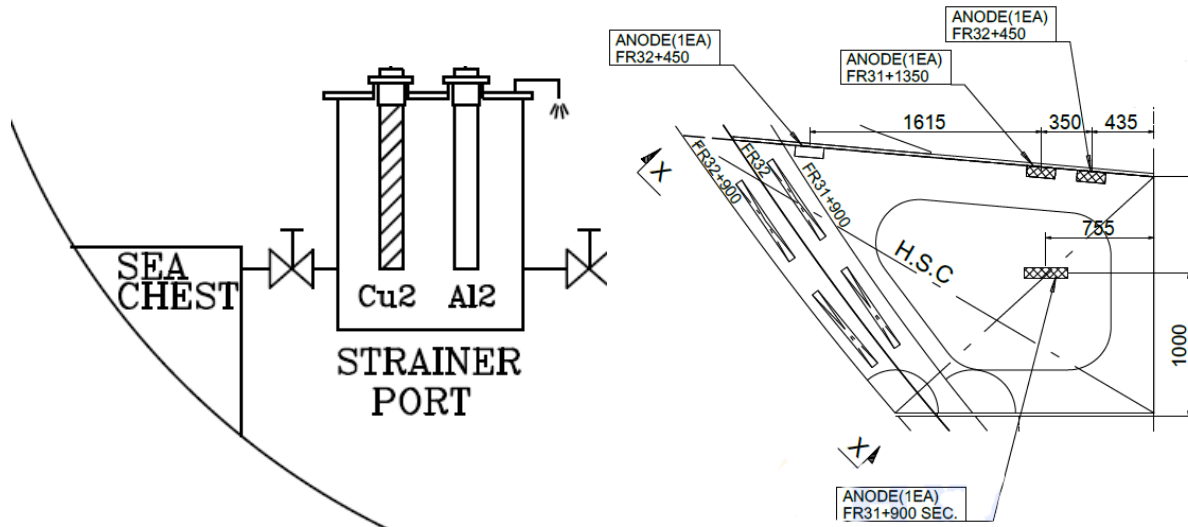
Η μελέτη και ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος, θα συνεχίσει πάνω σε μία απλουστευμένη αλλά τυπική διάταξη των συστημάτων ψύξης που απαντώνται πάνω στα σύγχρονα πλοία. Αν και απλοποιημένη, παραμένει πολύπλοκη ως προς τη μελέτη και ανάλυση του ρίσκου που αυτή ενέχει μέσω δυναμικών Μπεϋζιανών μοντέλων, και θέτει βάσεις για τη μελέτη πολύπλοκότερων εκδοχών του ίδιου συστήματος ή και άλλων στη ναυτιλιακή βιομηχανία.



Σχήμα 5.8 Τυπική Διάταξη συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού

Αρχικά, το πρώτο κατά σειρά ροής του θαλασσινού νερού είναι το υποσύστημα των αναρροφήσεων θαλάσσης, δύο υπ' αριθμόν, σε διαφορετικό ύψος εγκατεστημένες στο κύτος του πλοίου ώστε να μπορεί να αντλείται το θαλασσινό νερό στο μηχανοστάσιο είτε είναι το πλοίο σε περιοχή με ρηγά νερά και αντλεί θάλασσα διαμέσου της υψηλότερης αναρρόφησης για την αποφυγή απορρόφησης ρύπων ή ιζημάτων του πυθμένα, είτε είναι σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας σε βαθιά νερά και αντλεί τη θάλασσα από τη χαμηλότερη εγκατεστημένη αναρρόφηση ώστε να περιορίζεται η πιθανότητα απορρόφησης λόγω διατοιχισμού του πλοίου, και ονομάζονται υψηλή και χαμηλή αναρρόφηση ή κιβώτια αναρρόφησης (High and Low Sea Chests). Το νερό εισέρχεται μέσω των αναρροφήσεων οι οποίες έχουν όπως φαίνεται στις φωτογραφίας εξωτερικά φίλτρα (grids) ώστε να αποτρέψουν την εισχώρηση ρύπων και

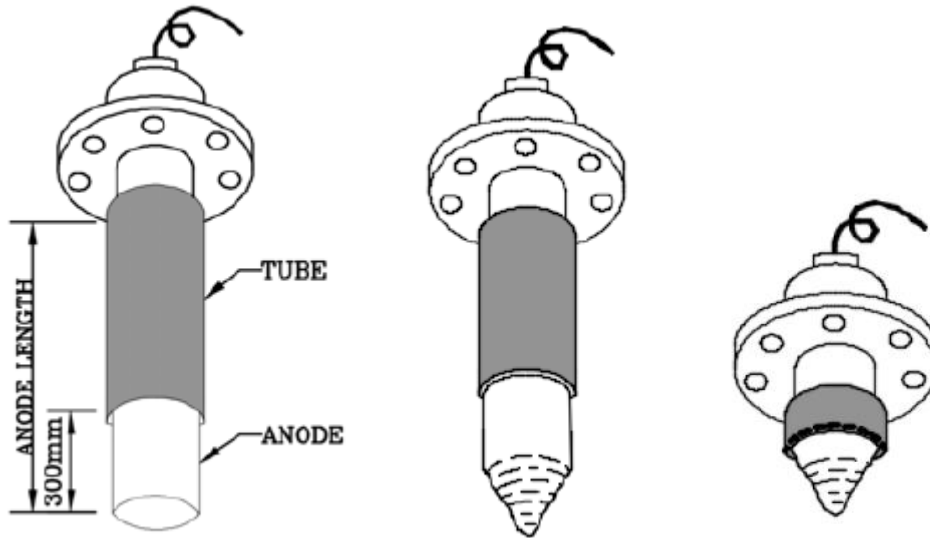
οργανισμών κατά την άντληση του νερού. Επιπροσθέτως, για την προφύλαξη του δικτύου από επιπλοκές λόγω του έντονου φαινομένου της διάβρωσης που προκαλεί το θαλασσινό νερό, θυσιαζόμενες άνοδοι είναι εγκατεστημένες στο εσωτερικό τους. Στη συνέχεια, το θαλασσινό νερό προτού φτάσει στις αντλίες του συστήματος ψύξης, κατευθύνεται σε μεταλλικά φίλτρα ή sea chest strainers, τα οποία περαιτέρω μπλοκάρουν μικροοργανισμούς και ρύπους που σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι ικανά να μπλοκάρουν και να προκαλέσουν ζημιές στις σωληνώσεις στις αντλίες και στους εναλλάκτες θερμότητας του δικτύου.



Σχήμα 5.9 Σκαρίφημα υποσυστήματος αναρρόφησης θαλάσσης(1)(2) και φωτογραφίες από τη διάταξη αναρροφήσεων υπερσύγχρονου πλοίου VLCC LSC(3) και HSC(4)

Οι θυσιαζόμενες άνοδοι ή αλλιώς ανόδια, αποτελούνται κράματα όπως χαλκός, αλουμίνιο, μαγνήσιο και ψευδάργυρος τα οποία «θυσιάζονται» στην ανάγκη της προστασίας του δικτύου αναρρόφησης από τη διάβρωση (Παντελής, 2012). Αποτελεί μέρος της επιθεώρησης και συντήρησης του υποσυστήματος των αναρροφήσεων θαλάσσης καθώς η επάρκειά τους

διασφαλίζει την παράταση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού του δικτύου ψύξεως και τη μείωση του κόστους συντήρησής του (Xu et al., 2021).



Σχήμα 5.10 Ανόδια αναρροφήσεων θαλάσσης καινούρια και μετά από χρήση

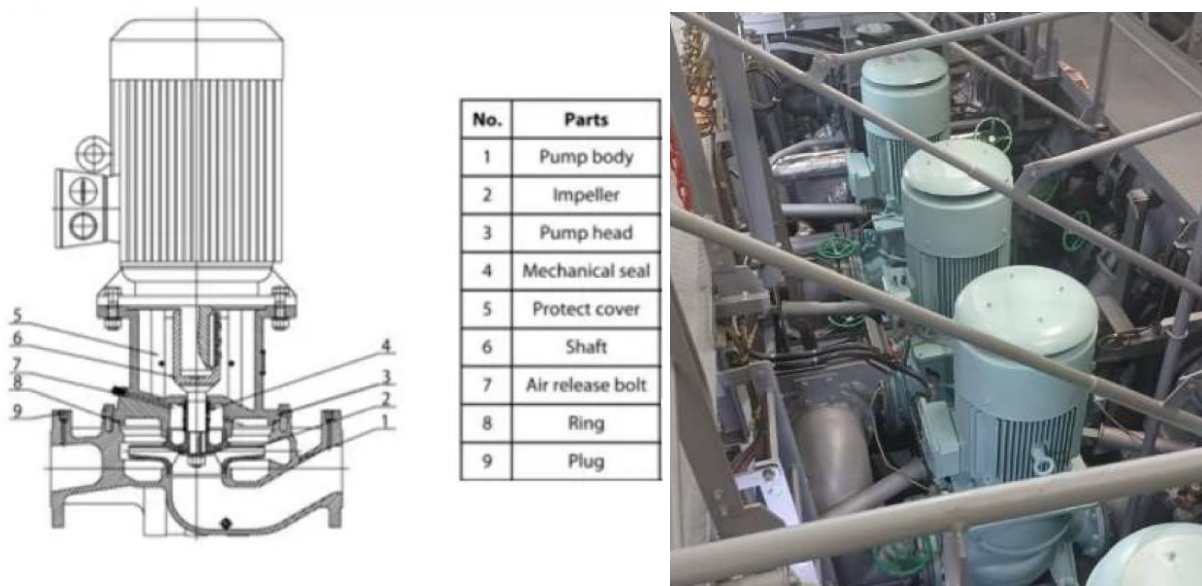
Ακολουθεί ως υποσύστημα προς αναφορά, οι σωληνώσεις του δικτύου οι οποίες κατά κύριο γνώρισμα τους, είναι ανθεκτικές στη διάβρωση. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά μέσω της επιλογής κατάλληλου κράματος μετάλλων με μηχανικές ιδιότητες που να καλύπτουν τις απαιτήσεις του δικτύου σε πίεση και θερμοκρασία, όπως είναι τα κράματα χάλυβα και άνθρακα που ονομάζονται ανθρακούχοι χάλυβες – Carbon Steel Alloys – που με την εμφάνιση του εσωτερικού τους με στρώμα πολυαιθυλενίου, επιτυγχάνουν καλή αντοχή και στη διάβρωση. Οι κύριοι λόγοι που επιλέγονται οι ανθρακούχοι χάλυβες στα συστήματα ψύξης θαλασσινού νερού είναι λόγω της ικανοποιητικής ολκιμότητάς τους, δηλαδή της ιδιότητάς τους να δέχονται παραμορφώσεις προτού αστοχήσει το υλικό, της ευκολίας στη συγκόλληση καθιστώντας τους ιδανικούς για εγκαταστάσεις σημαντικής έκτασης με περίπλοκη αρχιτεκτονική όπως του

μηχανοστασίου του πλοίου και λόγω του χαμηλού κόστους τους σε σχέση με άλλα μέταλλα που έχουν ικανοποιητικές ιδιότητες αλλά δεν επιλέγονται λόγω της κοστοβόρας αγοράς και εγκατάστασής τους όπως οι ανοξείδωτοι χάλυβες (Χρυσουλάκης και Παντελής, 2008). Η επιλογή της εφαρμογής πολυαιθυλενίου στις σωληνώσεις των δικτύων είναι πρακτική που εφαρμόζεται ευρέως από τα Κορεάτικα ναυπηγεία λόγω του συνδυασμού ικανοποιητικής αντίστασης στη διάβρωση και του χαμηλού κόστους εφαρμογής του στις σωληνώσεις μηχανολογικών εγκαταστάσεων.



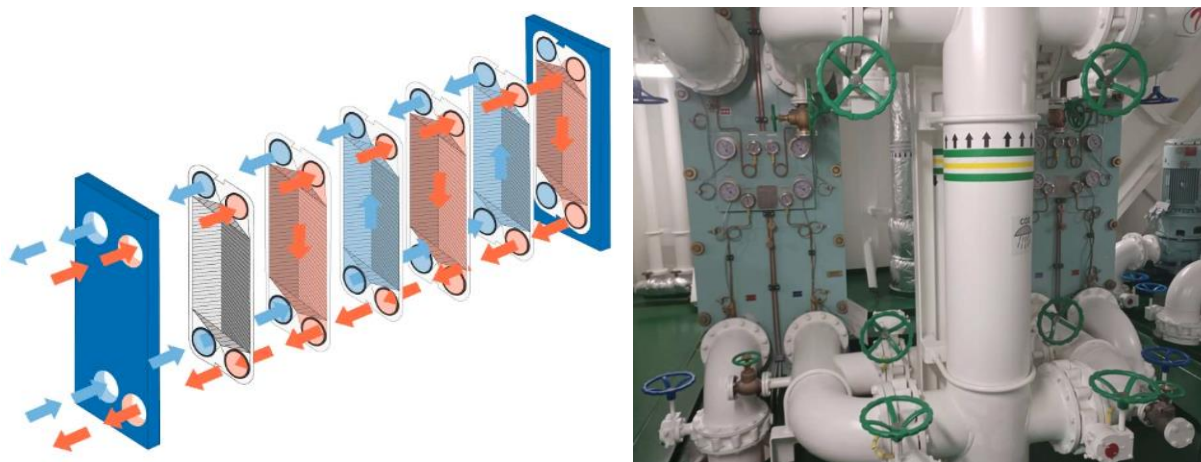
Σχήμα 5.11 Σωληνώσεις θαλασσινού νερού πλοίου VLCC κατασκευής Κορέα 2022, κατά την επιθεώρηση του στρώμα πολυαιθυλενίου τους

Η κυκλοφορία και ροή στο δίκτυο, επιτυγχάνεται μέσω συστήματος δύο ή τριών φυγοκεντρικών αντλιών – Centrifugal Pumps – οι οποίες λειτουργούν ως μέσα αύξησης της κινητικής ενέργειας του ρευστού, η οποία στη συνέχεια μεταβάλλεται σε δυναμική ενέργεια καθώς κινείται σε άλλες περιοχές του δικτύου. Χρησιμοποιούνται λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους κατασκευής, απλότητας σχεδιασμού και άρα συντήρησής τους, καλού βαθμού απόδοσης, ικανής μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ρευστού άρα εγκατάσταση σε δίκτυα με αυξημένες απαιτήσεις σε μεγάλους όγκους ροής και λόγω της συνεχούς φυγόκεντρου δύναμης που αναπτύσσεται στο ρευστό, δεν παρουσιάζονται διακυμάνσεις στην πίεση του ρευστού εντός της αντλίας όπως για παράδειγμα συμβαίνει στις εμβολοφόρες αντλίες. Η κίνηση προσδίδεται στο ρευστό μέσω της περιστροφικής κίνησης της περρωτής που βρίσκεται στο εσωτερικό της. Η κίνηση στη περρωτή προσδίδεται μέσω περιστρεφόμενου άξονα που συνδέεται με το ηλεκτρικό μοτέρ της αντλίας το οποίο λαμβάνει ηλεκτρική ενέργεια από τις ηλεκτρομηχανές του πλοίου. Συνήθως η μία αντλία ή οι δύο χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα ανάλογα τις απαιτήσεις για ψύξη σε κάθε πιθανή συνθήκη λειτουργίας. Όσες δε χρησιμοποιούνται είναι σε αναμονή – standby mode – έτοιμες να αντικαταστήσουν κάποια που ίσως παρουσιάσει πρόβλημα ή να ενεργήσουν σε περίπτωση αυξημένων αναγκών για ψύξη των συστημάτων πρόωσης ή του μηχανοστασίου γενικότερα.



Σχήμα 5.12 Τυπική σχεδίαση φυγόκεντρης αντλίας με μοτέρ και φωτογραφία συστήματος αντλιών ψύξης θαλασσινού νερού πλοίου VLCC κατασκευής Κορέα 2022

Η μετάδοση θερμότητας μεταξύ των συστημάτων ψύξεως γλυκού και θαλασσινού νερού γίνεται με ζεύγος από εναλλάκτες θερμότητας – No 1 & 2 Central Fresh Water Cooler – που ο ένας κατά κύριο λόγο λειτουργεί, ενώ ο δεύτερος είναι συμπληρωματικός ή σε αναμονή σε περίπτωση ανάγκης. Σε κλίματα όπου η θερμοκρασία του θαλασσινού νερού είναι υψηλή με αυξημένες απαιτήσεις για ψύξη, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται και οι δύο εναλλάκτες ταυτόχρονα. Είναι εναλλάκτες που αποτελούνται από επίπεδες πλάκες – plate heat exchangers – διαμορφωμένες με αυλακώσεις και πολύ λεπτές, μεταξύ των οποίων εναλλάξ ρέουν τα δύο ρευστά. Η στεγανοποίηση μεταξύ των πλακών επιτυγχάνεται με ελαστικά παρεμβύσματα τα οποία περιορίζουν την κίνηση των ρευστών πάνω στη μεταλλική πλάκα. Δύο κινητές πλάκες οριοθετούν και πιέζουν μεταξύ τους τα μεταλλικά φύλλα μέσα στα οποία μεταδίδεται η θερμότητα.



Σχήμα 5.13 Τυπική σχεδίαση εναλλάκτη θερμότητας με φύλλα και φωτογραφίες εναλλάκτη σε σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού πλοίου VLCC κατασκευής Κορέα 2022

Κατά τη λειτουργία του συστήματος ψύξης, υπάρχουν σε όλα τα συστήματα που προαναφέρθηκαν, αισθητήρες/όργανα μέτρησης των πιέσεων και των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε αυτά. Ωστόσο αυτοί οι αισθητήρες δίνουν ενδείξεις τοπικά στο εκάστοτε υποσύστημα μέσα στο μηχανοστάσιο, χωρίς συνήθως κάποιο σύστημα αυτοματισμού – temperature indicators – των εναλλακτών ή των αντλιών. Σε κάποιες εγκαταστάσεις υπάρχει ωστόσο είτε αισθητήρας πίεσης είτε θερμοκρασίας που αποστέλλει σήμα στο σύστημα αυτοματισμών του μηχανοστασίου για την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου (temperature transmitter) μετά τις αντλίες του συστήματος. Μπορεί επίσης να υπάρχουν αισθητήρες διαφοράς πίεσεως μεταξύ της εισαγωγής και εξαγωγής των αντλιών που το πλήρωμα πρέπει να επιβλέπει για την αναγνώριση πιθανής δυσλειτουργίας των αντλιών. Μέσω του μοναδικού αυτού αισθητήρα γίνεται η παρακολούθηση του συστήματος απομακρυσμένα και όχι τοπικά μέσω της επιθεώρησης στο μηχανοστάσιο. Αυτό συμβαίνει καθώς οι αυτοματισμοί και οι ενδείξεις που υπάρχουν στο σύστημα ψύξης γλυκού νερού είναι αρκετοί στα σύγχρονα πλοία, ακόμα και με την αυτόματη λειτουργία πολλές φορές επιστομίων που ρυθμίζουν τη ροή στο δίκτυο, καθιστώντας καθαυτό τον τρόπο σε αρκετές εγκαταστάσεις κατά την απαίτηση του πλοιοκτήτη και τα σχέδια του ναυπηγείου, μη αναγκαία την ύπαρξη αυτοματισμών στο δίκτυο ψύξης του θαλασσινού νερού το οποίο διαρρέει μόνο τους εναλλάκτες του γλυκού νερού και όχι εναλλάκτες για ψύξη της κύριας μηχανής ή του υπερπληρωτή. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως τα επιστόμια του δικτύου ψύξεως στις εισαγωγές και εξαγωγές των αντλιών, εναλλακτών και μετά τις αναρροφήσεις θαλάσσης, αποτελούν σημαντικό μέρος τους συστήματος που πρέπει να ελέγχεται για τυχόν διαρροές ή αστοχίες που μπορεί να οδηγήσουν στην αδυναμία απομόνωσης της ροής κατά ανάγκη όταν το επιβάλλουν οι συνθήκες λειτουργίας. Τα επιστόμια καλούνται πεταλούδες – butterfly valves – λόγω της σχεδιάσής τους μιας και φέρουν δίσκο για τον έλεγχο της ροής. Το σώμα των επιστομίων στο δίκτυο του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού είναι χυτοσίδηρος (FC) ή κράμα χαλκού αλουμινίου και ο δίσκος τους αποκλειστικά κράμα χαλκού αλουμινίου.

Τέλος, υπογραμμίζεται πως κι άλλα συστήματα και αντλίες αυτών είναι μέρη του δικτύου του συστήματος ψύξης όπως ο βραστήρας και η αντλία του, οι αντλίες για το σύστημα παραγωγής αδρανών αερίων στα δεξαμενόπλοια και άλλα υποσύστημα που όμως δεν έχουν άμεσα αντίκτυπο στη θερμοκρασία του γλυκού νερού μετά τους κύριους εναλλάκτες θερμότητας γλυκού-θαλασσινού νερού και στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν θα γίνει αναφορά ούτε θα ληφθούν υπόψη στη μοντελοποίηση του υπό μελέτη συστήματος. Όπως παρουσιάζεται και το κεφ. 6, μελετάται το φαινόμενο της αύξησης της θερμοκρασίας του γλυκού νερού μετά τους κύριους εναλλάκτες του λόγω δυσλειτουργίας των άμεσα εμπλεκόμενων μηχανημάτων του δικτύου ψύξης θαλάσσης.

5.2.5 Αστοχίες συστήματος και επιπτώσεις

Με βάση την παραπάνω ανάλυση και ομαδοποίηση των υποσυστημάτων ενός συμβατικού συστήματος ψύξης, είναι κατανοητό πως θα πρέπει να γίνει στη συνέχεια η μοντελοποίηση αυτών των υποσυστημάτων ως προς τη μελέτη του ρίσκου που το κάθε ένα φέρει, και την επίδραση που το κάθε ένα έχει προς τη λειτουργία του συστήματος ψύξης γλυκού νερού. Θα πρέπει αρχικά να αναγνωρισθούν οι πιθανές αστοχίες του καθενός, να αναγνωρισθούν οι αιτίες και κυρίως οι πιθανές συνέπειες που αυτές έχουν σε περίπτωση εμφάνισής τους.

Ορθή προσέγγιση και ευρέως αποδεκτή όπως προαναφέρθηκε σύμφωνα με τον IMO (βλέπε 3.1.3), είναι η μεθοδολογία FMEA. Ενδελεχής έρευνα έχει ληφθεί υπόψη που πραγματοποιήθηκε στο σύστημα ψύξης (Allal et al., 2017) μέσω συλλογής στοιχείων από 115 εμπορικά πλοία όπου μελετήθηκαν τα σχέδιά τους και το σύστημα επιθεώρησης και συντήρησης που ακολουθείται στις διαχειρίστριες εταιρίες τους με ταυτόχρονα την πραγματοποίηση συνεντεύξεων με μηχανικούς των πλοίων για τη γνώση και εμπειρία τους επί των κινδύνων του συστήματος ψύξης. Τα στοιχεία του δικτύου ομαδοποιούνται σε υποσυστήματα ως εξής:

Πίνακας 5.2 FMEA Συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού

Υποσύστημα	Γεγονός	Αίτιες	Συνέπειες
Αναρροφήσεις Θαλάσσης HSC & LSC	- Μείωση της ροής- πτώση πίεσης στην έξοδο της αναρρόφησης	- Μπλοκάρισμα των φίλτρων του κύτους(grid) - Μπλοκάρισμα των φίλτρων (strainers) από ρύπους ή μικροοργανισμούς - Ανθρώπινο λάθος, ανεπαρκής συντήρηση και επιθεώρηση	- Ανεπαρκής παροχή θαλασσινού νερού στον εναλλάκτη γλυκού νερού - Αύξηση θερμοκρασίας δικτύου γλυκού νερού → Πιθανό σταμάτημα κύριας μηχανής, ηλεκτρομηχανών – blackout, ατύχημα λόγω ανικανότητας ελιγμών και πρόωσης πλοίου
Σωληνώσεις	- Αστοχία υλικού και διακοπή ροής - Διαρροή	- Μπλοκάρισμα από μικροοργανισμούς/ρύπους - Διάβρωση - Χαμηλή ποιότητα υλικών - Αστοχία των περιαυχενίων(flanges) ή των παρεμβυσμάτων (gaskets) - Ανθρώπινο λάθος, ανεπαρκής συντήρηση και επιθεώρηση	Ανάλογα τη θέση της σωλήνωσης: - Πλημμύρισμα του μηχανοστασίου, ατύχημα - Ανεπαρκής παροχή θαλασσινού νερού στον εναλλάκτη γλυκού νερού - Αύξηση θερμοκρασίας δικτύου γλυκού νερού → Πιθανό σταμάτημα κύριας μηχανής, ηλεκτρομηχανών – blackout, ατύχημα λόγω ανικανότητας

			ελιγμών και πρόωσης πλοίου
Αντλίες	<ul style="list-style-type: none"> -Ανεπαρκής πίεση στην κατάθλιψη - Έντονες δονήσεις στο μοτέρ και στο σώμα της αντλίας - Υπερθέρμανση - Ήχος που δηλώνει δυσλειτουργία - Διαρροή 	<ul style="list-style-type: none"> - Διάβρωση - Αστοχία περωτής - Αστοχία άξονα περωτής - Αστοχία ρουλεμάν - Αστοχία υλικού στεγανοποίησης - Αστοχία ρουλεμάν - Αστοχία κελύφους - Διάβρωση - Ανθρώπινο λάθος, ανεπαρκής συντήρηση και επιθεώρηση, λανθασμένη σχεδίαση/επιλογή αντλίας - Αστοχία συνδέσμου μοτέρ-αντλίας(coupling) - Πρόβλημα στην εκκεντρότητα των αξόνων - Αστοχία μοτέρ 	<ul style="list-style-type: none"> - Ανεπαρκής παροχή θαλασσινού νερού στον εναλλάκτη γλυκού νερού - Αύξηση θερμοκρασίας δικτύου γλυκού νερού → Πιθανό σταμάτημα κύριας μηχανής, ηλεκτρομηχανών – blackout, ατύχημα λόγω ανικανότητας ελιγμών και πρόωσης πλοίου
Εναλλάκτες	<ul style="list-style-type: none"> -Διαφορά πίεσεως εισόδου-εξόδου -Διαρροή 	<ul style="list-style-type: none"> - Μπλοκάρισμα ροής εντός εναλλάκτη λόγω μικροοργανισμών ή ρύπων - Μπλοκάρισμα φίλτρων - Αστοχία μεταλλικών πλακών/διάβρωση - Αστοχία υλικού στεγανοποίησης - Ανθρώπινο λάθος, ανεπαρκής συντήρηση και επιθεώρηση, λανθασμένη σχεδίαση/επιλογή εναλλάκτη 	<ul style="list-style-type: none"> - Αύξηση θερμοκρασίας δικτύου γλυκού νερού → Πιθανό σταμάτημα κύριας μηχανής, ηλεκτρομηχανών – blackout, ατύχημα λόγω ανικανότητας ελιγμών και πρόωσης πλοίου
Επιστόμια	<ul style="list-style-type: none"> - Ανικανότητα κίνησης δίσκου - Αδυναμία πλήρους ανοίγματος/κλεισίματος του δίσκου - Διαρροή - Λανθασμένη ένδειξη - Λανθασμένη θέση επιστομίου 	<ul style="list-style-type: none"> - Αστοχία υλικού - Διάβρωση - Ανθρώπινο λάθος, ανεπαρκής συντήρηση και επιθεώρηση 	<p>Ανάλογα τη θέση του επιστομίου:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Πλημμύρισμα του μηχανοστασίου, ατύχημα - Ανεπαρκής παροχή θαλασσινού νερού στον εναλλάκτη γλυκού νερού - Αύξηση θερμοκρασίας δικτύου γλυκού

			νερού → Πιθανό σταμάτημα κύριας μηχανής, ηλεκτρομηχανών – blackout, ατύχημα λόγω ανικανότητας ελιγμών και πρόωσης πλοίου
Σένσορες	-Λανθασμένη ένδειξη	- Αστοχία υλικού - Ανθρώπινο λάθος, ανεπαρκής συντήρηση και επιθεώρηση, λάθος επιλογή μανόμετρου/θερμόμετρου	-Λανθασμένη ένδειξη που μπορεί να οδηγήσει σε λάθος χειρισμό από το προσωπικό → Ανθρώπινο λάθος

Τα παραπάνω επιβεβαιώθηκαν και από ειδικούς, έμπειρους επαγγελματίες της ναυτιλίας που διετέλεσαν σε πλοία ως πρώτοι μηχανικοί και διοικητικές θέσεις σε ναυτιλιακές εταιρείες. Η σχέση μεταξύ των υποσυστημάτων του δικτύου και πιθανών αστοχιών του συστήματος συζητήθηκε, καθώς και τα πιο ευπαθή σημεία σύμφωνα με την εμπειρία και τις γνώσεις του καθενός επί του συστήματος ψύξης. Ο συνδυασμός τεχνικής και θεωρητικής γνώσης επιλέχθηκε ως η ορθότερη προσέγγιση στην επιλογή των ειδικών για την παρούσα εργασία. Οι ερωτηθέντες έχουν τα παρακάτω διαπιστευτήρια:

1. Πρώην πρώτος μηχανικός και τεχνικός διευθυντής έντεκα πλοίων με εμπειρία 25 ετών στο χώρο της ναυτιλίας
2. Πρώην πρώτος μηχανικός με εμπειρία 20 ετών και επιβλέπων μηχανικός στην κατασκευή νεότευκτων πλοίων σε κορεάτικα ναυπηγεία
3. Αρχιμηχανικός δεξαμενοπλοίων και διευθυντής γραφείου εταιρείας σε κορεάτικα ναυπηγεία κατασκευής πλοίων(HHI,SHI)
4. Πρώην πρώτος μηχανικός και αρχιμηχανικός δεξαμενοπλοίων με εμπειρία 25 ετών στη ναυτιλία

Τα ευπαθή σημεία αυτού του συστήματος είναι εκείνα που με βάση τις εμπειρίες και γνώσεις των ειδικών, παρουσιάζουν συχνά δυσλειτουργίες και αποτελούν αιτίες σημαντικών προβλημάτων. Τέτοια προβλήματα είναι η καθυστέρηση στο πρόγραμμα του ταξιδιού του πλοίου λόγω αναγκαίας συντήρησης που μπορεί να σημαίνει μέχρι και το σταμάτημα του πλοίου για να διορθωθεί ή ακόμα η αδιάκοπη εργασία του πληρώματος για να μπορέσει αυτό να λειτουργήσει και να μη χρειαστεί να διακοπεί η λειτουργία της μηχανής. Συγκεκριμένο παράδειγμα για την προαναφερθείσα κατάσταση, παρουσιάστηκε από τον ειδικό #2, που κατά τη διέλευση δεξαμενοπλοίου του οποίου ήταν πρώτος μηχανικός σε περιοχή με πάγους και χαμηλές θερμοκρασίες, παρουσιάστηκε αύξηση της θερμοκρασίας του συστήματος ψύξης γλυκού νερού λόγω μπλοκαρίσματος και των δύο φίλτρων-Strainers μετά τις αναρροφήσεις θαλάσσης. Μετά την έρευνα και επιθεώρηση όλων των συστημάτων ανοίχτηκαν τα φίλτρα τα οποία γέμιζαν

πάγους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής του πλοίου στην εν λόγω περιοχή, το πλήρωμα να πρέπει αδιάκοπα και εναλλάξ επί ημέρες να καθαρίζει τα φίλτρα-strainers που βρίσκονται μετά τις αναρροφήσεις ώστε να μη χρειαστεί να σταματήσει η μηχανή του πλοίου. Αποτελεί ως σύνολο ένα σύστημα του πλοίου που είναι ζωτικής σημασίας, και σε περίπτωση που τηρηθεί η επιθεώρηση και συντήρησή του, είναι σπάνιο κατά τους ειδικούς να παρουσιάσει σημαντικά προβλήματα και να οδηγήσει σε επικίνδυνες καταστάσεις.

Οι αναρροφήσεις και τα φίλτρα αυτών αποτελούν ευπαθές σημείο λόγω των ρύπων ή όπως στο προαναφερθέν παράδειγμα πάγων, που είναι ικανά να τα φράξουν με τη διαδικασία καθαρισμού να παίρνει ώρες για μία αναρρόφηση. Απόρροια της φραγής τους θα είναι η μειωμένη ροή στο σύστημα άρα και η ανεπαρκής απαγωγή θερμότητας από το δίκτυο του γλυκού νερού. Επίσης οι σωληνώσεις και τα επιστόμια του δικτύου σε περίπτωση που φθαρούν, κυρίως λόγω της διάβρωσης που προκαλεί το θαλασσινό νερό, θα παρουσιάσουν διαρροές ή και ακόμα η αστοχία σε μία σωλήνωση θα έχει ως αποτέλεσμα τη μόνιμη διαρροή μέχρι να βρεθεί ευκαιρία κατάλληλη το πλήρωμα να προβεί σε απαραίτητες διορθώσεις και συντήρηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί γεγονός από τον ειδικό #1 που αστοχίας σωλήνωσης μετά τους κύριους εναλλάκτες που πριν την έξοδο του νερού στη θάλασσα, η εκτεταμένη διάβρωση προκάλεσε αστοχία στη σωλήνωση και έφτασε να παρουσιάσει τρύπα η σωλήνα απ' την οποία υπήρχε μόνιμη διαρροή και κίνδυνος πλήρους αστοχίας σε περίπτωση που δεν υπήρχε ολική αντικατάσταση ολόκληρης της σωλήνωσης. Το τελικό κόστος της συγκεκριμένης αστοχίας ανήλθε σε πάνω από δέκα χιλιάδες δολάρια, μιας και η κατασκευή, μεταφορά στο πλοίο και εργατώρες για την εγκατάσταση και διευθέτηση της διόρθωσης από τους διευθυντές του γραφείου αποτέλεσε ιδιαίτερα κοστοβόρα διαδικασία. Ο νηογνώμονας και η σημαία του πλοίου ενημερώθηκαν και επιβεβαίωσαν τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την εγκατάσταση της νέας σωλήνωσης. Τα πιστοποιητικά της εκδόθηκαν από το νηογνώμονα και μετά την αδειοδότηση και της σημαίας προέβησαν όλες οι ενέργειες για την αντικατάσταση της σωλήνωσης.

Οι κίνδυνοι που προκύπτουν από την πιθανή αστοχία των αντλιών και τον εναλλακτών θερμότητας είναι υπαρκτοί και ταυτόχρονα όμως περιορισμένοι λόγω της σχεδίασης του συστήματος με υποσυστήματα σε αναμονή κατά την αστοχία των υπολοίπων. Οι αντλίες του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού σε ένα σύγχρονο δεξαμενόπλοιο είναι τρεις και ανάλογα με τις ανάγκες και το μέγεθός του μπορεί να είναι και τέσσερεις (μία εφεδρική και περιορισμένης ικανότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις). Στο σύστημα των εναλλακτών υπάρχει πάντα ένας εφεδρικός και οι αστοχίες που μπορεί να παρουσιάσει είναι σπάνιες εάν ακολουθείται η συντήρησή τους κατά τους ειδικούς, λόγω των φίλτρων που έχουν εγκατεστημένα στην εισαγωγή του θαλασσινού νερού, πριν τις μεταλλικές πλάκες. Ωστόσο, αστοχίες παρουσιάζουν οι αντλίες λόγω της διάβρωσης και γήρανσης των υλικών στεγανοποίησεως ή πιθανής αστοχίας των μοτέρ λόγω της αξιοπιστίας τους ή ανακριβής ευθυγράμμισης των αξόνων της περωτής και του μοτέρ. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να αναγνωρίζεται για να αποφευχθεί κατά το στάδιο κατασκευής του πλοίου μέσω της σωστής επίβλεψης του ναυπηγείου και της διαδικασίας της ευθυγράμμισης των αξόνων. Επίσης οι αστοχία της μηχανικής σύνδεσης (coupling) μεταξύ των αξόνων είναι ένα συχνό φαινόμενο κατά τους ειδικούς και πρέπει να επιβεβαιώνεται η κατάσταση του κατά την συντήρηση των αντλιών. Ρύποι που μπορεί να διέλθουν από τις αναρροφήσεις είναι ικανοί να προκαλέσουν φθορά στη περωτή και ως αποτέλεσμα την πτώση της αποτελεσματικότητας της αντλίας. Τα μανόμετρα και οι σένσορες των υποσυστημάτων παρουσιάζουν αστοχίες λόγω

φυσικής φθοράς από τη διάβρωση με την πάροδο των ετών και λόγω χαμηλού κόστους αντικαθίστανται τακτικά. Σε περίπτωση ένδειξης εκτός των αποδεκτών ορίων, πρώτα θα αντικατασταθεί ή θα ελεγχθεί η βαθμονόμησή τους, και στη συνέχεια θα προβεί το πλήρωμα σε περίπτωση που δεν είναι ελαττωματικοί, να ερευνά πιθανά αίτια και να επιθεωρήσει τα υπόλοιπα υποσυστήματα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού που είχαν σημαντικές επιπτώσεις στα πλοία που συνέβησαν και τη διακοπή λειτουργίας της κύριας μηχανής είναι πολυάριθμα. Στις 4 Οκτωβρίου του 2009, το δεξαμενόπλοιο Thames Fischer (κατασκευής 1997), αναχώρησε χωρίς φορτίο σε κατάσταση ερματισμού, από διυλιστήριο πετρελαίου στο Fawley της Αγγλίας αφού εκφόρτωσε το φορτίο πετρελαιοειδών του. Καθώς το πλοίο αύξησε την ταχύτητα του σε 8 κόμβους, ο αρχιμηχανικός έλαβε συναγερμό υψηλής θερμοκρασίας στο σύστημα ψύξης του γλυκού νερού. Κάλεσε τον καπετάνιο και τον ενημέρωσε για την κατάσταση όταν ο κύριος κινητήρας σταμάτησε να λειτουργεί λόγω της υψηλής θερμοκρασίας νερού ψύξης. Ο πιλότος κάλεσε αμέσως ρυμουλκά, τα οποία έφτασαν στο σημείο περίπου 20 λεπτά αργότερα. Το σκάφος μεταφέρθηκε σε ασφαλές αγκυροβόλιο, όπου ο αρχιμηχανικός διαπίστωσε ότι η αιτία του προβλήματος ήταν ένα φραγμένο φίλτρο εισόδου του θαλασσινού νερού στον εναλλάκτη θερμότητας. Μετά τον καθαρισμό του φίλτρου, το σκάφος συνέχισε την πορεία το. Η έρευνα διεξήχθη από το τμήμα έρευνας ναυτικών ατυχημάτων του Ηνωμένου Βασιλείου, όπου διαπίστωσε ότι το Thames Fisher είχε ιστορικό αστοχιών που σχετίζονται με το σύστημα ψύξης του θαλασσινού νερού. Ο συνολικός χρόνος μέχρι την ανάκτηση των συστημάτων του πλοίου και τη συνέχιση της πορείας του ήταν δύο ώρες (MAIB, 2015). Ένα ακόμα ατύχημα που είχε ως αποτέλεσμα την ακινητοποίηση του πλοίου και των σοβαρών ζημιών στους πλοιοκτήτες, ήταν του Hassa E όπου η σωλήνωση του συστήματος είχε υποστεί βλάβη που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της στάθμης του θαλασσινού νερού στην σεντίνα που από εκεί πέρασε στην δεξαμενή του λαδιού λίπανσης του κινητήρα. Τα έδρανα της μηχανής υπέστησαν καταστρεπτικές ζημιές και το πλοίο ήταν εκτός λειτουργίας (off-hire) συνολικά για πέντε εβδομάδες. Το σύνολο των ζημιών ξεπέρασε το μισό εκατομμύριο δολάρια.

5.2.6 Επιθεώρηση και συντήρηση του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού – Πρακτικές πλοιοκτῆτη και απαιτήσεις νηογνωμόνων

Σύμφωνα με τους ειδικούς και τα στοιχεία ναυτιλιακής εταιρείας, μελετάται η μέθοδος που προσεγγίζεται το σύστημα ψύξης ως προς την επιβεβαίωση και επιδιόρθωση της κατάστασής του. Σημειώνεται ωστόσο, πως τα χρονικά πλαίσια αυτών μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με τις οδηγίες των κατασκευαστών και του ναυπηγείου, του τύπου και των αναγκών του πλοίου και τον διαφορετικό εξοπλισμό που μπορεί να φέρει μία παρόμοια εγκατάσταση μεταξύ διαφορετικών πλοίων. Ωστόσο υπάρχουν γενικές κατευθυντήριες γραμμές και βέλτιστες πρακτικές οι οποίες θεσπίζονται με βάση την εμπειρία της κάθε ναυτιλιακής και των εμπειριών πληρωμάτων της αλλά και των οδηγιών των νηογνωμόνων για κάθε σύστημα αναλόγως του τύπου του πλοίου. Επιπροσθέτως, γίνεται αναφορά στις απαιτήσεις και ενέργειες που εκτελούνται βάση των νηογνωμόνων ως προς την επιθεώρηση και συντήρηση του υπό μελέτη συστήματος. Οι οδηγίες για την επιθεώρηση και περιοδική συντήρηση των υποσυστημάτων του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού είναι οι εξής:

➤ Αναρροφήσεις Θαλάσσης

Το υποσύστημα αυτό όπως αναφέρθηκε στο 5.2.4 αποτελείται από τα φίλτρα που βρίσκονται στο κύτος του πλοίου (grids) και το φίλτρο (strainer) μαζί με ανόδια που βρίσκονται είτε μέσα σε αυτό είτε στις αναρροφήσεις αναλόγως την εγκατάσταση.

Βάση διαδικασιών κάθε ναυτιλιακής εταιρείας, όλα τα φίλτρα του κύτους ελέγχονται κατ' ελάχιστο ανά περίπου έξι μήνες μέσω της ανάθεσης σε ιδιωτικές εταιρείες που αναλαμβάνουν την επιθεώρηση του κύτους του πλοίου εν πλω στα λιμάνια. Επίσης, ο νηογνώμονας των πλοίων που φέρουν το notation IWS – In Water Survey, καθιστά υποχρεωτική την επιθεώρηση αυτή ανά δυόμισι έτη, κατά την οποία πρέπει να επιβεβαιωθεί η καλή κατάσταση των φίλτρων επί του κύτους. Τα φίλτρα μετά την αναρρόφηση ελέγχονται και καθαρίζονται κατ' ελάχιστο ανά τρεις μήνες. Κατά τη συντήρησή τους, καθαρίζονται από όλους τους ρύπους και μικροοργανισμούς που έχουν συκρατήσει, ταυτόχρονα ελέγχονται και τα επιστόμια των αναρροφήσεων εισόδου και εξόδου από τα φίλτρα, και οι σωληνώσεις του υποσυστήματος. Μετά τη συναρμολόγηση του εξοπλισμού γίνεται τελικός έλεγχος για διαρροές. Ταυτόχρονα εξετάζονται και τα ανόδια των φίλτρων τα οποία ανανεώνονται με ρυθμό περίπου δύο ανά χρόνο. Τα επιστόμια ελέγχονται ως προς τη στεγανότητά τους και καθαρίζεται ο άξονας και λιπαίνεται ο στυπιοθλήπτης τους ανά μήνα.

Ανά πέντε έτη, κυρίως στους δεξαμενισμούς των πλοίων, τα φίλτρα του κύτους και τα επιστόμια των αναρροφήσεων αφαιρούνται από το δίκτυο και επισκευάζονται/καθαρίζονται πλήρως. Εξετάζονται όλα τα μέρη τους και αντικαθίστανται όσα κρίνουν απαραίτητο βάση φθοράς το πλήρωμα και ο πλοιοκτήτης. Οι σωληνώσεις και τα σημεία που έχουν φθαρεί επισκευάζονται μέσω εφαρμογής ειδικής μπογιάς για την προστασία τους από τη διάβρωση. Τα φίλτρα καθαρίζονται και σε αρκετές περιπτώσεις αντικαθίστανται λόγω της υψηλής διάβρωσης που υφίστανται. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, στους δεξαμενισμούς, ο επιθεωρητής του νηογνώμονα παρακολουθεί και επιβλέπει τη συντήρηση και τον έλεγχο των επιστομίων και των σωληνώσεων του υποσυστήματος των αναρροφήσεων θαλάσσης και επιβεβαιώνει τη μη ύπαρξη διαρροών κατά την καθέλκυση του πλοίου.





Σχήμα 5.14 Φωτογραφίες φίλτρων, ανοδίων και επιστόμιου σωλήνωσης αναρροφήσεων θαλάσσης πριν και μετά το δεξαμενισμό δεξαμενοπλοίου δεκαετίας – Ναυπηγεία Νεωρίου, Σύρος 2023

➤ **Σωληνώσεις και επιστόμια δικτύου**

Καθημερινά, το πλήρωμα του μηχανοστασίου, ελέγχει πως δεν υπάρχουν διαρροές στα περιουχένια των σωληνώσεων και στα παρεμβύσματα του δικτύου. Ανά έξι μήνες εκτελείται ενδελεχής έλεγχος των σωληνώσεων για τυχόν διαβρωμένα σημεία και ελέγχεται η στεγανότητα των σωληνώσεων και των επιστομίων του συστήματος ψύξης μέσω της απομόνωσης και ελέγχου όλων των σωληνώσεων μία διαδρομή τη φορά, εξασφαλίζοντας τη λειτουργικότητα και ασφάλεια των δικτύων.

Ανά πέντε έτη αλλά και πριν την παράδοση του πλοίου, σε συμφωνία και με τον επιθεωρητή του νηογνώμονα εκτελείται έλεγχος των σωληνώσεων και ευρύτερα του δικτύου ψύξης θαλασσινού νερού για τον έλεγχο και επιδιόρθωση τυχόν διαρροών του συστήματος.





Σχήμα 5.15 Φωτογραφίες σωληνώσεων και επιστομίου πριν και μετά το δεξαμενισμό δεξαμενοπλοίου δεκαετίας – Ναυπηγεία Νεωρίου, Σύρος 2023

➤ Αντλίες

Ανά τρεις μήνες γίνεται έλεγχος των ένσφαιρων τριβών (ball bearings), του στυπιοθλίπτη που είναι το μέσο στεγανοποίησης του άξονα (mechanical seal) και των παρεμβυσμάτων (o-rings) και αντικαθίστανται αν κάποια βρεθούν ελαττωματικά ή με σημάδια εκτεταμένης φθοράς. Επίσης το ανόδιο ψευδαργύρου που είναι πακτωμένο στο εσωτερικό του κελύφους εξετάζεται και αντικαθίστανται αναλόγως του επιπέδου της διάβρωσης του. Τέλος, οι αντλίες ελέγχονται για τυχόν διαρροές. Με συχνότητα της μίας φοράς ανά χρόνο, γίνεται ενδελεχής έλεγχος όλων των μηχανικών μερών της αντλίας όπως της πτερωτής (impeller) και του άξονα (shaft) τα οποία αντικαθίστανται σε περίπτωση φθοράς. Ανά τέσσερα έτη τα μηχανικά μέρη της αποσυνδέονται και γίνεται συντήρησή τους με αντικατάσταση των μηχανικών συνδέσεων των παρεμβυσμάτων και των τριβών. Εκτελείται μέτρηση της φθοράς της πτερωτής και του άξονα και αντικαθίστανται κατά την κρίση του πληρώματος και τις οδηγίες των εγχειριδίων χρήσης του κατασκευαστή.

Ανά πέντε έτη, στους δεξαμενισμούς αλλά και πριν την παράδοση του πλοίου, ο επιθεωρητής του νηογνώμονα ζητάει τη δοκιμαστική εναλλαγή και έλεγχο λειτουργίας των αντλιών του συστήματος λόγω της σημαντικότητας που έχει η ομαλή και άμεση λειτουργία όλων των αντλιών σε περίπτωση βλάβης των υπολοίπων.

➤ Εναλλάκτες θερμότητας

Ανά τρεις μήνες γίνεται έλεγχος των φίλτρων του εναλλάκτη και επιθεώρηση για τυχόν διαρροές ή σημάδια διάβρωσης στα θυσιαζόμενα περιουχένια (corrosion flanges) και αντικατάστασή τους ανάλογα της φθοράς τους. Βάση των εγχειριδίων των κατασκευαστών, η συντήρηση και επιθεώρηση των μεταλλικών πλακών, των επιστομιών και της σωλήνωσης των εναλλακτών θερμότητας γίνεται ανά έξι ή δώδεκα μήνες. Τα φύλλα και το φίλτρο του εναλλάκτη καθαρίζονται ενδελεχώς. Γίνεται έλεγχος των μηχανικών μερών ως προς τη διάβρωση και φθορά που φέρουν και αντικαθίστανται βάση οδηγιών του κατασκευαστή και την κρίση του πληρώματος.

➤ **Θερμόμετρα και μανόμετρα συστήματος**

Ελέγχονται καθημερινά στις επιθεωρήσεις του μηχανοστασίου. Οι ενδείξεις τους επιβεβαιώνονται βάση της κατάστασης λειτουργίας του συστήματος ψύξης και η βαθμονόμηση τους ελέγχεται κατά τη συντήρηση του εκάστοτε υποσυστήματος στα οποία αυτά είναι εγκατεστημένα. Πιο συγκεκριμένα, στους εναλλάκτες θερμότητας εκτελείται έλεγχος της βαθμονόμησης των θερμομέτρων τους κατά την περιοδική συντήρηση ανά έξι ή δώδεκα μήνες. Στις αντλίες γίνεται έλεγχος της βαθμονόμησης των μανομέτρων επίσης ανά ένα χρόνο. Τα εργαλεία με τα οποία εκτελείται η βαθμονόμηση των οργάνων αυτών, ελέγχονται επίσης ανά ένα χρόνο από συνεργεία πιστοποιημένα για τον έλεγχο και βαθμονόμησή τους. Τα πιστοποιητικά αυτά παρέχονται στον επιθεωρητή του νηογνώμονα σε περίπτωση που στην ετήσια επιθεώρηση του επιθυμεί την επισκόπησή τους.

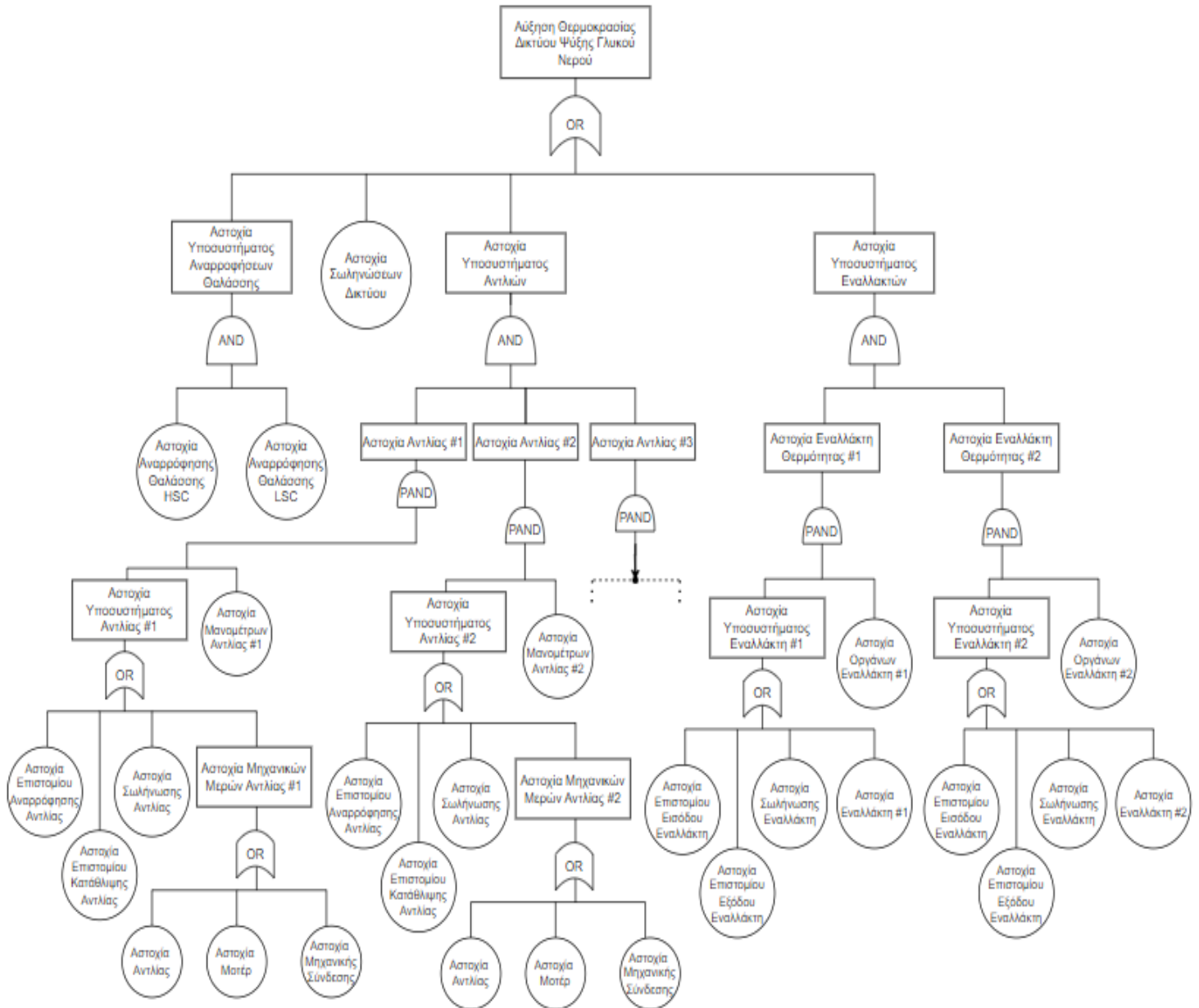
Αξίζει να σημειωθεί, πως δεν υπάρχει επίσημη μεθοδολογία για τον ενδεδειγμένο έλεγχο και επιθεώρηση του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού από τους νηογνώμονες παρά μόνο οδηγίες και απαιτήσεις στις επιθεωρήσεις του κύτους (Underwater in lieu of DD) ή στις ετήσιες επιθεωρήσεις κλάσης. Υπό ορισμένες περιπτώσεις ωστόσο δίνονται λεπτομερείς οδηγίες για την εγκατάσταση, σχεδίαση και επιθεώρηση αυτού του συστήματος με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις κατευθυντήριες γραμμές του Αμερικανικού νηογνώμονα ABS για τα πλοία που φέρουν την πιστοποίηση «Ice Class» που μεταφέρουν φορτία σε παγωμένες θάλασσες όπως είναι η Αρκτική (ABS, 2006). Σε περίπτωση αστοχίας που αυτή φέρει αυξημένο ρίσκο, όπως το παράδειγμα που αναφέρθηκε προηγουμένως (βλ. σελ. 100 αστοχία σωλήνωσης), θα πρέπει το πλήρωμα να ειδοποιήσει τη ναυτιλιακή εταιρεία που το διαχειρίζεται, και στη συνέχεια εκείνη να έρθει σε επαφή με την σημαία και το νηογνώμονα για την αξιολόγηση των κινδύνων και τις διορθωτικές ενέργειες που θα ακολουθηθούν. Τα πιστοποιητικά του εξοπλισμού που αντικαθίστανται θα πρέπει πρώτα να ελεγχθούν από το νηογνώμονα και στη συνέχεια να επιβεβαιωθεί μέσω επιθεώρησης η λειτουργία του εξοπλισμού κάτω από τις απαιτούμενες πιέσεις και θερμοκρασίες του συστήματος ψύξης. Στις σωληνώσεις αυτό γίνεται μέσω της ανάπτυξης πίεσεως δύο με τρεις φορές πάνω από τα συνήθη όρια λειτουργίας του συστήματος (pressure tests) τα οποία επιβεβαιώνονται και πιστοποιούνται από τους νηογνώμονες.

Οι οδηγίες και οι προτάσεις των νηογνώμονων, των κατασκευαστών και του ναυπηγείου, το οποίο φέρει την ευθύνη της αξιοπιστίας των συστημάτων αφού τα εγκατέστησε κατά τη ναυπήγηση του πλοίου, αποστέλλονται στον πλοιοκτήτη μέσω της επίσημης διαδικασίας παράδοσης των τελικών σχεδίων και εγχειριδίων στον καπετάνιο του πλοίου ή σε εκπρόσωπο του πλοιοκτήτη λίγο πριν ή την ημέρα παράδοσης του πλοίου. Υπογραμμίζεται όμως πως μήνες ή και χρόνια πριν την παράδοση του πλοίου, έχουν αποσταλεί αρκετά ή και όλα τα σχέδια και εγχειρίδια στη διαχειρίστρια εταιρεία που μετά από ενδεδειγμένη εξέτασή τους, διαμορφώνει τις οδηγίες για το σύστημα περιοδικής συντήρησης που είναι υποχρεωμένο το πλήρωμα να ακολουθεί χωρίς αποκλίσεις, μετά την παράδοση του πλοίου. Τέλος, ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης και καταγραφής όλων των εργασιών συντήρησης και επιθεώρησης εγκαθίσταται στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές των πλοίων, το οποίο αποτελεί καθημερινό εργαλείο για το πλήρωμά του, για την ανάθεση και προγραμματισμό των εργασιών του.

6. Μοντελοποίηση του συστήματος ψύξης

6.1.1 Ανάπτυξη Δένδρου Σφαλμάτων

Η μεθοδολογία ανάπτυξης μοντέλου DBN για τον υπολογισμό του ρίσκου του συστήματος θα γίνει όπως προδιαγράφηκε στο 3.1.3 με αρχικά την ανάπτυξη FTA για το υπό μελέτη σύστημα. Στόχος είναι η αναγνώριση των εξαρτήσεων μεταξύ των υποσυστημάτων του συστήματος ψύξης και των λογικών πυλών κατά τη διάδοση της πεποίθησης όπως εξελίσσεται σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Βάση της ανάλυσης FMEA, που ήταν το πρώτο βήμα κατά την προσέγγιση ανάλυσης ρίσκου, αναπτύσσεται το κάτωθι δένδρο σφαλμάτων.



Σχήμα 6.1 Ανάπτυξη Δένδρου Σφαλμάτων Συστήματος Ψύξης Θαλασσινού Νερού

Βάση της ανάλυσης των πιθανών αστοχιών του συστήματος όπως αυτές καταγράφηκαν στο κεφ. 5.2.5 και της ανάλυσης των μερών του συστήματος ψύξης στο 5.2.6, η διάρθρωση των υποσυστημάτων του είναι εμφανής και επιχειρείται ομαδοποίηση των μερών του σε ευρύτερες ομάδες για την κατανόηση και στοχευμένη προσέγγιση του υπό μελέτη συστήματος.

- **Αναρροφήσεις Θαλάσσης.** Περιλαμβάνει το ζεύγος των αναρροφήσεων High & Low Sea Chests, των φίλτρων τους κατά την είσοδο στη σωλήνωση του δικτύου (strainers) και των επιστομιών απομόνωσής τους.
- **Σωλήνωση Δικτύου.** Περιλαμβάνει τη σωλήνωση όλου του δικτύου του συστήματος ψύξης
- **Σύστημα Τριών Αντλιών.** Περιλαμβάνει το σύστημα των τριών αντλιών συμπεριλαμβανομένων των επιστομιών κατάθλιψης και αναρρόφησης της κάθε αντλίας, της σωλήνωσης στην περιοχή αυτών, της μηχανικής σύνδεσης του άξονα της πτερωτής με τον άξονα του μοτέρ(coupling) και το ίδιο το μοτέρ. Τέλος, λαμβάνεται ως ένα υποσύνολο τα μηχανικά μέρη της και το ανόδιο του κελύφους. Συμπεριλαμβάνονται σε αυτά η πτερωτή, ο στυπιοθλήπτης, τα στεγανοποιητικά υλικά-παρεμβύσματα και οι ένσφαιροι τριβείς της κάθε αντλίας.
- **Σύστημα Δύο Εναλλακτών Θερμότητας.** Περιλαμβάνει του δύο εναλλάκτες θερμότητας του γλυκού νερού, τα επιστόμια εισαγωγής και εξαγωγής στους εναλλάκτες, τη σωλήνωση τους, και το μηχανικά μέρη του εναλλάκτη όπως είναι το φίλτρο εισαγωγής θαλάσσης, το μεταλλικά φύλλα, και τα στεγανοποιητικά μέρη του.

6.1.2 Ανάπτυξη DBN συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού

Βάση της ανάλυσης FTA, γίνεται ξεκάθαρη η κατηγοριοποίηση των κόμβων του DBN, δηλαδή ποιοι θα είναι κόμβοι γονείς, στους οποίους βάση θεωρίας DBN όπως παρουσιάστηκε στο 4.3.1. θα αποδοθούν κατανομές πιθανοτήτων αστοχίας με πιθανότητα αστοχίας μεταβαλλόμενη κατά την πάροδο του χρόνου, και, ποιοι θα είναι κόμβοι παιδιά των οποίων η κατανομή πιθανότητας θα καθορίζεται βάση της κατανομής πιθανότητας των γονέων τους και ταυτόχρονα της εξάρτησής τους με αυτούς βάση του πίνακα δεσμευμένων πιθανοτήτων που τους αντιστοιχεί.

- **Αναρροφήσεις Θαλάσσης.** Κόμβοι-γονείς είναι οι αναρροφήσεις θαλάσσης HSC και LSC στους οποίους συμπεριλαμβάνονται τα υπόλοιπα μέρη του υποσυστήματος αναρρόφησης. Κόμβος παιδί είναι το σύστημα των δύο αναρροφήσεων που ουσιαστικά αντικατοπτρίζει την αστοχία και των δύο αναρροφήσεων.
- **Σωλήνωση Δικτύου.** Περιλαμβάνει τη σωλήνωση όλου του δικτύου του συστήματος ψύξης που αποτελεί έναν μοναδικό κόμβο γονέα με παιδί απευθείας το σύστημα ψύξης. Δεν υπάρχει άλλος ενδιάμεσος κόμβος ως προς τις συνέπειες που έχει η αστοχία του προς το σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού. Γίνεται η παραδοχή πως αστοχία σε σωλήνωση του δικτύου, σημαίνει και αστοχία του δικτύου ψύξεως θαλάσσης.
- **Σύστημα Τριών Αντλιών.** Κόμβοι-γονείς είναι τα επιστόμια κατάθλιψης και αναρρόφησης της κάθε αντλίας, της σωλήνωσης στην περιοχή αυτών, τα μέρη του σώματος της αντλίας, η μηχανική σύνδεση (coupling) και το ηλεκτρικό της μοτέρ. Κόμβοι παιδιά είναι τα

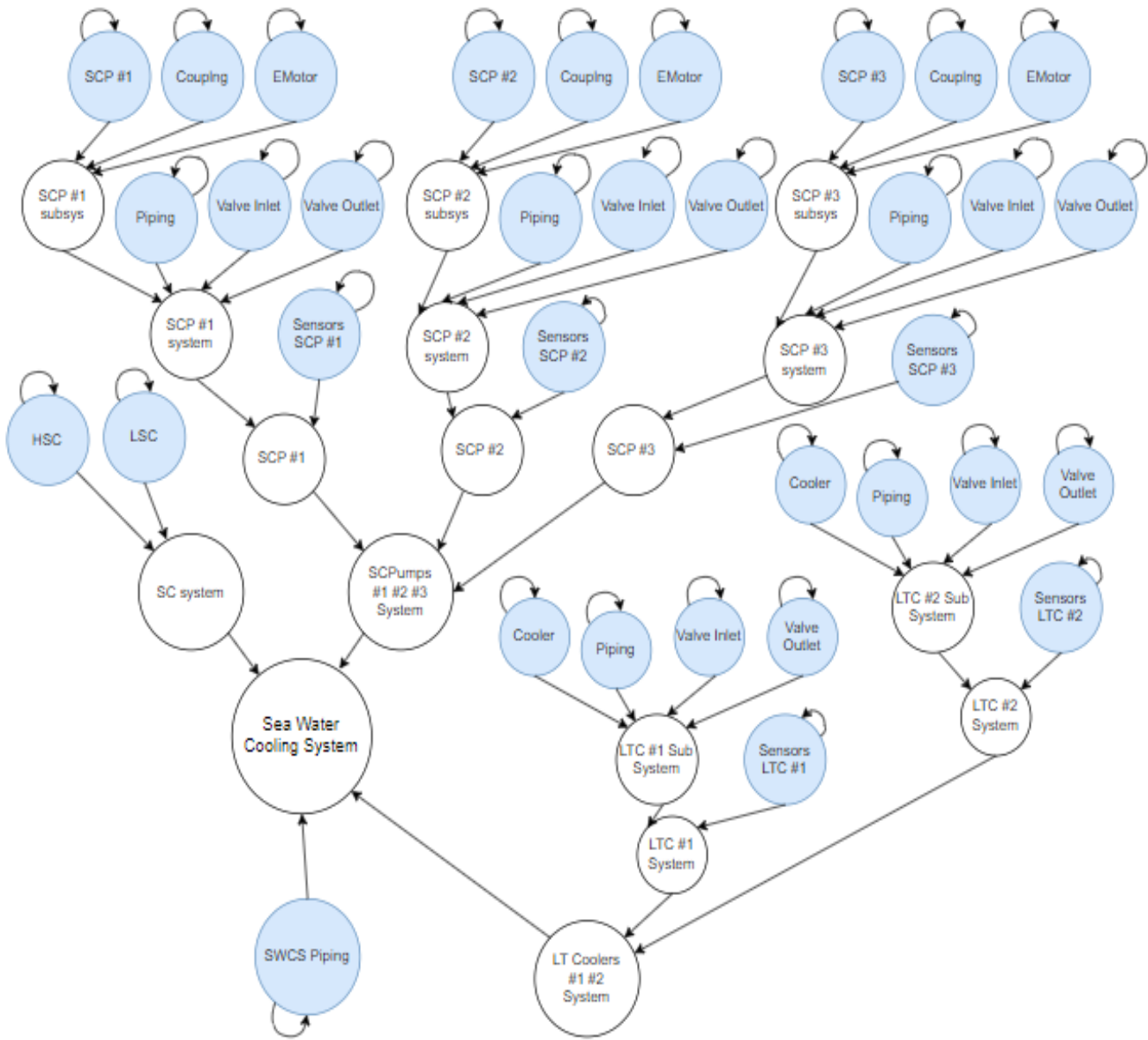
υποσυστήματα/ομαδοποιήσεις της κάθε αντλίας, έτσι όπως αυτά προέκυψαν λόγω της ανάλυσης αστοχιών των αντλιών του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.

- **Σύστημα Δύο Εναλλακτών Θερμότητας.** Κόμβοι-γονείς είναι τα επιστόμια εισαγωγής και εξαγωγής στους εναλλάκτες, η σωλήνωσή τους και το μηχανικά μέρη του εναλλάκτη. Κόμβοι παιδιά είναι τα υποσυστήματα/ομαδοποιήσεις του κάθε εναλλάκτη, έτσι όπως αυτά προέκυψαν λόγω της ανάλυσης αστοχιών των αντλιών του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.

Ξεκαθαρίζεται σε αυτό το σημείο, πως οι σένσορες του συστήματος λήφθηκαν υπόψη ως κόμβοι γονείς του συστήματος των αντλιών και των εναλλακτών θερμότητας, ωστόσο επιλέχθηκαν στην ανάλυση δένδρου σφαλμάτων συνδέσεις *priority-and-gates* που πρακτικά σημαίνει πως η καλή λειτουργία ή αστοχία των αισθητήρων του συστήματος δεν θα επηρεάσει τη λειτουργικότητα του υπό μελέτη απλουστευμένου συστήματος. Αυτή η παραδοχή έγινε μιας και σε συνέχεια των συνεντεύξεων με τους ειδικούς της ναυτιλίας, συμπεράθηκε πως οι επιπτώσεις που έχει η πιθανή δυσλειτουργία των μη αυτοματοποιημένων συστημάτων ψύξης, όπως αυτό που επιλέχθηκε προς μελέτη στην παρούσα εργασία, δεν επιφέρουν μεταβολές στην αξιοπιστία του συστήματος καθώς δεν επηρεάζεται το αν λειτουργεί ή δεν λειτουργεί το δίκτυο ψύξης θαλάσσης. Στα πλαίσια της παρούσης μελέτης δεν λαμβάνονται υπόψη στον συμπερασμό μέσω του αποκλεισμού της διάδοσης της αστοχίας τους σε κόμβους παιδιά, όπως είναι τα υποσυστήματα των αντλιών και των εναλλακτών θερμότητας. Συνεπώς, οι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων των παιδιών τους θα αντικατοπτρίζουν τη σχέση αυτή με τους σένσορες του κάθε υποσυστήματος (βλ. Παράρτημα Ι).

Λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος, με τριάντα τέσσερις κόμβους που μεταβάλλονται δυναμικά με το χρόνο ως κόμβοι γονείς με δική τους κατανομή πιθανότητας ο καθένας, επιλέχθηκε η μελέτη του συστήματος για δύο πιθανές καταστάσεις κάθε κόμβου. Γίνεται η παραδοχή πως ένας κόμβος και κατ' επέκταση ένα υποσύστημα, είτε είναι λειτουργικός είτε δεν είναι λειτουργικός και άρα έχει αστοχήσει. Υπογραμμίζεται πως η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη χωρίς αναφορές για τη φύση της δέσμευση και την ποσοτικοποίησή της σε αυτό και παρόμοια πολυεπίπεδα συστήματα, που σημαίνει πως σε περίπτωση μελέτης πολλαπλών καταστάσεων κόμβων, θα χρειαστεί να γίνουν αρκετές παραδοχές, κυρίως διαμέσου ειδικών, και επαναξιολόγηση των αποτελεσμάτων έως ότου αυτά αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα σε αποδεκτό βαθμό. Η παρούσα εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για μετέπειτα μελέτη ερευνητών και σπουδαστών στο παρόν σύστημα με πολλαπλές καταστάσεις των κόμβων του. Αυτές θα μπορούσαν να είναι «δυσλειτουργικός» «80% λειτουργικός» «40% λειτουργικός» και ούτω καθεξής ανάλογα το σχεδιασμό του εκάστοτε μοντέλου.

Το λογισμικό GeNIe χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του Μπεϋζιανού μοντέλου που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία καθώς και κυριότερα για την επικύρωση των αποτελεσμάτων του κώδικα, με υπολογισμό δεσμευμένων και προγενέστερων πιθανοτήτων σε διάφορα χρονικά βήματα για διαφορετικό βαθμό αποτελεσματικότητας επιθεώρησης και συντήρησης. Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του κώδικα καθώς και τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο λογισμικών παρουσιάζονται στο Παράρτημα ΙΙΙ.



Σχήμα 6.2 Ανάπτυξη Δυναμικού Μπεϋζιανού Δικτύου Συστήματος Ψύξης Θαλασσινού Νερού – Στατική αναπαράσταση ενός χρονικού βήματος

6.1.3 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος

Η ανάλυση του συστήματος ως προς το ρίσκο, προϋποθέτει πρώτα την ποσοτικοποίηση και υπολογισμό των πιθανοτήτων αστοχίας των κόμβων του συστήματος βάση μεθόδων συμπερασμού DBN όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαια 4.2.6, 4.3. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κατανομή στη μηχανική για τη μελέτη της αξιοπιστίας των συστημάτων είναι η εκθετική κατανομή (Gong et al., 2022). Ο ρυθμός αστοχίας είναι σταθερός με το χρόνο και η κατανομή αυτή χαρακτηρίζεται από τη μη συσχέτιση πολλαπλών αστοχιών, ή όπως πολλές φορές περιγράφεται «δεν έχει μνήμη». Η πιθανότητα αστοχίας ενός εξαρτήματος ή εξοπλισμού σε

μηχανολογικές εγκαταστάσεις μπορεί να περιγραφεί επιτυχώς αποδίδοντας της την εκθετική κατανομή ως εξής:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6.1)$$

όπου $\lambda(t) = \lambda$, ρυθμός αστοχίας εξαρτήματος/εξοπλισμού (failure rates – FR), $f(t)$ η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της αστοχίας του και $F(t)$ η συνάρτηση κατανομής της πιθανότητας αστοχίας του.

Βάση των δεδομένων βιβλιογραφίας (Smith, 2011) ερευνών στο υπό μελέτη σύστημα (Allal et al., 2017), και των συνεντεύξεων με ειδικούς της ναυτιλίας, προκύπτουν τα εξής FR των γονέων κόμβων:

Πίνακας 6.1 Ρυθμός Αστοχίας Εξοπλισμού/Μηχανημάτων υπό μελέτη συστήματος ψύξης

Εξοπλισμός/Μηχάνημα	Ρυθμός Αστοχίας(FR)	Μέσος Χρόνος για Αστοχία σε ώρες	Μέσος Χρόνος για Αστοχία σε ημέρες	Μέσος Χρόνος για Αστοχία σε χρόνια
Αντλία	5,43293E-05	18406	767	2,1
Μοτέρ	2,15662E-05	46369	1932	5,3
Εναλλάκτες	4,611E-05	21687	904	2,5
Αναρροφήσεις Θαλάσσης	5,59E-04	1789	75	0,2
Σωλήνωση Δικτύου	9,32421E-06	107248	4469	12,2
Επιστόμια	7,65214E-06	130682	5445	14,9
Μηχανικές Συνδέσεις	2,05447E-05	48674	2028	5,6
Όργανα Ενδείξεων	2,82071E-05	35452	1477	4,0

Οι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων των κόμβων σε συνδυασμό με τον υπολογισμό του πρώτου βήματος παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι.

6.1.4 Μελέτη Αβεβαιότητας – Ατελής Συντήρηση

Η δυσδιάβατη εγκατάσταση των σωληνώσεων του συστήματος ψύξης λόγω του μειωμένου χώρου για ορθή και πλήρη επιθεώρηση και συντήρησή τους, η δυσκολία συντήρησης των αναρροφήσεων θαλάσσης λόγω του ανοιχτού δικτύου, καθιστά το σύστημα επιρρεπές σε φαινόμενα ατελούς συντήρησης όπως αυτά καταγράφηκαν στο κεφ. 3.2.3.3. Τα συστήματα σε κάθε βιομηχανική εγκατάσταση πολλές φορές δέχονται ατελή συντήρηση (Carlos, 2016). Αρκεί κάποιος να αναρωτηθεί κατά πόσο η επιθεώρηση και συντήρηση συστημάτων που δεν εμφανίζουν συχνά αστοχίες τηρείται στο έπακρο σε τόσο απαιτητικά περιβάλλοντα εργασίας. Ο ανθρώπινος παράγοντας αποτελεί ολόκληρο τομέα έρευνας και αντικείμενο μελέτης από τους ερευνητές (Sotiralis et al., 2016) και δεν θα ακολουθήσει περαιτέρω αναφορά σε αυτόν. Ωστόσο, είναι εύλογο να αναπτυχθεί μία ανάλυση αβεβαιότητας ως προς την αποτελεσματικότητα της επιθεώρησης και συντήρησης στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας τις κατευθυντήριες γραμμές και θεωρίες της ατελούς συντήρησης. Η μελέτη των διαφορετικών αποκρίσεων του συστήματος υπό την μεταβολή της αβεβαιότητας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά συμπεράσματα για τις ιδιομορφίες και ιδιότητες ενός συστήματος κατά τον υπολογισμό της πιθανότητας αστοχίας αυτού και του εξοπλισμού που το διέπει.

Επιλέγεται η προσέγγιση μέσω της θεωρίας που αναπτύχθηκε αρχικά από τους Whang και Pham (1996), όπου γίνεται ο ισχυρισμός πως το υπό συντήρηση εξάρτημα επιστρέφει σε πρότερη κατάσταση της ζωής του. Όπως περιγράφουν, η ηλικία που έχει αποκτήσει λόγω της λειτουργίας του (service age), μειώνεται κατά ένα σταθερό ποσοστό της ηλικίας που είχε ακριβώς πριν την κάθε περιοδική συντήρηση. Σε επικοινωνία της θεωρίας αυτής με επαγγελματίες του χώρου, γίνεται αποδεκτή η παραδοχή πως ποτέ δεν είναι τέλεια η επιθεώρηση των υποσυστημάτων ψύξης θαλασσινού νερού του πλοίου, κατά τέτοιο τρόπο που να γίνεται AGAN-As Good As New ο εξοπλισμός του. Η διάβρωση, η ικανότητα του πληρώματος και το δυναμικό περιβάλλον του πλοίου έχουν καταλυτικό ρόλο σε αυτό το φαινόμενο. Είναι βέβαιη η φυσική φθορά και γήρανση του εξοπλισμού του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού στο δυναμικό και αδιάκοπα υπό υψηλές τάσεις και πιέσεις περιβάλλον.

Τα όρια που επιλέγονται έχουν ως στόχο να αναδείξουν την επίπτωση που έχει η αποτελεσματικότητα της συντήρησης σε όλα τα πιθανά επίπεδα ατελούς συντήρησης. Ακολουθεί μελέτη μέσω υιοθέτησης πολλαπλών συντελεστών μείωσης της ζωής εργασίας (service age) μετά τη συντήρηση με βαθμούς αποτελεσματικότητας I&M **0.2, 0.4, 0.6** και **0.8** της κατάστασης που βρισκόταν ο εξοπλισμός στο χρονικό βήμα πριν εκτελεστεί η επιθεώρηση και συντήρηση του. Αυτό μεταφράζεται σε ποσοστό μείωσης της πιθανότητας αστοχίας των κόμβων του BN που εκφράζουν την πιθανή αστοχία εξαρτημάτων του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού μετά από κάθε περιοδική επιθεώρηση και συντήρηση.

6.1.5 Προσέγγιση RBI

Σε αυτό το σημείο, απαιτείται ο καθορισμός των προδιαγραφών των σεναρίων επιθεώρησης και συντήρησης για το παρόν μοντέλο. Οι προδιαγραφές αυτές θα πρέπει να είναι σε μερική ή πλήρη συμφωνία με την πρακτική των ναυτιλιακών και των έμπειρων διαχειριστών του υπό μελέτη συστήματος. Καθορίζονται από τις παραμέτρους του μοντέλου, τη φύση και την προέλευση των δεδομένων που χρησιμοποιούνται, την τρέχουσα κατάσταση στην επιθεώρηση, τη συντήρηση και την αποτελεσματική παρακολούθηση της κατάστασης των πλοίων από τα πληρώματα και τις διαχειρίστριες εταιρείες ταυτοχρόνως. Για την πλήρη κατανόηση πιθανών αδύναμων σημείων αυτής της προσέγγισης αρκεί να σκεφτεί το παράδειγμα φραγής των αναρροφήσεων θαλάσσης (κεφ. 5.2.5) που είχε ως αποτέλεσμα την πολυήμερη εργασία και συντήρησή τους για την αποφυγή αύξησης της θερμοκρασίας του νερού ψύξης της κύριας μηχανής και σταματήματος σε περιοχή με χαμηλές θερμοκρασίες.

Σύμφωνα με την ανάλυση των κατευθυντήριων γραμμών για την επιθεώρηση και συντήρηση του συστήματος ψύξης, όπως παρουσιάστηκαν στο 5.2.6., επιλέγονται τα παρακάτω χρονικά διαστήματα, και γίνεται η παραδοχή πως η επιθεώρηση και συντήρηση του συστήματος συνολικά, για όλα τα υποσυστήματα την ίδια στιγμή. Ως συνολικός χρόνος μελέτης της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος ορίστηκαν οι 3000 ώρες λειτουργίας, μιας και αυτό αντιστοιχεί σε περίπου 4.2 μήνες λειτουργίας χωρίς επιθεώρηση ή συντήρηση συστημάτων με σημαντικό κίνδυνο σε περίπτωση αστοχίας όπως οι αναρροφήσεις θαλασσινού νερού, που φέρουν μέσο ρυθμό αστοχίας τις 75 ημέρες (βλ. **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**).

- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 100 ώρες λειτουργίας
- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 200 ώρες λειτουργίας

- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 300 ώρες λειτουργίας
- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 400 ώρες λειτουργίας
- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 500 ώρες λειτουργίας
- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 600 ώρες λειτουργίας
- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 700 ώρες λειτουργίας
- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 1000 ώρες λειτουργίας
- Επιθεώρηση και συντήρηση ανά 1500 ώρες λειτουργίας
- Καμία επιθεώρηση ή συντήρηση για χρονικό διάστημα 3000 ωρών λειτουργίας

Σύμφωνα με τα στοιχεία του PMS και της εμπειρίας των ειδικών, αυτά τα χρονικά πλαίσια έρευνας είναι αποδεκτά και καλύπτουν τα πλαίσια της συντήρησης και επιθεώρησης των ευπαθών σημείων του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού. Παρατηρείται ωστόσο, πως τα πλαίσια της κύριας συντήρησης των αντλιών του συστήματος (Major Overhauling 40000 Hours) δεν τηρούνται. Αυτό συμβαίνει γιατί γίνεται η επιλογή της μελέτης του συστήματος ως προς το ρίσκο που φέρει λόγω των πιθανών αστοχιών του, που βάση του **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, προκύπτουν συχνότερα από το πλαίσιο της κύριας συντήρησης αυτού. Υπενθυμίζεται, πως οι ρυθμοί αστοχίας των μηχανολογικών εξαρτημάτων δεν προέκυψαν μετά τη μη επιθεώρηση ή συντήρηση του υπό μελέτη συστήματος. Τα ποσοστά αστοχίας προέρχονται μέσω ερευνών που μελετούν τα πλοία υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και άρα υπό το πρίσμα τακτικών επιθεωρήσεων και συντηρήσεων του εξοπλισμού του κάθε υποσυστήματος του δικτύου ψύξης θαλασσινού νερού (Smith, 2011), (Allal et al., 2017).

6.1.6 Επιπτώσεις – Αναδυόμενα κόστη συστήματος

Η μελέτη του συστήματος γίνεται με γνώμονα το ρίσκο και την ποσοτικοποίησή του, που προϋποθέτει την ανάλυση και παρουσίαση του κόστους που αναλαμβάνει ο ιδιοκτήτης του υπό μελέτη συστήματος σε περίπτωση συντήρησης, επισκευής και ολικής αστοχίας του. Οι επιπτώσεις της αστοχίας του συστήματος, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στην ανάλυση FMEA, οδηγούν σε πιθανό σταμάτημα της μηχανής, πλημμύρας του μηχανοστασίου ή και ακόμα φθοράς στα μηχανολογικά εξαρτήματα της κύριας μηχανής και των ηλεκτρομηχανών. Σημαντικό είναι σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως δεν θα γίνει αναφορά σε συνέπειες που έχουν να κάνουν με την μόλυνση του περιβάλλοντος ή την απώλεια ανθρώπινης ζωής καθώς οι αστοχίες αυτού του συστήματος δεν έχουν ως άμεσες συνέπειες τα παραπάνω.

Για την ποσοτικοποίηση του πραγματικού κόστους που έχουν οι διαφορετικές κατηγορίες που παρουσιάζονται στη συνέχεια, λαμβάνονται δεδομένα από ναυτιλιακή εταιρεία με εμπειρία εβδομήντα χρόνων στη ναυτιλία και στόλο είκοσι δεξαμενοπλοίων και εννέα υγραεριοφόρων πλοίων. Κατά την διάρκεια της άντλησης δεδομένων, τιμολογίων και διαδικασιών συντήρησης και επισκευών, υπήρξε ξεκάθαρος όρος για πλήρη εχεμύθεια και ταυτόχρονα όμως πλήρη πρόσβαση σε όλα της τα αρχεία για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Η βιβλιογραφία παρέχει περιορισμένα δεδομένα για τα κόστη λειτουργίας και επισκευών των συγκεκριμένων μηχανημάτων και για τον λόγο αυτό, θα δοθεί βάση στην εμπειρία των επαγγελματιών του χώρου

και κυριότερα, στα δεδομένα όπως τιμολόγια, αρχεία πληρωμών πληρωμάτων και των εγγραφών του PMS της εταιρείας. Επιπροσθέτως, για την επιβεβαίωση των ανταλλακτικών και της ποσότητας αυτών που αντικαθίστανται σε κάθε μία από τις παρακάτω περιπτώσεις, η επιβεβαίωση γίνεται μέσω των ειδικών με εμπειρία στην διαχείριση του στόλου των πλοίων της εταιρείας.

Τα κόστη τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την τελική μοντελοποίηση και παρουσίαση του ρίσκου του συστήματος, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στο παράρτημα II, και είναι τα εξής:

1. Κόστος επιθεώρησης και συντήρησης

Το κόστος συντήρησης συνοψίζει το κόστος των ανθρωποωρών που απαιτούνται κατά μέσο όρο για την επιθεώρηση και συντήρηση του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού καθώς και των οποιονδήποτε αναλώσιμων ή ακόμα και ανταλλακτικών που εγκαθίστανται κατά τη συντήρηση του συστήματος.

Το μέσο κόστος επιθεώρησης και συντήρησης ανέρχεται στα: **4145 USD**

2. Κόστος επισκευών

Το κόστος επισκευών περιέχει όλα τα κόστη που μπορεί να προκύψουν από την αχρήστευση του υπάρχοντος εξοπλισμού/εξαρτημάτων, ο οποίος θα πρέπει να αντικατασταθεί ώστε να συνεχίσει να λειτουργεί με το κατά το δυνατόν λιγότερη πιθανότητα αστοχίας το σύστημα ψύξης. Τα κόστη αυτά προκύπτουν από δεδομένα που αντλούνται από το PMS της ναυτιλιακής, μέσα στο οποίο καταγράφονται τα ανταλλακτικά καθώς και η συχνότητα με την οποία αυτά αντικαθίστανται πάνω στο πλοίο. Σε αυτά εντάσσονται η αξία των ανθρωποωρών που απαιτούνται για την αντικατάσταση του ελλαπτωματικού εξοπλισμού, αλλά και τα κόστη εξαρτημάτων που πάντα συχνά φέρουν φθορές που είναι πιθανό να προκαλέσουν την αστοχία του συστήματος ή την αύξηση της πιθανότητας αστοχίας του αντιστοίχως.

Το μέσο κόστος επισκευών ανέρχεται στα: **13858 USD**

3. Κόστος αστοχιών

Το κόστος αστοχιών αντικατοπτρίζει το πιθανό κόστος που θα χρειαστεί να αναλάβει η εταιρεία στην επιδιόρθωση και επισκευή του συστήματος ψύξης και των επηρεαζόμενων μηχανολογικών συστημάτων, όπως οι φθορές που μπορεί να προκληθούν στην κύρια μηχανή, και θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει και το μέσο κόστος που αναλαμβάνει σε περίπτωση μη συμμόρφωσης με τους όρους του συμβολαίου με τους ναυλωτές της (off-hire), μιας και σε περίπτωση αστοχίας του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού, δεν είναι δυνατό να υπάρξει για πάνω από λίγη ώρα λειτουργική προωστήρια εγκατάσταση πάνω στο πλοίο. Είναι κατανοητό, πως η αστοχία μπορεί να επιλύεται εντός λίγων ωρών ή μετά από πολλές ημέρες.

Μέσω της εμπειρίας των ειδικών προκύπτει ένας ελάχιστος χρόνος off-hire σε περίπτωση καταστρεπτικής βλάβης του συστήματος περίπου στις 1-2 ώρες και μέγιστος χρόνος έως και βδομάδες σε περίπτωση πρόκλησης ζημιάς στα κύρια συστήματα του πλοίου. Μελετώντας ιστορικά τα προβλήματα που έχει προκαλέσει η αστοχία του δικτύου ψύξης θαλασσινού νερού(κεφ. 5.2.5) γίνεται παραδοχή του μέσου χρόνου off-hire και του εύρους του κόστους της

οικονομικής ζημιάς που μπορεί να έχει μία επιχείρηση λόγω αστοχίας του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.

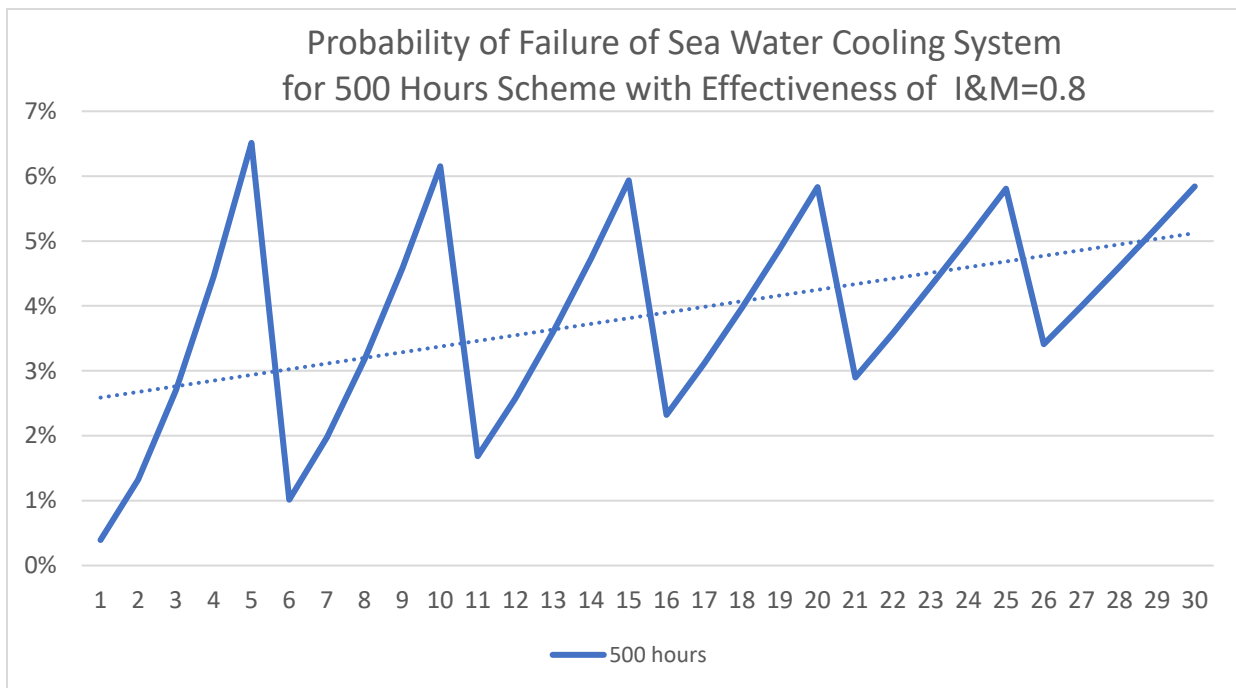
Μία ασφαλής υπόθεση σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή βλάβης του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού, είναι πως ένα μέσο χρονικό πλαίσιο off-hire, είναι 12 ώρες εκτός εκμετάλλευσης από τους ναυλωτές όπου σε συνδυασμό με πιθανά κόστη αντικατάστασης ή επισκευής εξοπλισμού προκύπτει πως το μέσο κόστος περιστατικού ολικής αστοχίας συστήματος ανέρχεται στα: **25000 USD**

7. Αποτελέσματα

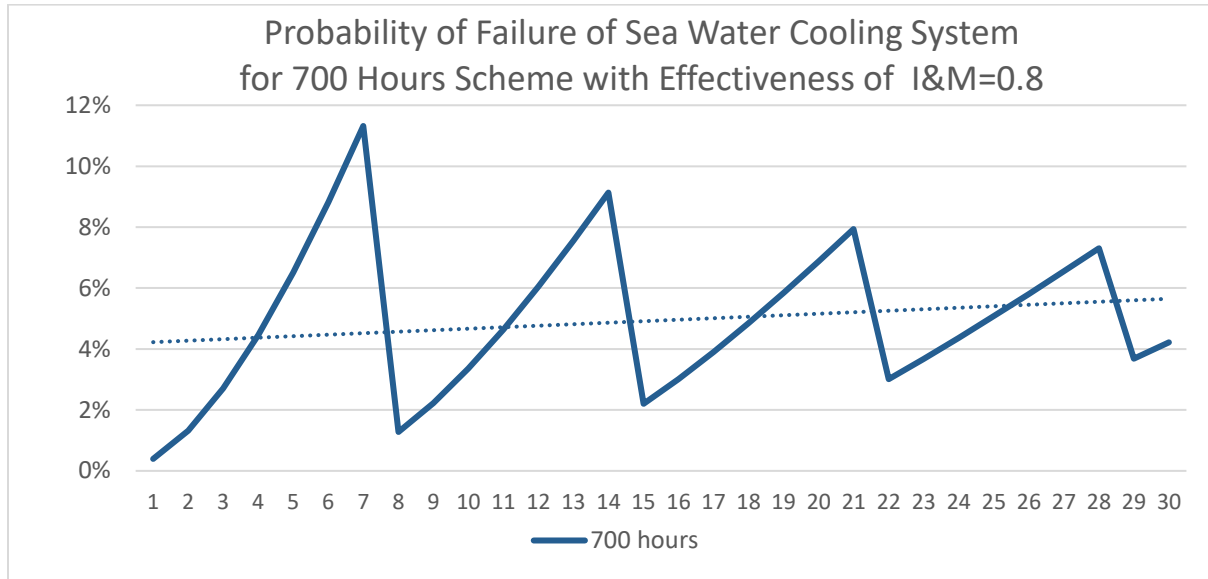
7.1 Πιθανότητα Αστοχίας Συστήματος

Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα του μοντέλου ως προς την πιθανότητα αστοχίας που φέρει το σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού, άρα της μεταγενέστερης πιθανότητας που αυτό φέρει αναλόγως των δέκα διαφορετικών χρονικών πλαισίων επιθεώρησης και συντήρησης (Inspection and Maintenance – I&M). Ταυτόχρονα, μέσω της μελέτης του συστήματος υπό καθεστώς αβεβαιότητας, εκτελείται περαιτέρω μελέτη μέσω του υπολογισμού των παραπάνω ως προς την αποτελεσματικότητα της επιθεώρησης και συντήρησης που έγινε στο σύστημα σε κάθε χρονικό πλαίσιο I&M.

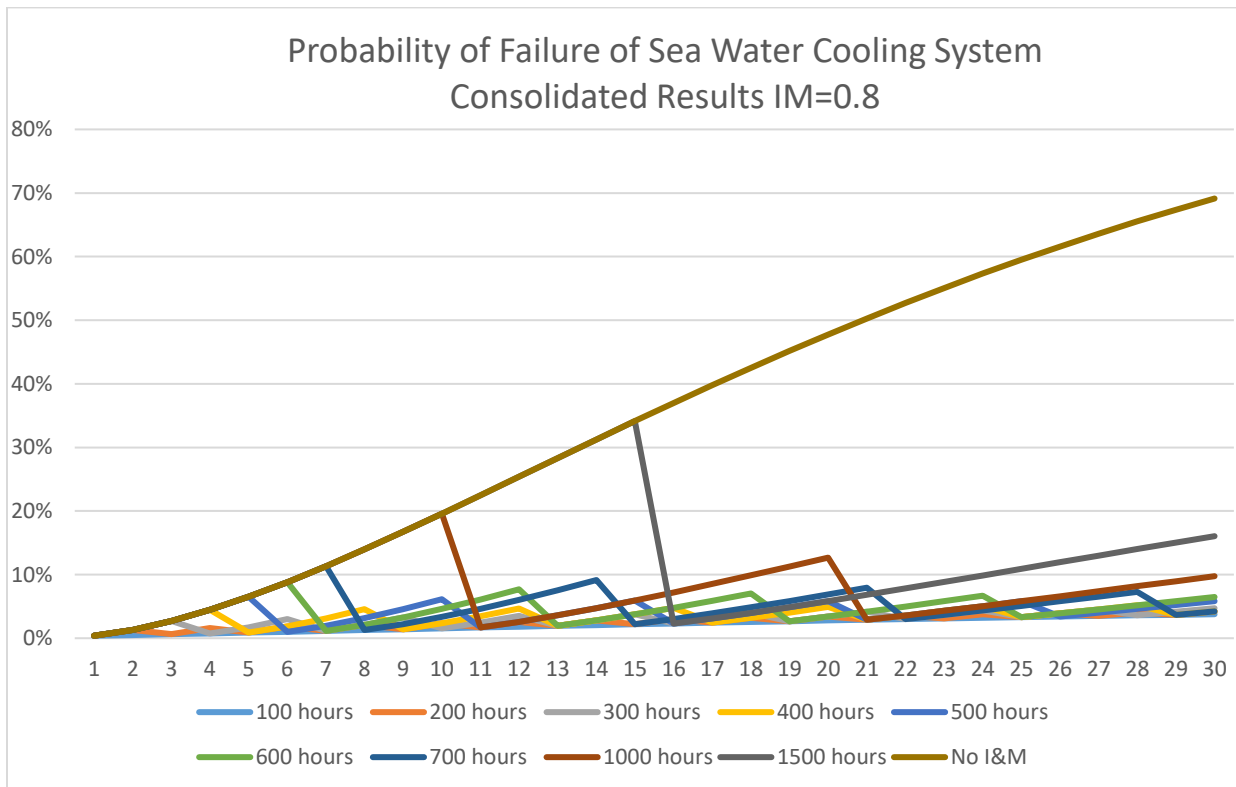
Αρχικά παρουσιάζεται η πιθανότητα αστοχίας που φέρει το σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού υπό το πλάνο I&M των 500 και 700 ωρών για την πιο εύληπτη κατανόηση του φαινομένου. Επίσης παρουσιάζεται η ανοδική τάση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος μέσω της χάραξης της καμπύλης τάσης της συνάρτησης της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα για όλες τα πλάνα I&M υπό βαθμό αποτελεσματικότητας της 0.8.



(α)



(β)



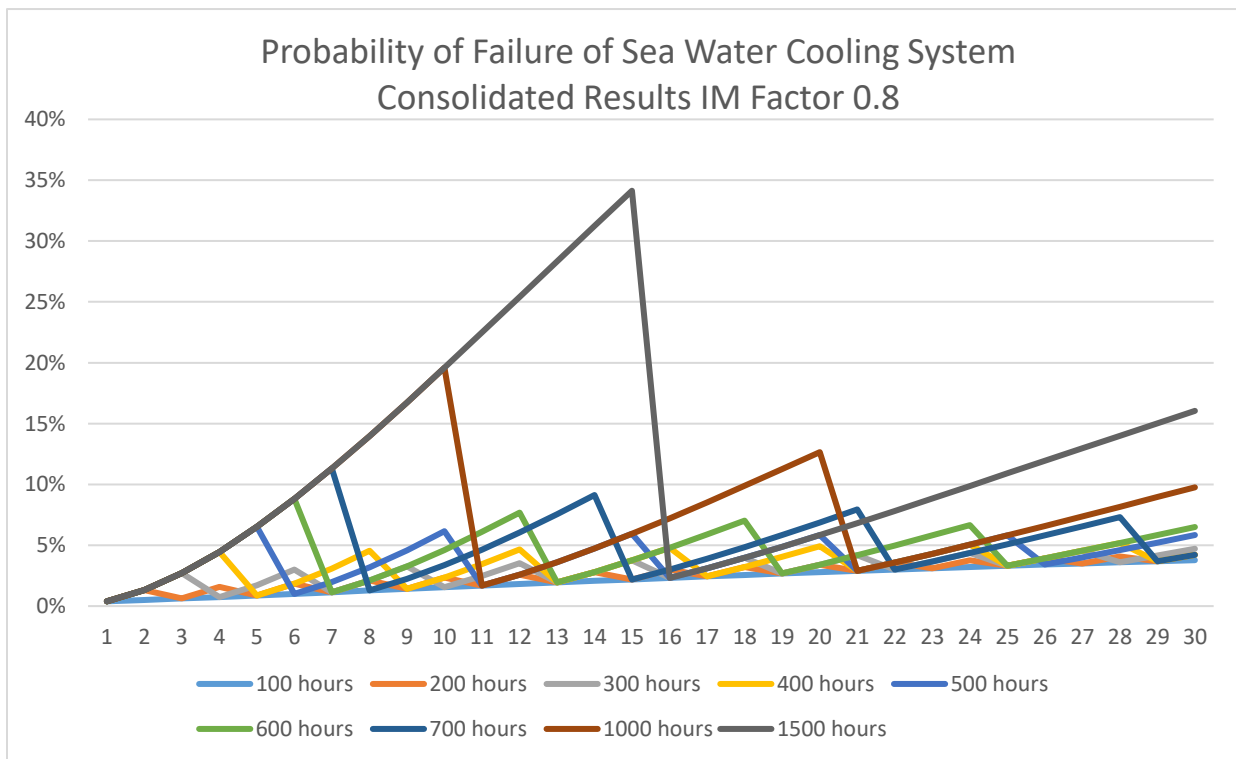
(γ)

Σχήμα 7.1 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας I&M 0.8 για πλάνο I&M (α) 500 ωρών (β) 700 ωρών και (γ) συγκεντρωτικό για όλα τα πλάνα I&M

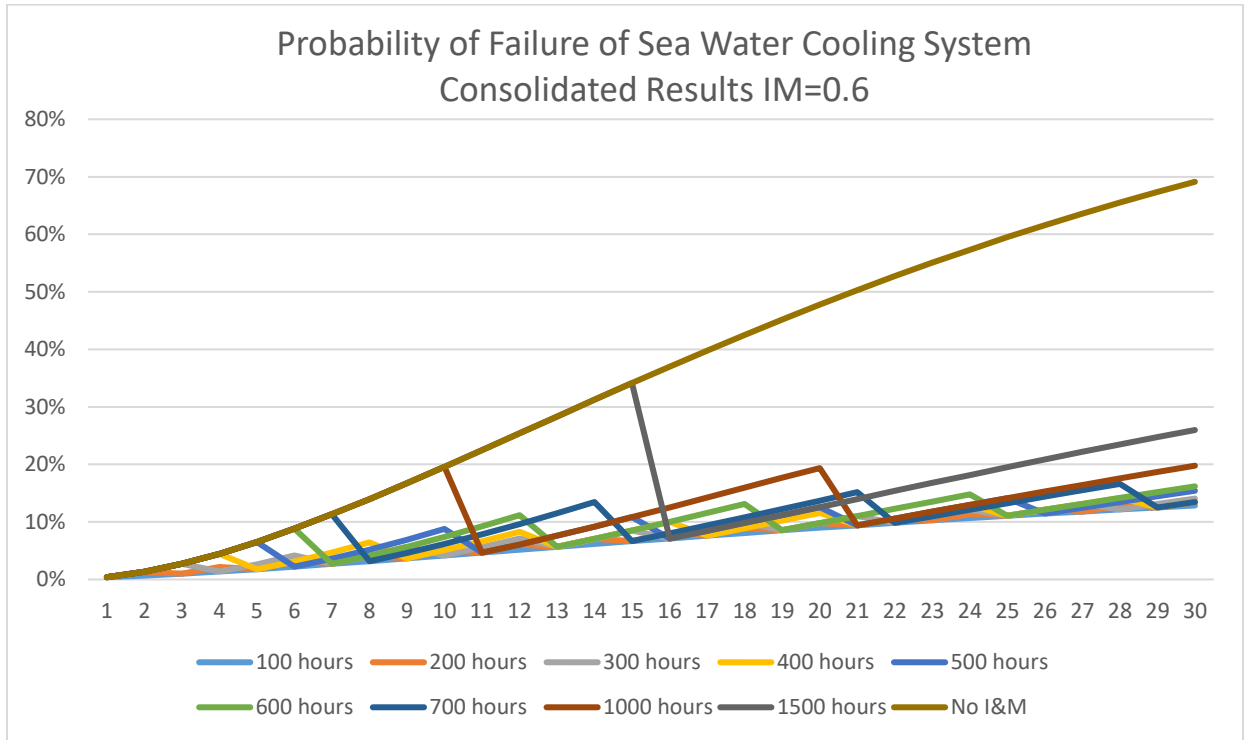
Πίνακας 7.1 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας της Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.8

Average Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.8				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
2,2%	2,5%	2,9%	3,3%	3,9%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
4,4%	4,9%	7,2%	12,1%	34,7%
Max Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.8				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
3,8%	4,2%	4,7%	5,2%	6,5%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
8,8%	11,3%	19,6%	34,1%	69,1%

Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται γράφημα πιθανότητας αστοχίας του συστήματος που δεν συμπεριλαμβάνει τα αποτελέσματα του πλαισίου **Καθόλου επιθεώρηση και συντήρηση – No I&M** για την πιο ευδιάκριτη ανάγνωση του διαγράμματος.



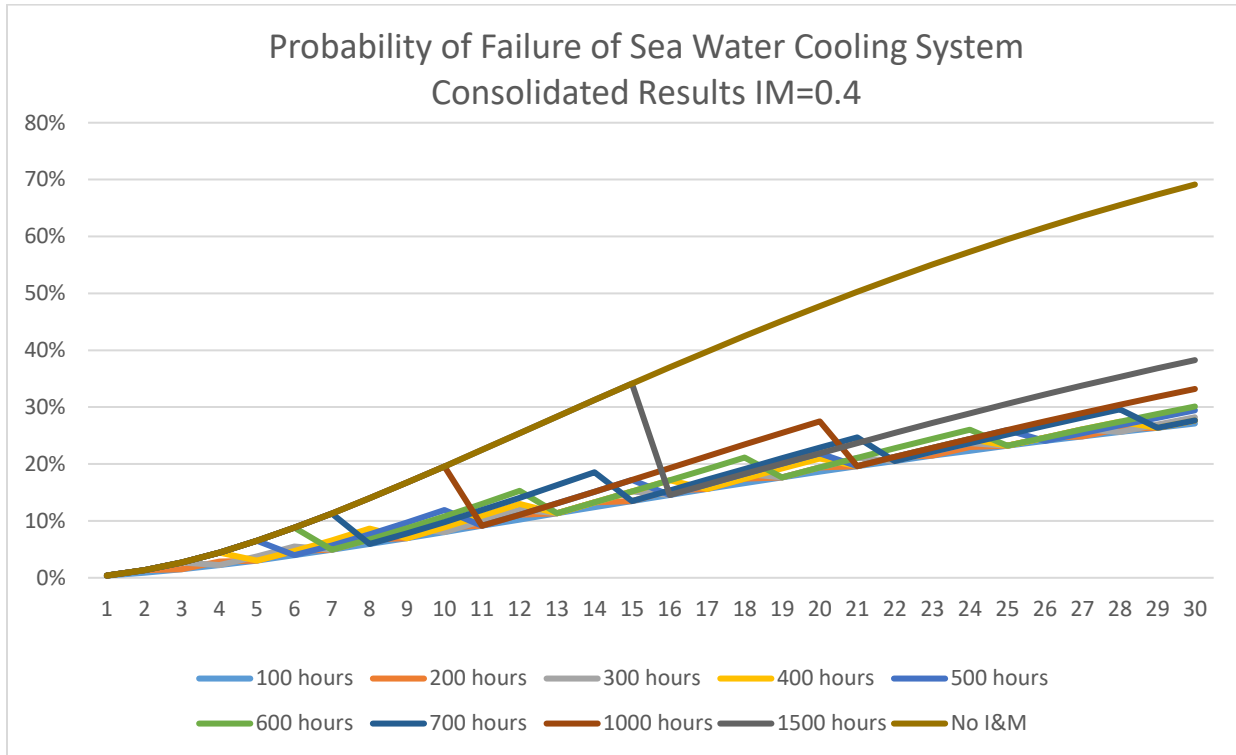
Σχήμα 7.2 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.8



Σχήμα 7.3 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας I&M 0.6

Πίνακας 7.2 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας I&M 0.6

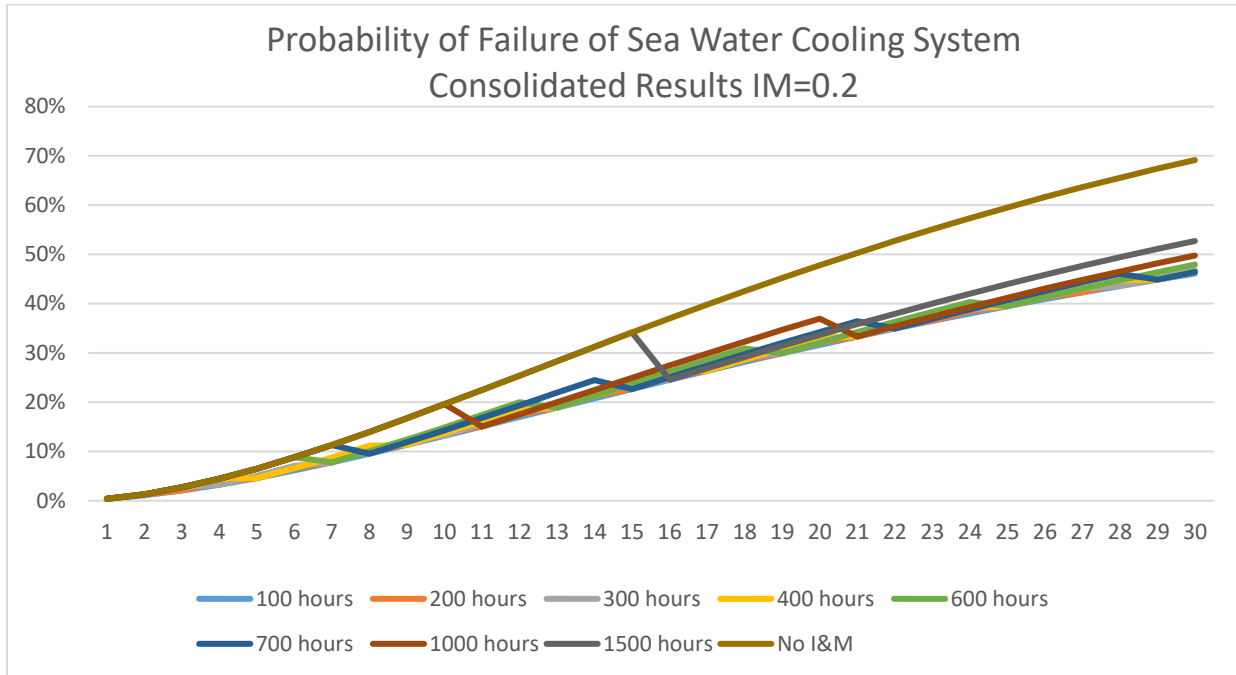
Average Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.6				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
6,7%	7,1%	7,6%	8,0%	8,5%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
9,1%	9,6%	11,7%	15,9%	34,7%
Max Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.6				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
12,9%	13,4%	14,1%	14,2%	15,4%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
16,2%	16,6%	19,8%	34,1%	69,1%



Σχήμα 7.4 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.4

Πίνακας 7.3 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας της Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.4

Average Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.4				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
13,8%	14,1%	14,5%	14,8%	15,3%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
15,7%	16,1%	17,8%	21,0%	34,7%
Max Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.4				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
27,1%	27,7%	28,2%	27,7%	29,4%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
30,1%	29,6%	33,2%	38,3%	69,1%



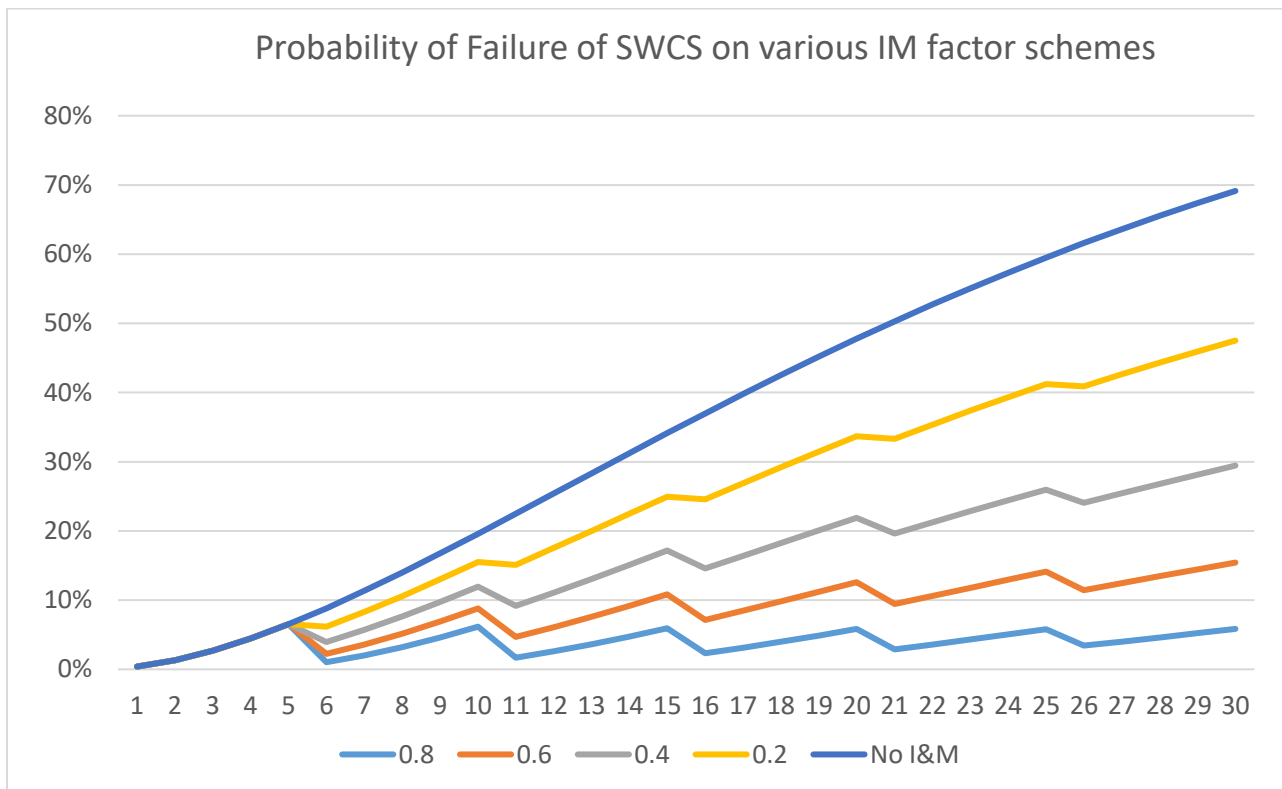
Σχήμα 7.5 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης με βαθμό αποτελεσματικότητας Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.2

Πίνακας 7.4 Πιθανότητα αστοχίας κατά μέσο όρο, και μέγιστη τιμή της μετά από 3000 ώρες λειτουργίας, με βαθμό αποτελεσματικότητας της Συντήρησης και Επιθεώρησης 0.2

Average Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.2				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
23,1%	23,4%	23,6%	23,8%	24,1%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
24,3%	24,6%	25,5%	27,3%	34,7%
Max Probability of Failure - Consolidated RBI Schemes Results - IM 0.2				
100 hours	200 hours	300 hours	400 hours	500 hours
46,1%	46,4%	46,8%	46,4%	47,5%
600 hours	700 hours	1000 hours	1500 hours	No I&M
47,9%	46,4%	49,8%	52,7%	69,1%

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται με τη μελέτη των παραπάνω συγκεντρωτικών σχημάτων και πινάκων, είναι πως όσο **ποιοτικότερη** είναι η **συντήρηση**, τόσο τείνουν οι καμπύλες πιθανοτήτων αστοχίας κάθε χρονικού πλαισίου να **απομακρύνονται** από την καμπύλη της **καθόλου επιθεώρησης και συντήρησης**. Αυτό είναι λογικό μιας και η αποδοτικότερη επίβλεψη του συστήματος, οδηγεί σε μικρότερη πιθανότητα αστοχίας του.

Επίσης, φαίνεται πως οι **αυξομειώσεις** και οι διαφορές των τιμών μεταξύ της πιθανότητας αστοχίας διαφορετικών χρονικών πλαισίων επιθεώρησης και συντήρησης, **είναι μικρότερες** και άρα δεν υπάρχουν σημαντικές επιπτώσεις στην πιθανότητα αστοχίας του συστήματος είτε επιλεγεί ένα πιο συχνό πλαίσιο έναντι ενός πλαισίου μεγαλύτερου διαστήματος επιθεωρήσεων. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως όσο **ποιοτικότερη είναι η συντήρηση** του εξοπλισμού, τόσο περισσότερο θα έχει και **νόημα η μελέτη και έρευνα της αποτελεσματικότερης προσέγγισης πλάνου επιθεωρήσεων και συντηρήσεων με βάση το ρίσκο**. Αποτελεί λογικό συμπέρασμα αν αναλογιστεί κανείς ποια θα ήταν η διαφορά εάν κάποιος έκανε μία ή δέκα επιθεωρήσεις του εξοπλισμού εφόσον δεν είχε σχεδόν καθόλου γνώσεις πάνω σε αυτόν ή δεν μπορούσε να τις εκτελέσει καθόλου αποδοτικά για οποιοδήποτε λόγο.

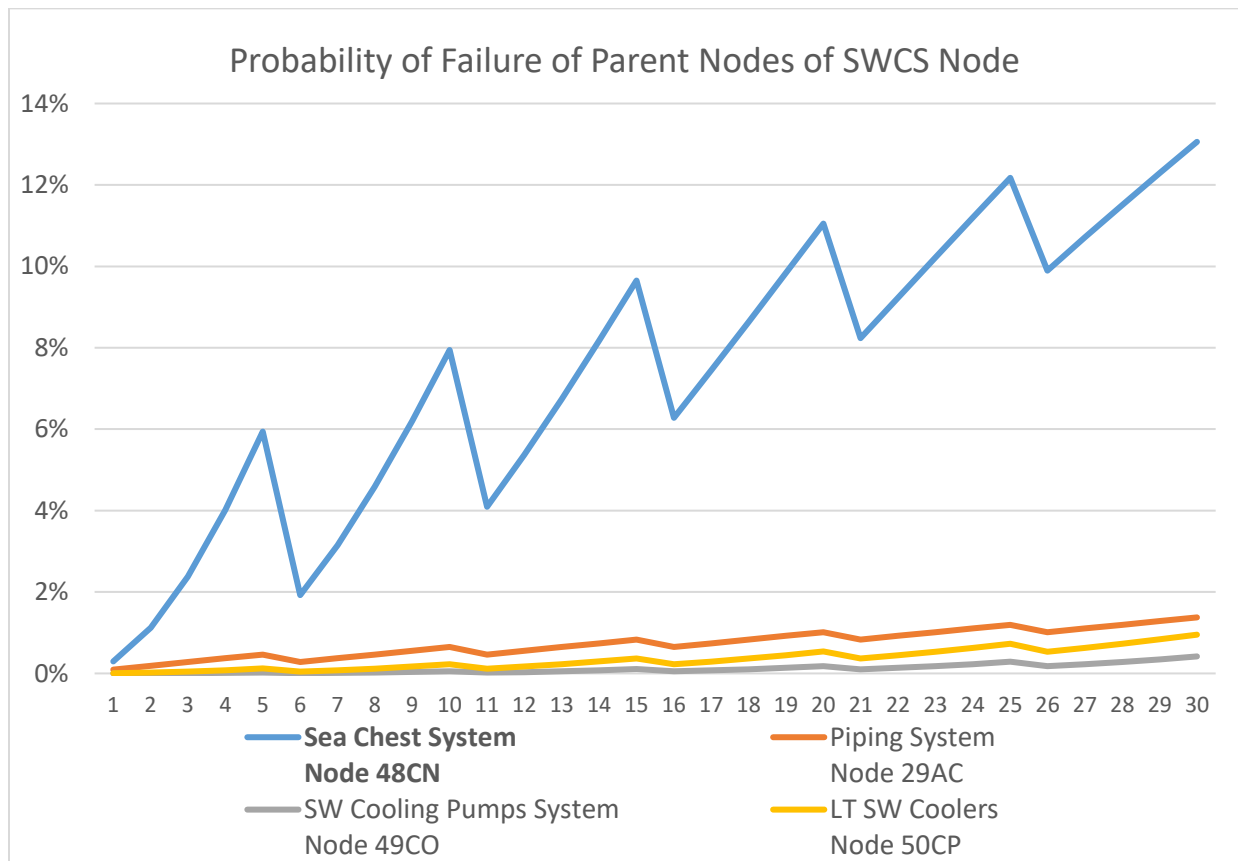


Σχήμα 7.6 Πιθανότητα αστοχίας Συστήματος Ψύξης για το Πλάνο Επιθεώρησης και συντήρησης των 500 ωρών υπό διαφορετικού βαθμούς αποτελεσματικότητας I&M

Εύλογο θα ήταν σε αυτό το σημείο να παρατηρηθεί η σχέση ίδιων χρονικά πλάνων μεταξύ διαφορετικών προσεγγίσεων ως προς την απόδοση της επιθεώρησης και συντήρησης. Σημειώνεται **επιδείνωση του ρυθμού αύξησης της πιθανότητας αστοχίας** του συστήματος σε περίπτωση που η **συντήρησή του δεν είναι ικανοποιητική**. Αυτό είναι σύμφωνο με την πραγματικότητα καθώς σε περίπτωση που επανειλημμένα πραγματοποιούνται χείριστης ποιότητας συντηρήσεις, προβλέπεται η γοργή φθορά του εξοπλισμού, του οποίου τείνει η πιθανότητα αστοχίας να πάρει την κλίση της καμπύλης της μη επιθεώρησης και συντήρησης όπως αυτή διαφαίνεται επίσης στο παραπάνω Σχήμα 7.6. Σε αντίθεση, η καμπύλη της αποτελεσματικότερης επιθεώρησης, παρά την αύξηση των τιμών της, τείνει να ομαλοποιηθεί και να κινείται σε χαμηλά ποσοστά της τάξης του 5%, κάτι που είναι ρεαλιστικό μιας και μετά από

συνεχόμενες συντηρήσεις που ανανεώνουν τον εξοπλισμό και τον επαναφέρουν σε καλή κατάσταση, όπως ήταν στα αρχικά στάδια της λειτουργίας του, η πιθανότητα αστοχίας δεν θα αυξάνεται περισσότερο ή το ίδιο σε σχέση με αντίστοιχες χρονικά αλλά κατώτερες ποιοτικά συντηρήσεις.

Η βαθιά κατανόηση της λειτουργίας ενός συστήματος και της αποκάλυψης των ευπαθών σημείων του, προϋποθέτει την **κατανόηση** πρωτίστως των **σχέσεων και τον αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφορετικών υποσυστημάτων του καθώς και τη βαρύτητα της λειτουργίας που έχει το καθένα ως προς το σύνολο αλλά και ως προς τα υπόλοιπα υποσυστήματα του μοντέλου**. Σε συνέχεια αυτής της σκέψης, η ανάλυση μπορεί να περάσει στις σχέσεις μεταξύ των βασικών εξαρτημάτων του εξοπλισμού. Με αυτές τις τεχνικές μπορούν να προβλεφθούν ποια θα είναι τα πιο κρίσιμα ανταλλακτικά που θα πρέπει να έχει πάνω το πλοίο και ταυτόχρονα με τη μελέτη της πιθανότητας αστοχίας του εξοπλισμού στην πάροδο του χρόνου να σχηματιστεί ικανοποιητικό ως προς το αποδεκτό ρίσκο πλάνο επιθεώρησης και συντήρησής του. Ενδεικτικά, ακολουθούν σχήματα για τη μελέτη και ανάδειξη αυτών των σχέσεων, μεταξύ των υποσυστημάτων του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού για βαθμό αποτελεσματικότητας της συντήρησης 0.6.

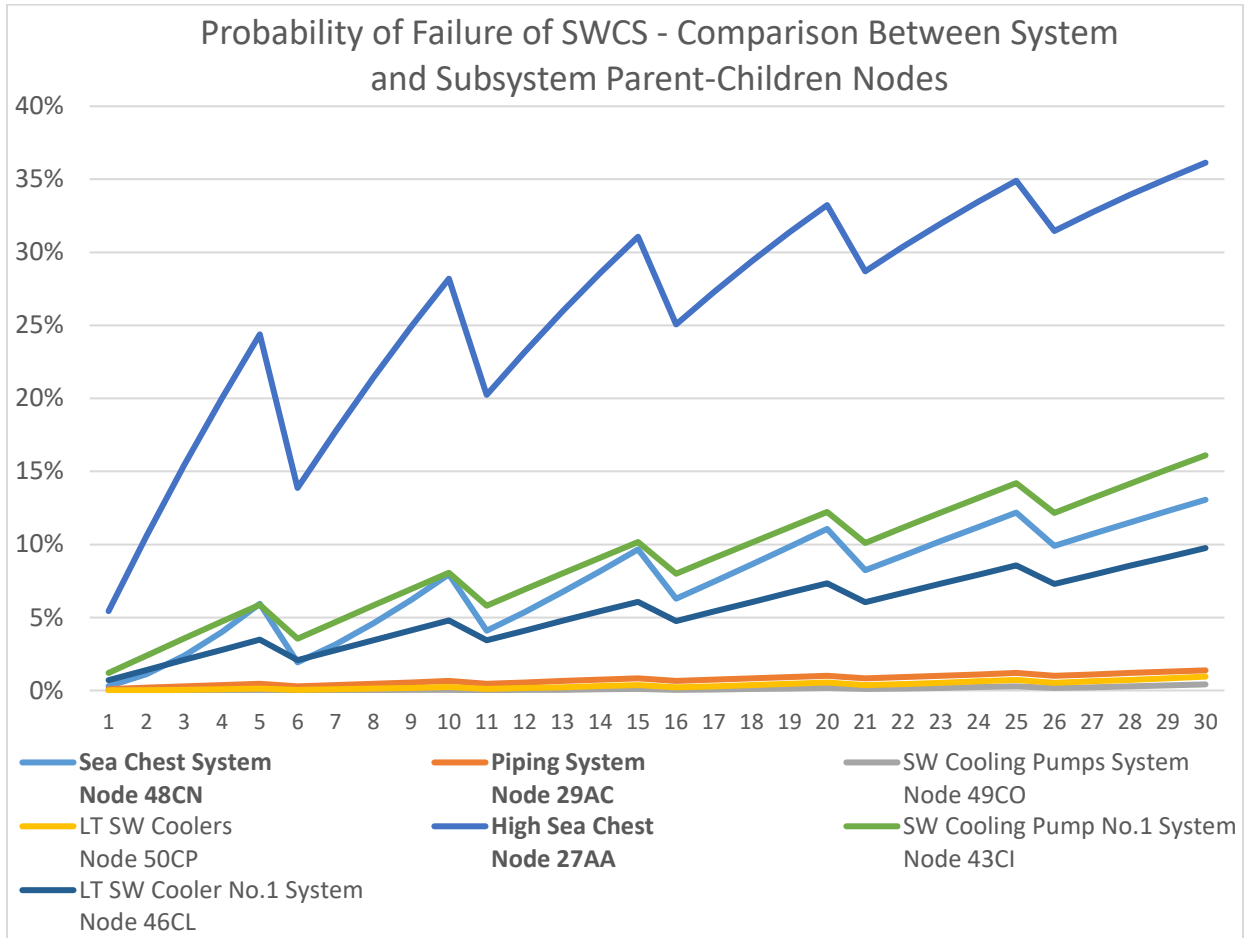


Σχήμα 7.7 Πιθανότητα αστοχίας κόμβων Γονέων του κόμβου SWCS (Leaf Node)

Συμπεραίνεται, πως από τα υποσυστήματα που έχουν άμεση σχέση με πιθανή αστοχία του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού, εκείνο που **παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας είναι το σύστημα αναρροφήσεων θαλάσσης**. Μάλιστα, είναι προφανές πως τη

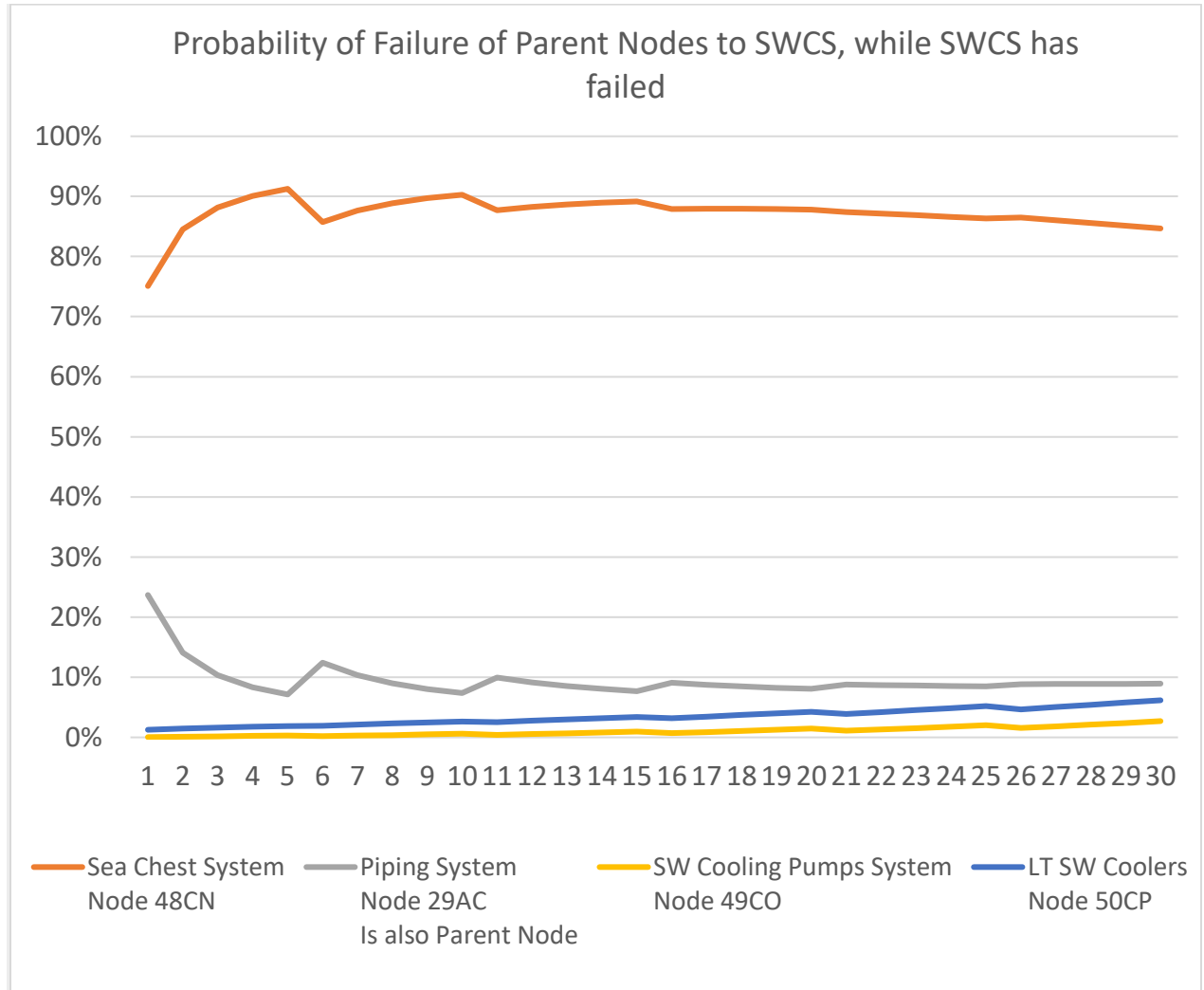
μεγαλύτερη βαρύτητα στην εύρυθμη λειτουργία του συστήματος ψύξης έχει αυτό το υποσύστημα. Η σημαντικότητα των αναρροφήσεων και της σωστής λειτουργίας τους είναι και στην πραγματικότητα αποδεκτό πως αποτελεί τον πρωταρχικό κίνδυνο του υπό μελέτη συστήματος (Allal et al., 2017), (Ceylan et al., 2022). Σύμφωνα με τους ειδικούς, οι κινήσεις των πλοίων σε περιοχές με πάγους ή πληθώρα μικροοργανισμών και ρύπων, που δεν προβλέπονται στο παρόν μοντέλο, αποτελούν ένα αβέβαιο γεγονός που ωστόσο πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει το πλήρωμα στην εκτεταμένη ασχολία και συντήρηση του συγκεκριμένου υποσυστήματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα ή και ακόμα να προκαλέσει τις επιπλοκές στην πρόωση του πλοίου λόγω των προαναφερθέντων αιτιών.

Επίσης, από το ίδιο διάγραμμα συμπεραίνεται πως **οι σωληνώσεις αποτελούν το δεύτερο κατά σειρά πιο επικίνδυνο στοιχείο** του υπό μελέτη συστήματος παρά τον αρκετά χαμηλότερο ρυθμό αστοχίας που αυτό φέρει σε σχέση με **μία** αντλία ή **έναν** εναλλάκτη θερμότητας του επιλεχθέντος συστήματος. Αυτό συμβαίνει γιατί η αστοχία της μίας εκ των τριών αντλιών ή αντίστοιχα η αστοχία του ενός από τους δύο εναλλάκτες θερμότητας, δεν θα έχουν ως αποτέλεσμα την αστοχία συνολικά της λειτουργίας του συστήματος ψύξης καθώς υπάρχουν **μονάδες εν αναμονή** να αντικαταστήσουν τον προβληματικό εξοπλισμό. **Αποδεικνύεται έτσι η σημαντικότητα των πολλαπλών μονάδων και η αποτελεσματικότητά τους προς τη διαχείριση ρίσκου σε κρίσιμα συστήματα μίας μηχανολογικής εγκατάστασης.** Από το Σχήμα 7.8 γίνεται προφανής η επίπτωση της λειτουργίας πολλαπλών μονάδων προς την ελάττωση της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος καθώς η πιθανότητα αστοχίας που φέρουν η μία εκ των υπολοίπων αναρρόφηση θαλάσσης, αντλία και εναλλάκτης θερμότητας, είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα αστοχίας που φέρει το υποσύστημα των δύο αναρροφήσεων, των τριών αντλιών και των δύο εναλλακτών, ως σύνολα. Υπενθυμίζεται πως στο Σχήμα 7.7 η πιθανότητας αστοχίας της σωλήνωσης ήταν μεγαλύτερη από την πιθανότητας αστοχίας του συστήματος των αντλιών και των εναλλακτών θερμότητας ενώ από κάτω φαίνεται η διαφορά τάξεων μεγέθους σε σχέση με την πιθανότητα αστοχίας που φέρει το κάθε υποσύστημα του συστήματος αντλιών και εναλλακτών.



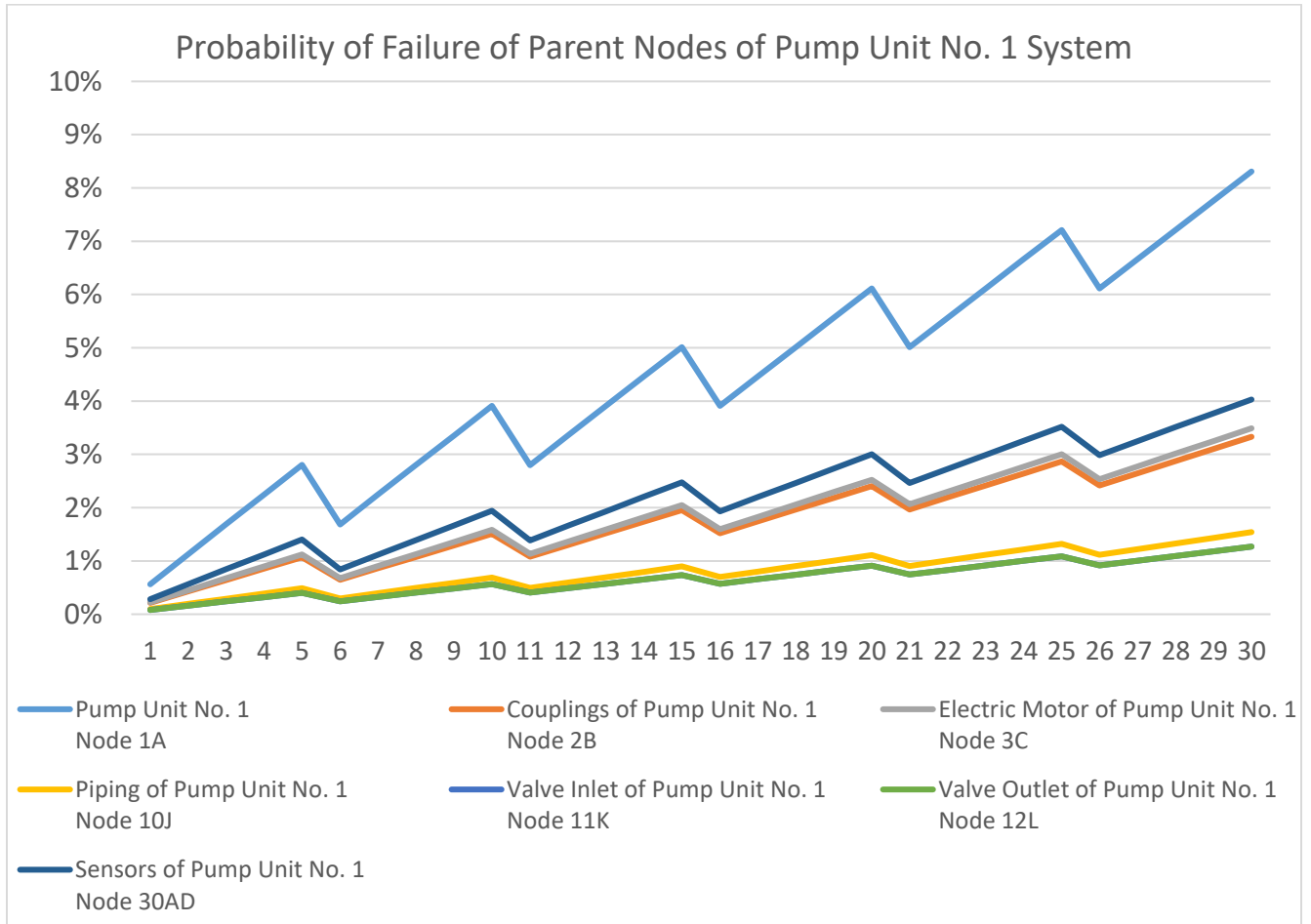
Σχήμα 7.8 Πιθανότητα αστοχίας Γονέων και Παιδιών Υποσυστημάτων-Συστημάτων Αντλιών-Εναλλακτών-Αναρροφήσεων-Σωληνώσεων Συστήματος

Τα παραπάνω αποτελέσματα προέκυψαν μέσω υπολογισμών χωρίς ενδείξεις για την κατάσταση κάποιου κόμβου του DBN. Μία ιδιότητα του μοντέλου υπολογισμού που αναπτύχθηκε, είναι ο υπολογισμός των πιθανοτήτων αστοχίας κόμβων του συστήματος βάση ενδείξεων σε οποιοδήποτε άλλο κόμβο του. Στο Σχήμα 7.9, μελετάται η κατάσταση των κόμβων του συστήματος σε περίπτωση που είναι βέβαιο πως το σύστημα ψύξης έχει αστοχήσει. Καθ' αυτό τον τρόπο, θα γίνει ξεκάθαρη η αιτιατή σχέση κάθε υποσυστήματος με την πιθανή αστοχία του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού.



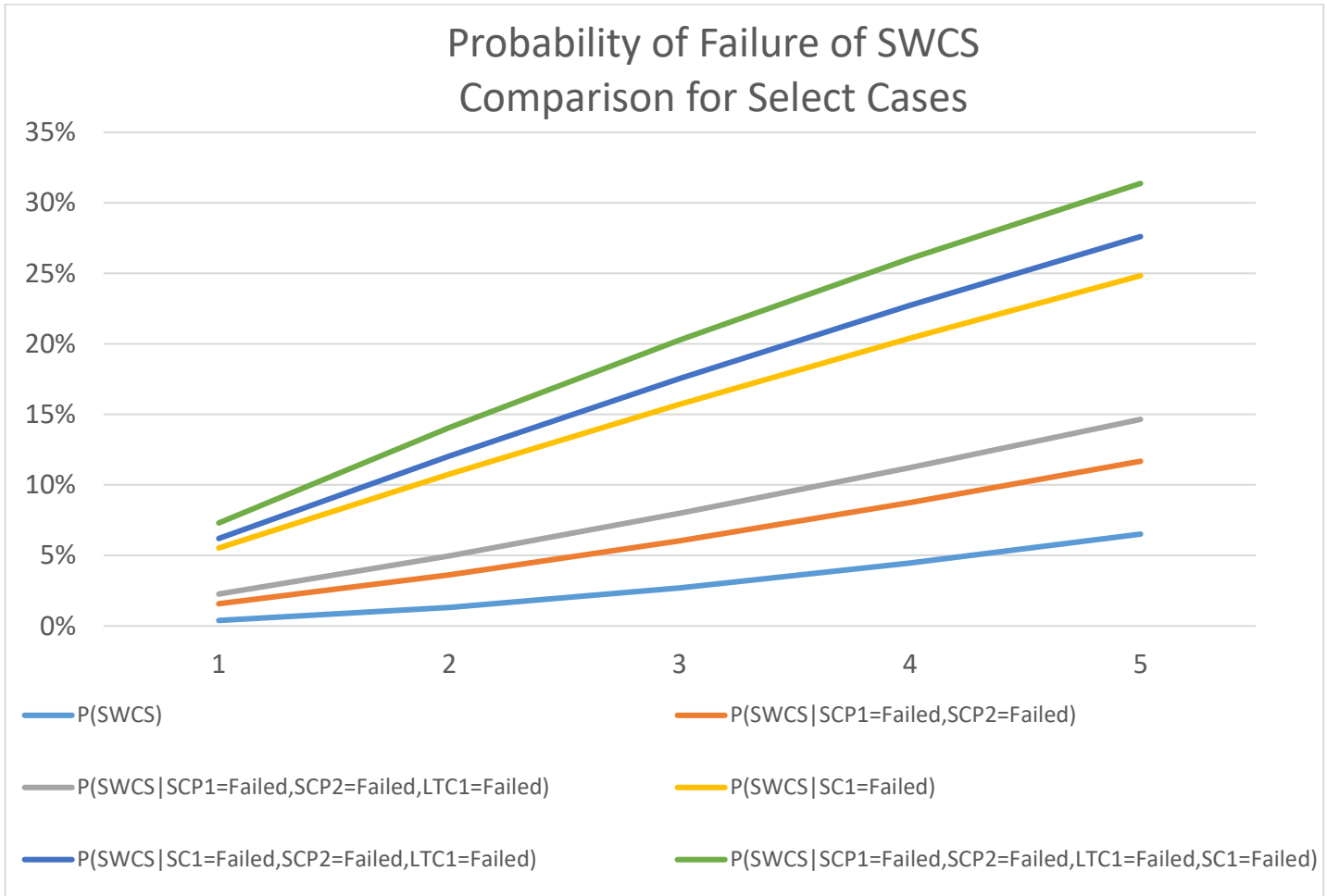
Σχήμα 7.9 Πιθανότητα αστοχίας Γονέων υπό την ένδειξη αστοχίας του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού

Κατά παρόμοιο τρόπο και προσέγγιση, γίνεται μελέτη του εξοπλισμού της αντλίας και της πιθανότητας αστοχίας που αυτός ενέχει στο Σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.10 Πιθανότητα αστοχίας εξαρτημάτων αντλίας υπό την ένδειξη αστοχίας του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 7.9, η αστοχία του συστήματος ψύξης σημαίνει πως είναι πιο πιθανό να είναι απόρροια της αστοχίας του συστήματος αναρροφήσεων θαλάσσης. Γίνεται κατανοητός λοιπόν ο **τρόπος προσέγγισης πιθανών αιτιών** σε περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας του εναλλάκτη γλυκού νερού. **Πρώτα** θα πρέπει άμεσα να ελεγχθεί η κατάσταση των αναρροφήσεων καθώς σε περίπτωση που υπάρχει αστοχία είναι πιθανότερο να υπάρχει σε αυτές και **στη συνέχεια**, σε πολύ μικρότερο ποσοστό, στις σωληνώσεις του δικτύου, μετά στους εναλλάκτες και τέλος στις αντλίες θαλασσινού νερού.



Σχήμα 7.11 Πιθανότητα αστοχίας συστήματος ψύξης υπό διαφορετικές περιπτώσεις ενδείξεων αστοχίας των υπολοίπων κόμβων του συστήματος

Μέσω του Σχήμα 7.11 γίνεται ακόμα πιο εμφανής η βαρύτητα του κάθε εξοπλισμού στο υπό μελέτη σύστημα. Μελετάται η πιθανότητα αστοχίας του δικτύου ψύξεως υπό διαφορετικές περιπτώσεις αστοχίας υποσυστημάτων του. Η μελέτη εκτελείται για τις πρώτες 500 ώρες λειτουργίας του δικτύου, έως την πρώτη επιθεώρηση του συστήματος από το πλήρωμα όπου και θα αναγνωρισθεί ο εκάστοτε ελαττωματικός εξοπλισμός του. Σε περίπτωση αστοχίας της **μίας αναρρόφησης**, η πιθανότητα αστοχίας του συστήματος ψύξης είναι πολύ μεγαλύτερη απ' ό,τι εάν είχαν αστοχήσει **ταυτόχρονα δύο αντλίες θαλάσσης και ένας εναλλάκτης θερμότητας**. Επίσης, σε περίπτωση αστοχίας της μίας αναρρόφησης, μίας αντλίας και ενός εναλλάκτη ταυτόχρονα, παρατηρείται να μην υπάρχει σημαντική μεταβολή της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος ψύξης σε σχέση με την περίπτωση αστοχίας μόνο μίας αναρρόφησης χωρίς την ταυτόχρονη αστοχία άλλων υποσυστημάτων. Ενδεικτικά ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις στον Πίνακα 7.5.

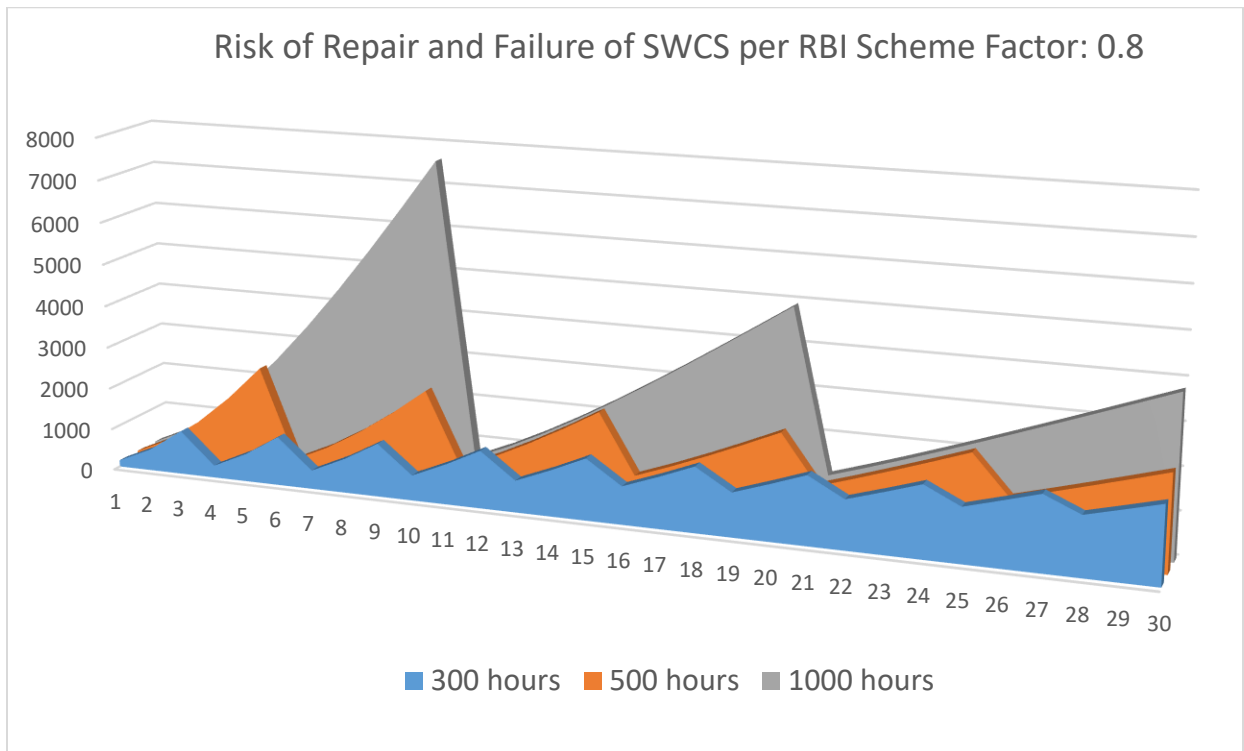
Πίνακας 7.5 Πιθανότητα αστοχίας συστήματος ψύξης υπό διαφορετικές περιπτώσεις ενδείξεων αστοχίας των υπολοίπων κόμβων του συστήματος

Time Steps (per 100 hours)	P(SWCS) No Evidence	P(SWCS SCP1=Failed, SCP2=Failed)	P(SWCS SCP1=Failed, SCP2=Failed, LTC1=Failed)	P(SWCS SC1=Failed)	P(SWCS SC1=Failed, SCP2=Failed, LTC1=Failed)	P(SWCS SCP1=Failed, SCP2=Failed, LTC1=Failed, SC1=Failed)
<i>1</i>	0%	2%	2%	6%	6%	7%
<i>2</i>	1%	4%	5%	11%	12%	14%
<i>3</i>	3%	6%	8%	16%	18%	20%
<i>4</i>	4%	9%	11%	20%	23%	26%
<i>5</i>	7%	12%	15%	25%	28%	31%
Mean	3,1%	6,3%	8,2%	15,4%	17,2%	19,8%
Max	6,5%	11,7%	14,6%	24,8%	27,6%	31,4%

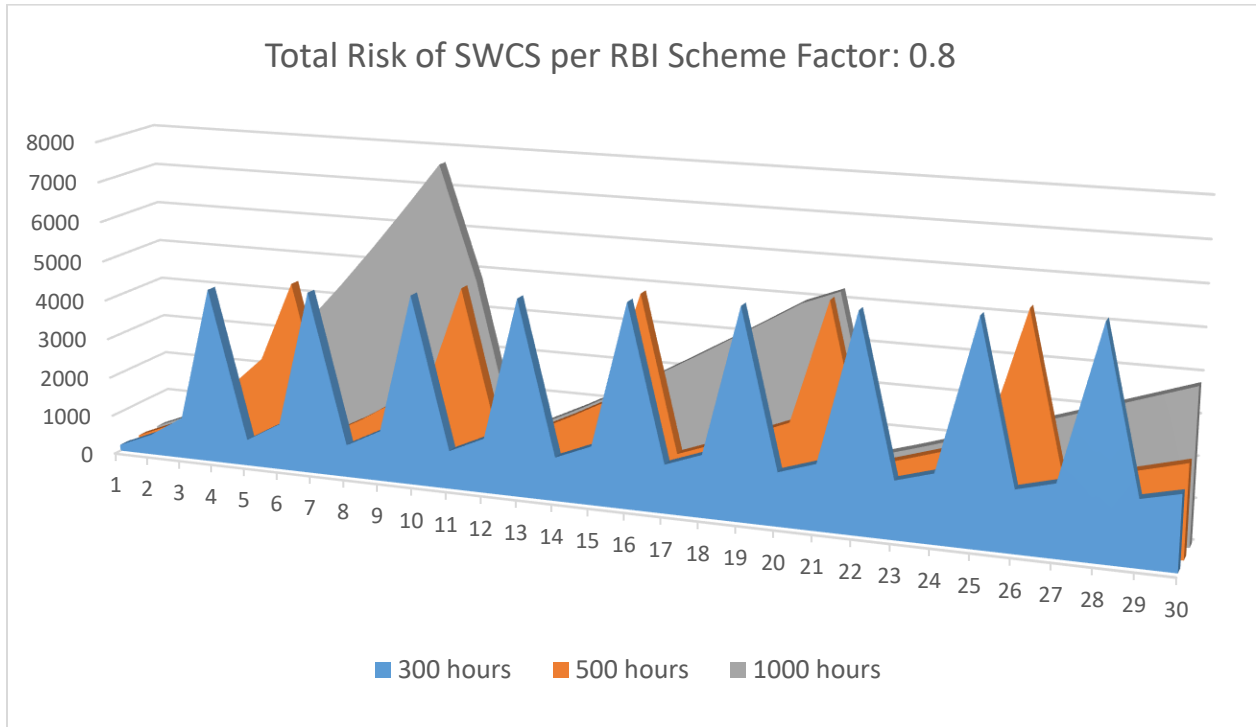
7.2 Ανάλυση Ρίσκου Συστήματος

Με την ολοκλήρωση της μελέτης της πιθανότητας αστοχίας του συστήματος για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς επιθεώρησης και συντήρησης, το ρίσκο θα υπολογιστεί και θα αποτιμηθεί ποια προσέγγιση RBI είναι η πιο αποδοτική σε βάθος χρόνου για κάθε βαθμό αποτελεσματικότητας της επιθεώρησης και συντήρησης του εξοπλισμού. Το ρίσκο αποτυπώνεται και μετριέται στα παρακάτω αποτελέσματα σε αμερικανικά δολάρια.

Για την κατανόηση της πορείας του ρίσκου κατά την πάροδο του χρόνου γίνεται αποτύπωση του ρίσκου που ενέχουν τρεις περιπτώσεις προσέγγισης RBI στο υπό μελέτη σύστημα. Ωστόσο στο Σχήμα 7.12(α), αποτυπώνεται μόνο το **ρίσκο που φέρει λόγω πιθανής επισκευής ή αστοχίας** του συστήματος, ενώ στο Σχήμα 7.12(β) αποτυπώνεται το **ολικό ρίσκο** που φέρει η κάθε περίπτωση RBI, δηλαδή συμπεριλαμβάνεται και το κόστος που αναλαμβάνεται λόγω επιθεώρησης και συντήρησης.



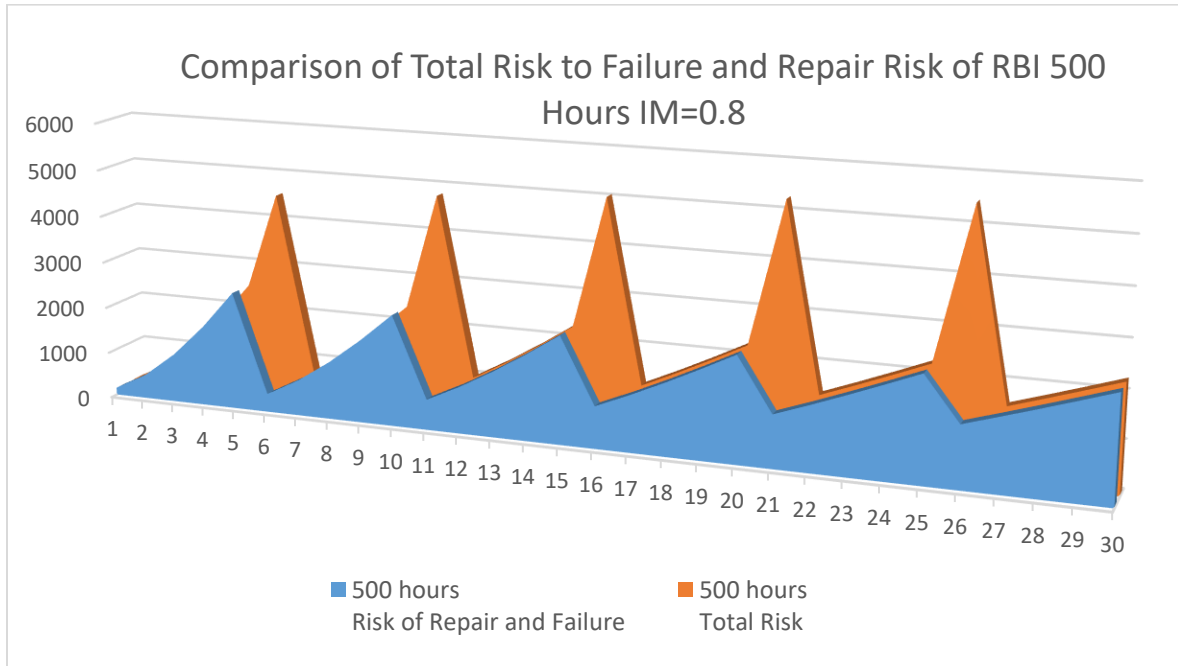
(α)



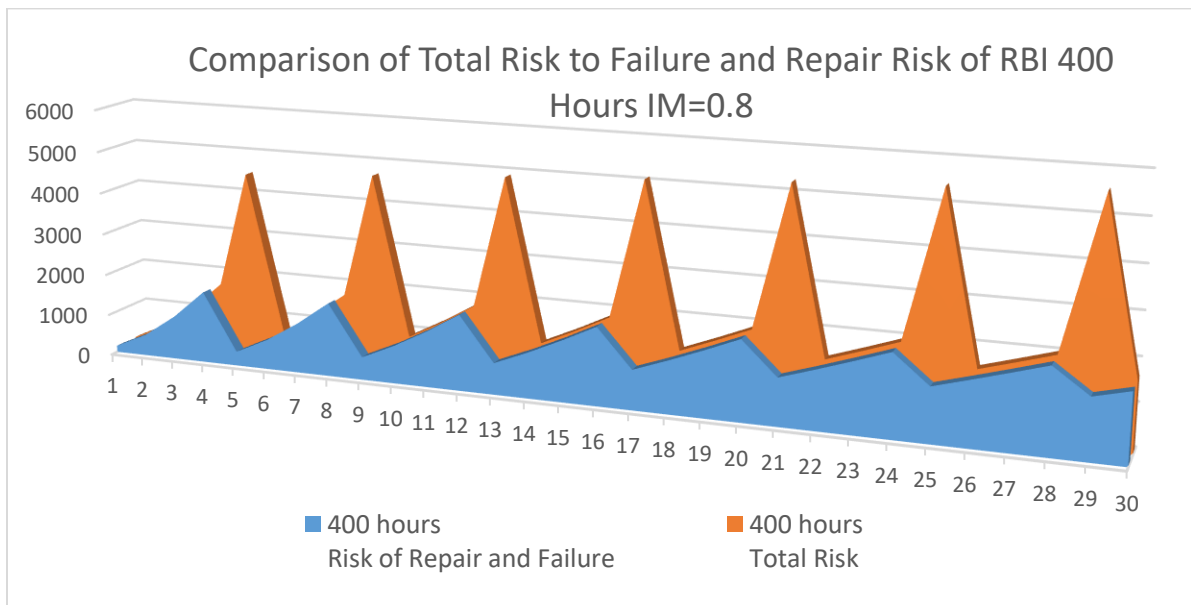
(β)

Σχήμα 7.12 Παρατήρηση επιλεγμένων RBI για το (α) Ρίσκο συντήρησης και αστοχίας και (β) συνολικό Ρίσκο του συστήματος ψύξης

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω, το ρίσκο του συστήματος εξελίσσεται στο χρόνο στο Σχήμα 7.12(α), με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της πιθανότητας αστοχίας των αντίστοιχων προσεγγίσεων RBI και αυτό είναι λογικό μιας και το ρίσκο είναι απόρροια της πιθανότητας της αστοχίας του συστήματος σε συνάρτηση με το κόστος αστοχίας αλλά και επισκευών σε περίπτωση που αστοχήσει σε οποιοδήποτε χρονικό βήμα. Με την εισαγωγή του κόστους της επιθεώρησης και συντήρησης ωστόσο, η καμπύλη του ρίσκου μεταβάλλεται με τις σημαντικές αυξομειώσεις στην τιμή του να παρατηρούνται στα βήματα που εκτελείται επιθεώρηση και συντήρηση. Αυτό συμβαίνει καθώς το κόστος που αυτές ενέχουν είναι σημαντικό και προστίθεται στο συνολικό ρίσκο στιγμιαία στα χρονικά σημεία που εκτελέστηκαν εργασίες επιθεώρησης και συντήρησης. Ακολουθεί το Σχήμα 7.13. για την καλύτερη αποτύπωση της κατάστασης κάθε προσέγγισης RBI ως προς την εξέλιξη του ρίσκου που αυτή φέρει, με παράδειγμα τις 500 (α) και 400 (β) ώρες χρονικού πλαισίου RBI αντίστοιχα.



(α)



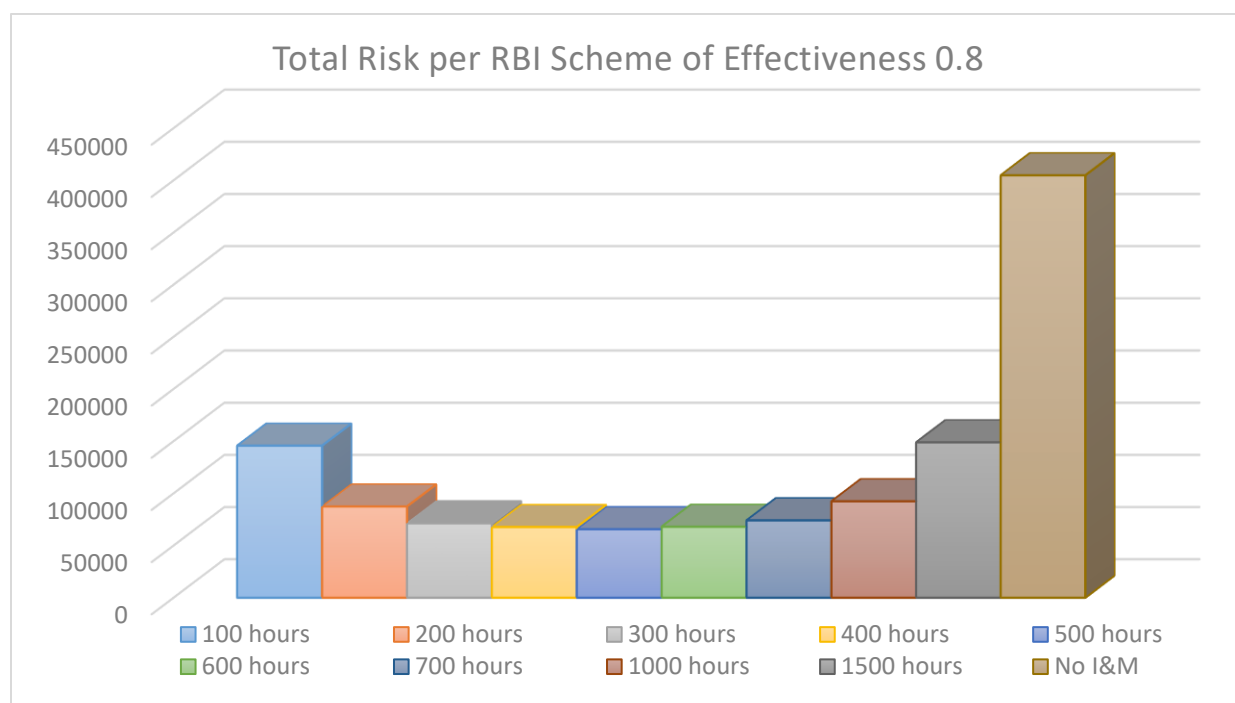
(β)

Σχήμα 7.13 Παρατήρηση RBI ως προς το (α) Ρίσκο συντήρησης και αστοχίας και (β) συνολικό Ρίσκο του συστήματος ψύξης

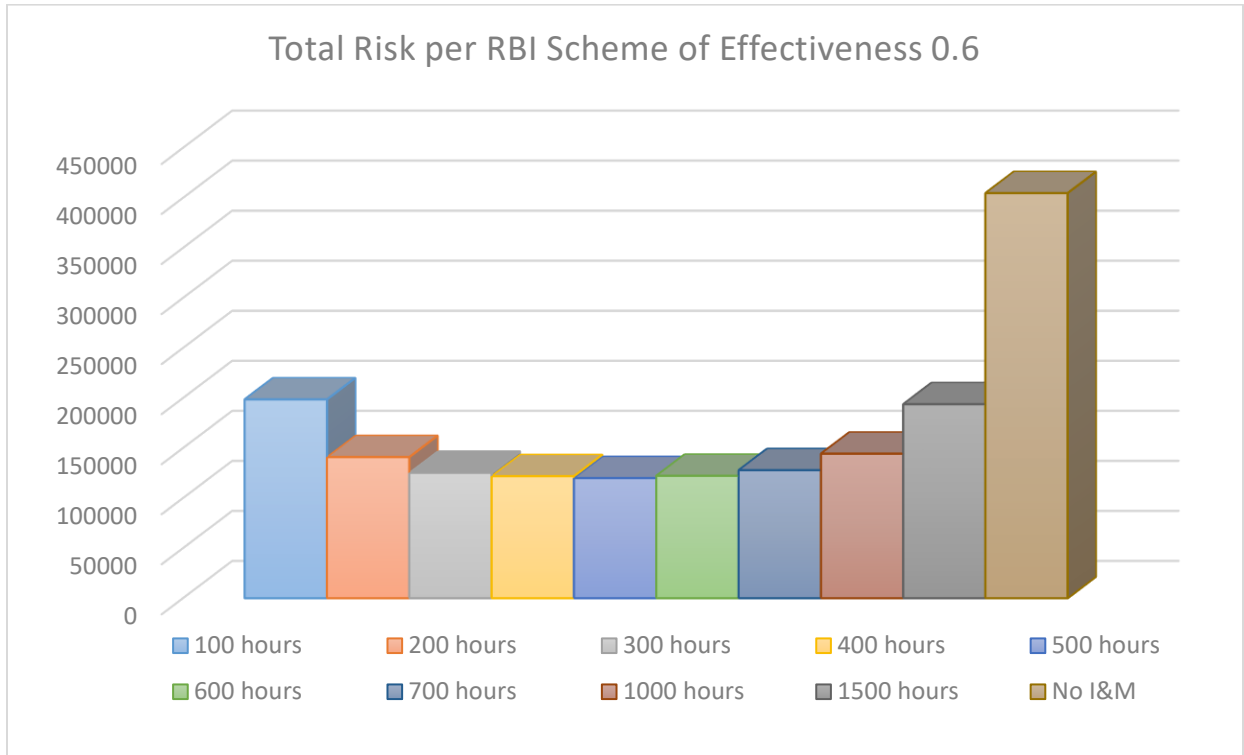
Ο κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση του βέλτιστου πλάνου I&M υπό καθεστώς αβεβαιότητας, και μέχρι στιγμής τα αποτελέσματα της πιθανότητας αστοχίας βάσει των διαφορετικών πλάνων I&M δεν ήταν ικανά να παρουσιάσουν το βέλτιστο πλάνο μιας και όσο

συχνότερος ήταν ο προγραμματισμός τους, τόσο μικρότερη προέκυψε η πιθανότητα που είχε το σύστημα να αστοχήσει.

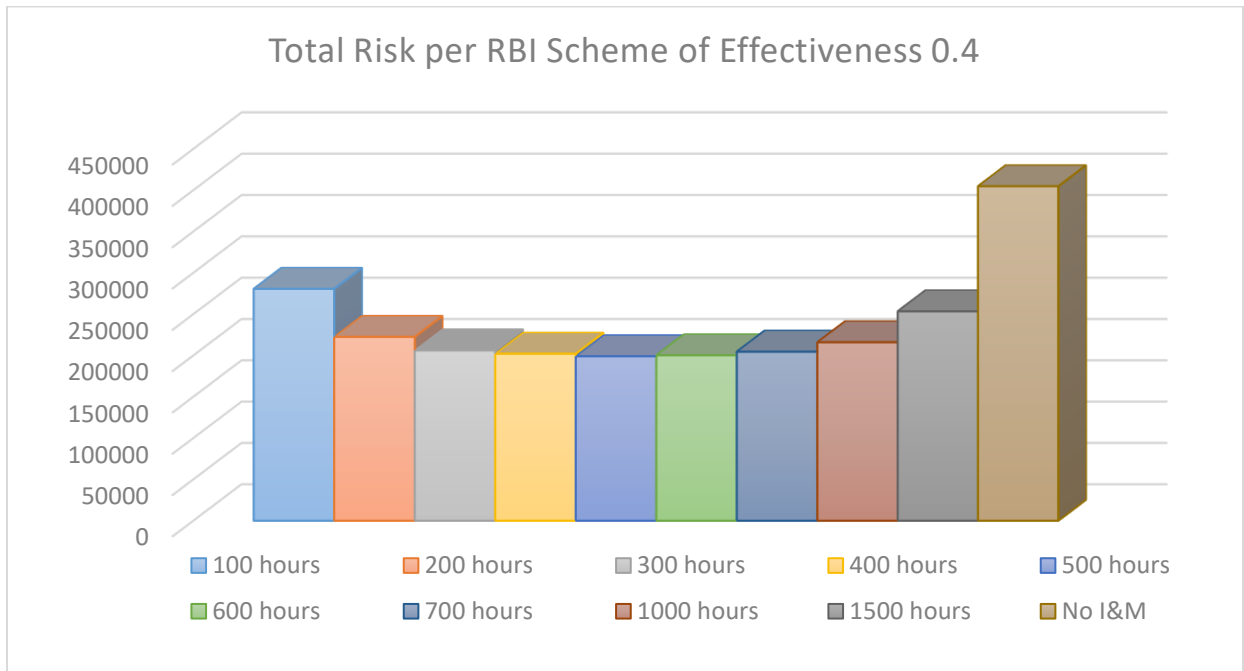
Διαισθητικά και μόνον, ένας παρατηρητής χωρίς γνώση επί της φύσης της λειτουργίας και διαχείρισης μηχανολογικών εγκαταστάσεων, θα μπορούσε πιθανότατα να κατανοήσει πως η συχνότερη επιθεώρηση και συντήρηση σημαίνει και περισσότερα έξοδα, και άρα δεν σημαίνει απαραίτητα πως αυτή θα έχει και ως αποτέλεσμα το μικρότερο ρίσκο για τον χειριστή ή κάτοχο του εκάστοτε εξοπλισμού. Αρκεί η ανάγνωση των παρακάτω, Σχήμα 7.14 και Πίνακας 7.6, για την επιβεβαίωση ενός τέτοιου ισχυρισμού και στο παρόν σύστημα, καθώς η συχνότερη προσέγγιση I&M για τον μετριασμό του ρίσκου στο σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού δεν αποδεικνύεται ως και η αποδοτικότερη. Στην περίπτωση του βαθμού αποτελεσματικότητας της IM 0.8, 0.6 και 0.4, αποδοτικότερο είναι το πλάνο των 500 ωρών χωρίς μεγάλες διαφορές από το πλάνο επιθεώρησης των 400 και 600 ωρών αντίστοιχα ενώ υπό το βαθμό αποτελεσματικότητας 0.2 της I&M, αποδοτικότερο είναι το πλάνο των 600 ωρών.



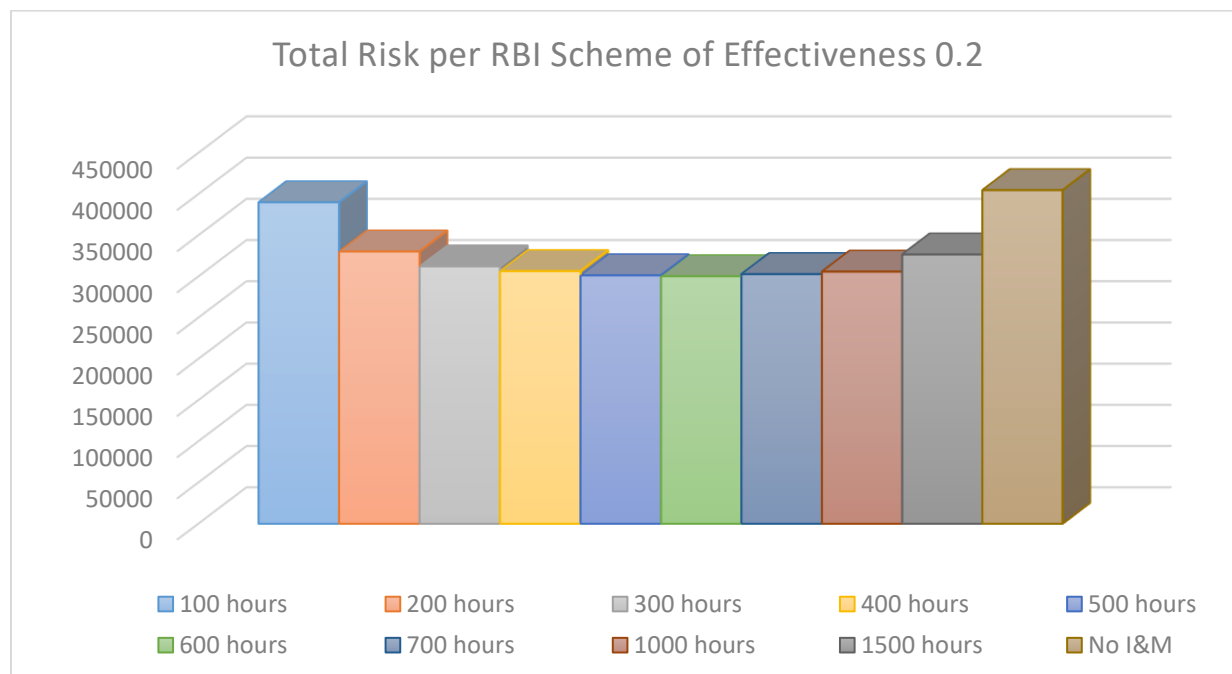
(α)



(β)



(γ)

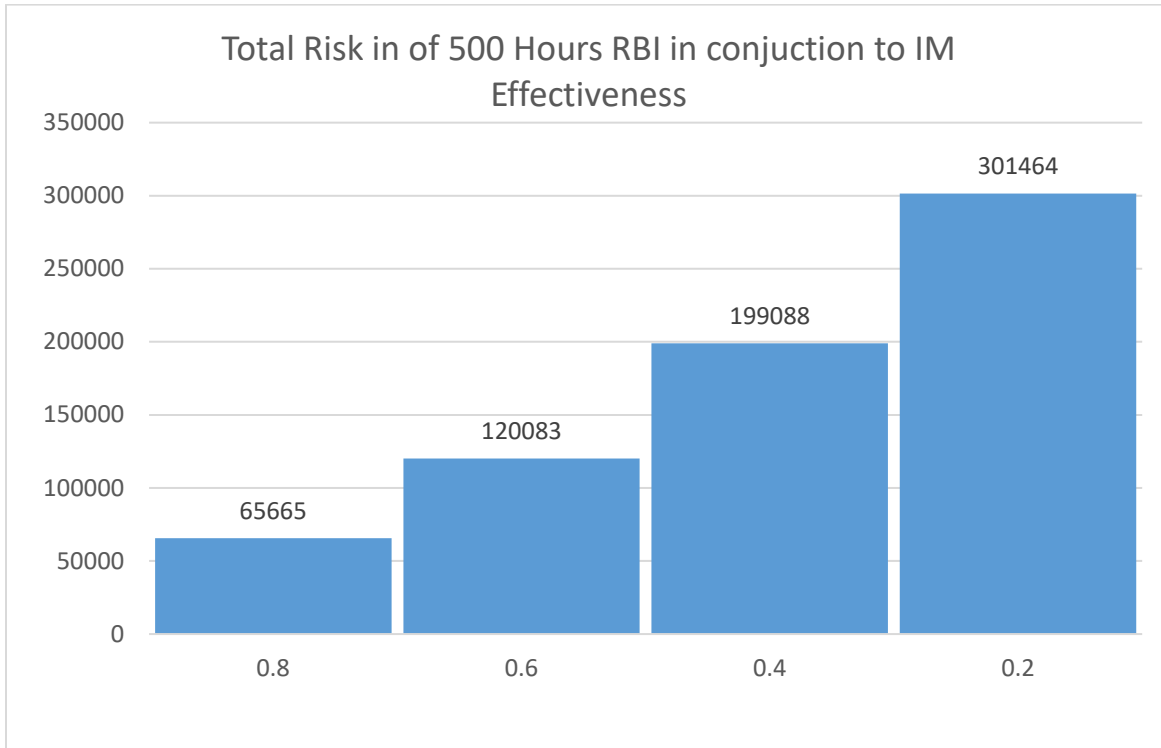


(δ)

Σχήμα 7.14 Συνολικό Ρίσκο ανά προσέγγιση RBI για διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας I&M

Περαιτέρω συμπεράσματα που μπορούν να ληφθούν από την παρούσα έρευνα θα αναλυθούν, καθώς αυτά δυνητικά μπορεί να αποτελέσουν αντικείμενο μιας ενδελεχούς μελέτης στη ανάλυση της αξιοπιστίας των συστημάτων πάνω σε πλοία.

Παρατηρείται πως οι αυξομειώσεις στο ρίσκο μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων βαθμού αποτελεσματικότητας I&M ελαττώνονται όσο πέφτει ο βαθμός αποτελεσματικότητας I&M. Αυτό είναι μία ένδειξη πως η ανάλυση του ρίσκου και η αναζήτηση του βέλτιστου πλάνου RBI έχει προσεγγιστεί ορθά και σε συμφωνία με την πραγματικότητα, όπου **η μη αποτελεσματική I&M σημαίνει πως χάνει το «νόημα» η εκτέλεσή της καθώς δεν θα πετύχει ικανοποιητική μείωση στο συνολικό ρίσκο σε βάθος χρόνου**. Αυτό επιβεβαιώνεται μιας και οι διαφορές μεταξύ του πλάνου της καθόλου επιθεώρησης με τις υπόλοιπες έχουν μικρότερη διαφορά όσο η αποτελεσματικότητα της I&M μειώνεται. Στο Σχήμα 7.15, παρουσιάζεται το ρίσκο του συστήματος υπό διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας της I&M για το πλάνο I&M των 500 ωρών. Αναδεικνύεται η σημαντικότητα της σωστής εκπαίδευσης των πληρωμάτων ως προς την επιθεώρηση και συντήρηση του υπό μελέτη συστήματος. **Η ελάττωση της αποτελεσματικότητας της επιθεώρησης και συντήρησης κατά μόνο 20% οδηγεί οριακά σε αύξηση 183% του ρίσκου του στο πλάνο των 500 ωρών που αποδείχτηκε και το αποδοτικότερο. Η ελάττωσή της κατά 40% οδήγησε σε αύξηση 303% του ρίσκου που θα φέρει το σύστημα.**



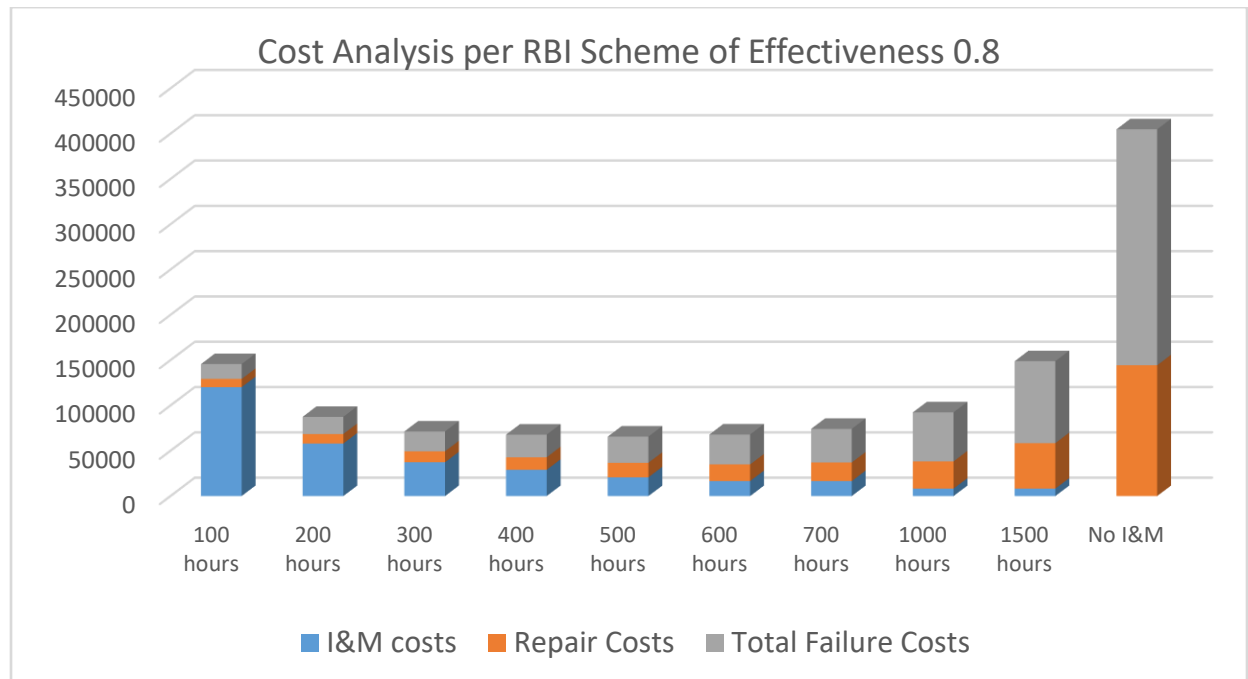
Σχήμα 7.15 Συνολικό Ρίσκο προσέγγισης RBI των 500 ωρών για διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας I&M

Ωστόσο, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η διαφοροποίηση της σειράς κατάταξης αποδοτικότερης προσέγγισης πλάνου I&M για του διάφορους βαθμούς αποτελεσματικότητας της I&M. Μέσω του Πίνακα 7.6 διακρίνεται ακριβέστερα η μεταβολή της κατάταξης των πλάνων I&M υπό διαφορετικούς βαθμούς αποτελεσματικότητας της I&M. Ως παράδειγμα, το πλάνο των 400 ωρών, είναι κατά 36% αποδοτικότερο από το πλάνο των 1000 ωρών για βαθμό αποτελεσματικότητας 0.8, ωστόσο σε λιγότερο αποτελεσματική I&M, παρουσιάζεται καλύτερο το πλάνο I&M των 1000 ωρών που είναι κατά 0.2% αποδοτικότερο του πλάνου των 400 ωρών. Αντίστοιχα συγκρίνεται το πλάνο των 200 ωρών με των 1500 ωρών, που υπό βαθμό αποτελεσματικότητας **0.8 το πλάνο 200 ωρών υπερτερεί κατά 70%** του πλάνου των 1500 ωρών ενώ για βαθμό αποτελεσματικότητας **0.2 το πλάνο των 1500 ωρών υπερτερεί κατά 1%**. Σε περίπτωση πτώσης 40% της αποτελεσματικότητας της συντήρησης το πλάνο των 200 ωρών υπερτερεί μόνο κατά 14% του πλάνου των 1500 ωρών, και άρα υπάρχει διαφορά 56% ως προς το ρίσκο που φέρει το καθένα σε σχέση με αποτελεσματικότερη I&M.

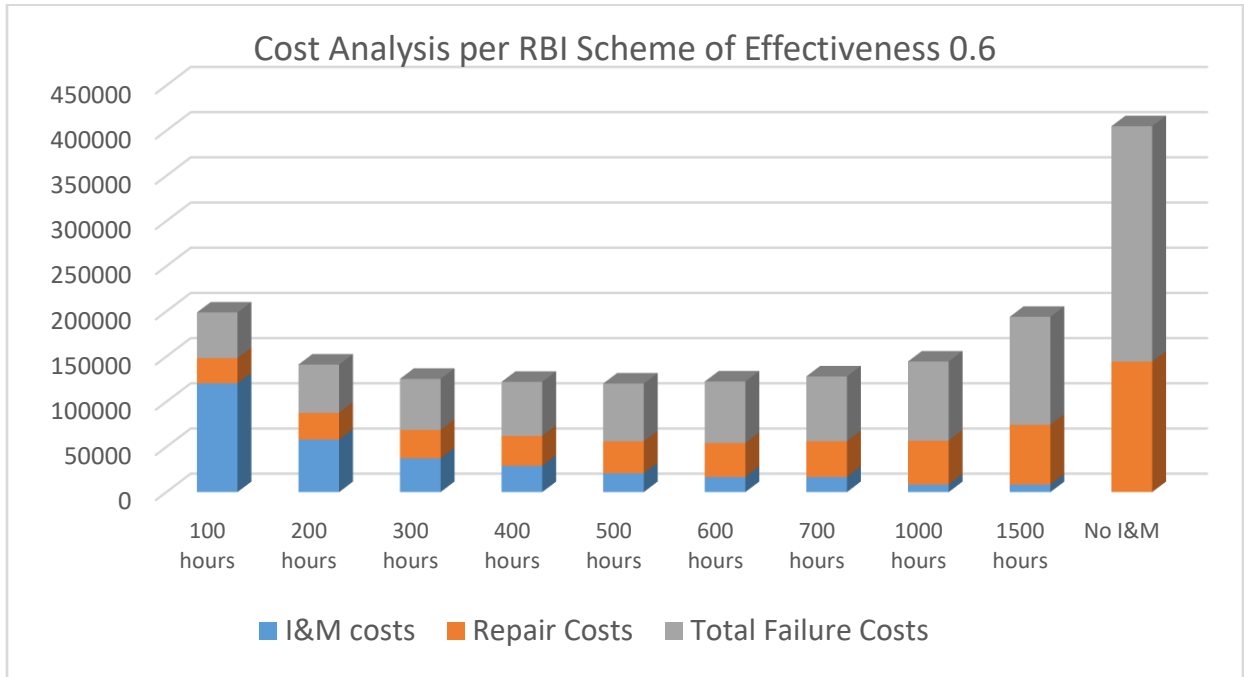
Πίνακας 7.6 Κατάταξη αποδοτικότερων πλάνων I&M για κάθε βαθμό αποτελεσματικότητας I&M

Effectiveness I&M 0.8		Effectiveness I&M 0.6		Effectiveness I&M 0.4		Effectiveness I&M 0.2	
Total Risk \$	Best to Worst RBI Scheme (Hours)	Total Risk \$	Best to Worst RBI Scheme (Hours)	Total Risk \$	Best to Worst RBI Scheme (Hours)	Total Risk \$	Best to Worst RBI Scheme (Hours)
65665	500	120083	500	199088	500	300388	600
67768	400	122000	400	200167	600	301464	500
67991	600	122313	600	202027	400	302930	700
71265	300	125328	300	204587	700	305897	1000
74125	700	127934	700	206123	300	306567	400
87451	200	141070	200	215939	1000	312337	300
92384	1000	144454	1000	222512	200	326759	1500
145698	100	193919	1500	253431	1500	330415	200
148873	1500	198703	100	280629	100	390077	100
404808	No I&M	404808	No I&M	404808	No I&M	404808	No I&M

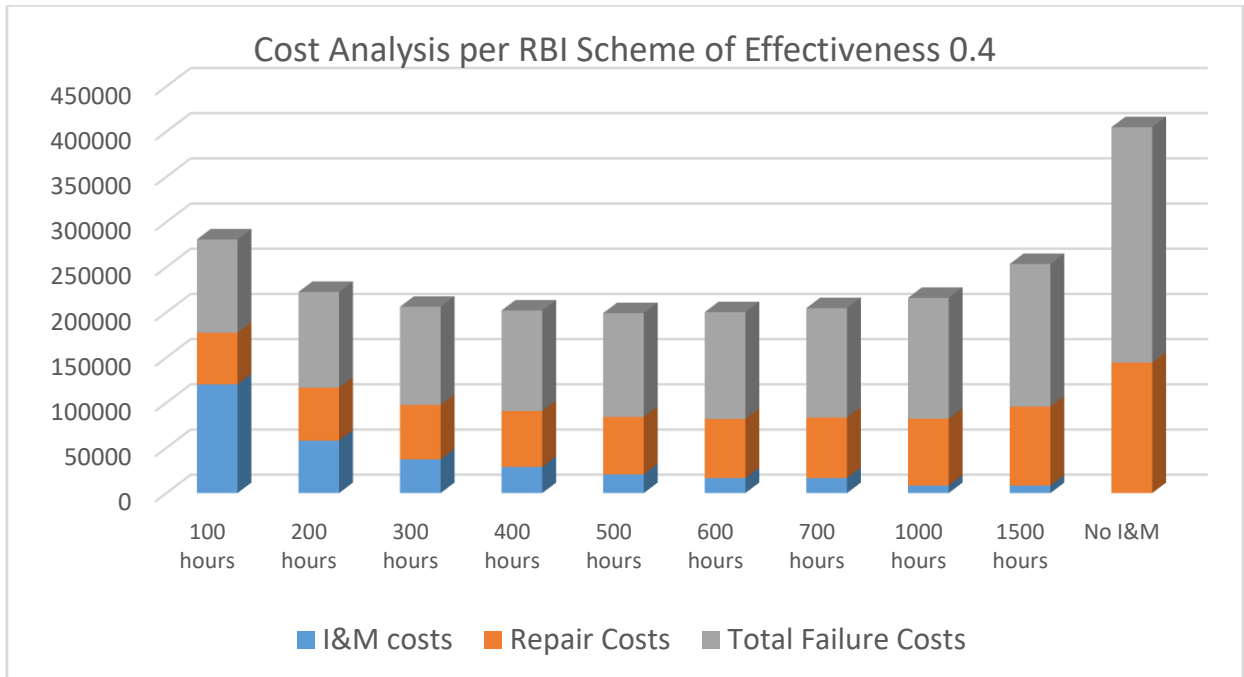
Σε συνέχεια της ανάλυσης που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 7.14, ακολουθεί η ανάλυση του ρίσκου(κόστους) που αναλαμβάνει ο πλοιοκτήτης για σε κάθε πλαίσιο και βαθμό αποτελεσματικότητας I&M.



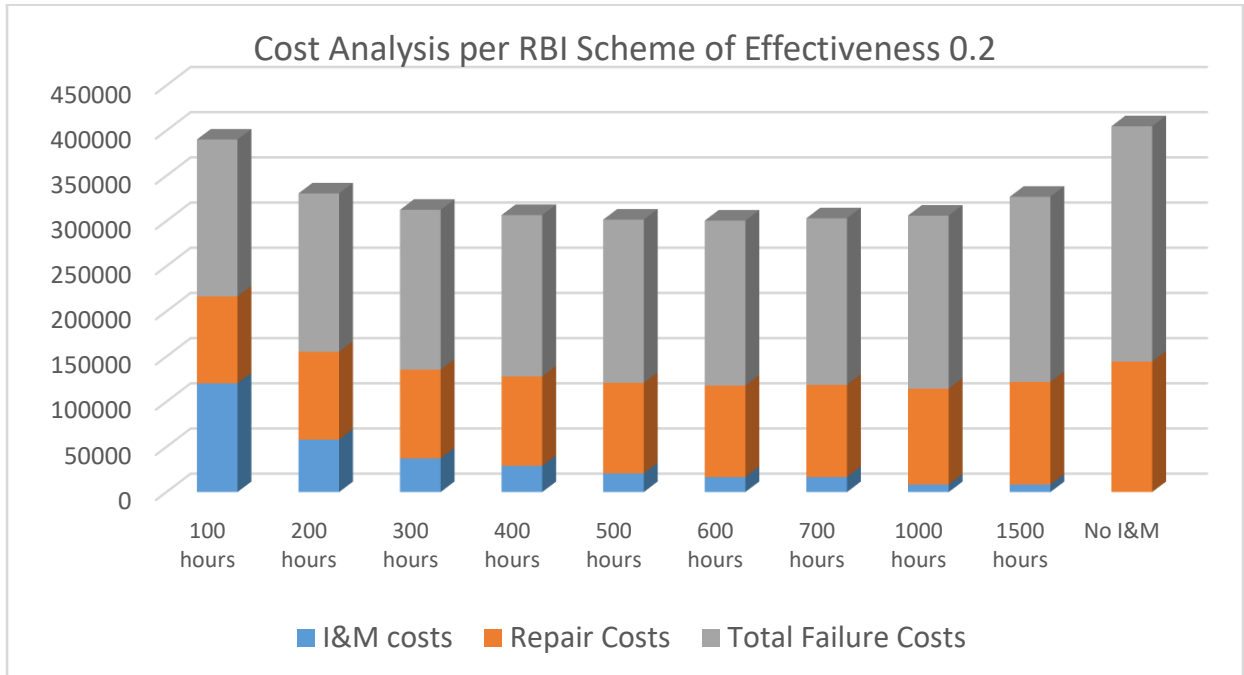
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 7.16 Ανάλυση ρίσκου συστήματος για κάθε προσέγγιση RBI και βαθμό αποτελεσματικότητας I&M

Πίνακας 7.7 Ανάλυση ρίσκου συστήματος για κάθε προσέγγιση RBI και βαθμό αποτελεσματικότητας I&M

	Costs	I&M costs	Repair Costs	Total Failure Costs
Effectiveness of I&M 0.8	100 hours	120210	9090	16398
	200 hours	58032	10492	18927
	300 hours	37307	12111	21848
	400 hours	29016	13820	24931
	500 hours	20726	16027	28912
	600 hours	16581	18335	33076
	700 hours	16581	20523	37022
	1000 hours	8290	29991	54103
	1500 hours	8290	50137	90445
	No I&M	0	144371	260437
Effectiveness of I&M 0.6	100 hours	120210	27994	50499
	200 hours	58032	29615	53423
	300 hours	37307	31392	56630
	400 hours	29016	33162	59822
	500 hours	20726	35435	63922
	600 hours	16581	37708	68024

	700 hours	16581	39713	71641
	1000 hours	8290	48561	87602
	1500 hours	8290	66202	119426
	No I&M	0	144371	260437
Effectiveness of I&M 0.4	100 hours	120210	57212	103208
	200 hours	58032	58660	105819
	300 hours	37307	60207	108610
	400 hours	29016	61703	111308
	500 hours	20726	63611	114751
	600 hours	16581	65474	118112
	700 hours	16581	67050	120956
	1000 hours	8290	74056	133593
	1500 hours	8290	87427	157714
	No I&M	0	144371	260437
Effectiveness of I&M 0.2	100 hours	120210	96245	173622
	200 hours	58032	97142	175240
	300 hours	37307	98087	176944
	400 hours	29016	98986	178565
	500 hours	20726	100122	180616
	600 hours	16581	101217	182591
	700 hours	16581	102124	184226
	1000 hours	8290	106139	191469
	1500 hours	8290	113579	204890
	No I&M	0	144371	260437

Πίνακας 7.8 Σύγκριση ρίσκου συστήματος για κάθε προσέγγιση RBI και βαθμό αποτελεσματικότητας I&M (Α) IM=0.8 (Β) IM=0.6 (Γ) IM=0.4 (Δ) IM=0.2

RBIM Scheme	100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	No I&M
100										
200	58247									
300	74433	16186								
400	77930	19683	3497							
500	80033	21786	5600	2103						
600	77707	19460	3274	-223	-2326					
700	71573	13326	-2860	-6357	-8460	-6134				
1000	53314	-4933	-21118	-24616	-26718	-24392	-18259			
1500	-3175	-61422	-77608	-81105	-83208	-80882	-74748	-56489		
No I&M	-259110	-317357	-333543	-337040	-339143	-336817	-330683	-312424	-255935	

(α)

RBIM Scheme	100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	No I&M
100										
200	57632									
300	73375	15742								
400	76703	19070	3328							
500	78620	20988	5245	1917						
600	76389	18757	3015	-313	-2230					
700	70768	13136	-2606	-5934	-7852	-5621				
1000	54249	-3383	-19125	-22453	-24371	-22140	-16519			
1500	4784	-52848	-68591	-71918	-73836	-71605	-65984	-49465		
No I&M	-206105	-263738	-279480	-282808	-284725	-282495	-276874	-260354	-210889	

(β)

RBIM Scheme	100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	No I&M
100										
200	58118									
300	74506	16388								
400	78602	20484	4096							
500	81541	23423	7035	2939						
600	80462	22344	5956	1860	-1079					
700	76043	17925	1536	-2560	-5499	-4420				
1000	64691	6573	-9816	-13912	-16851	-15772	-11352			
1500	27199	-30919	-47307	-51403	-54343	-53263	-48844	-37492		
No I&M	-124179	-182296	-198685	-202781	-205720	-204641	-200221	-188869	-151377	

(γ)

RBIM Scheme	100	200	300	400	500	600	700	1000	1500	No I&M
100										
200	59662									
300	77740	18079								
400	83510	23848	5769							
500	88613	28951	10873	5103						
600	89689	30027	11948	6179	1076					
700	87147	27485	9407	3637	-1466	-2542				
1000	84179	24518	6439	670	-4433	-5509	-2967			
1500	63318	3656	-14422	-20192	-25295	-26371	-23829	-20862		
No I&M	-14731	-74393	-92471	-98241	-103344	-104420	-101878	-98911	-78049	

(δ)

8. Συμπεράσματα και κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας

8.1 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα του μοντέλου που αναπτύχθηκε συζητούνται εκτενώς παραπάνω, ωστόσο η απόρροια όλων παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο και είναι η εξής:

1. Η ανάπτυξη εφαρμογής που επιτρέπει μέσω της μεθοδολογίας Risk Based Inspection το μετριασμό του ρίσκου μηχανολογικού συστήματος, και πιο συγκεκριμένα τυπικής διάταξης δικτύου κυκλοφορίας θαλάσσης, υλοποιήθηκε και πραγματώθηκε μέσω δυναμικού μπεϋζιανού δικτύου, που ήταν και ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
2. Η γήρανση του συστήματος, καθώς και η αποτελεσματικότητα της επιθεώρησης και συντήρησης όπως αυτές απαντώνται στην πραγματικότητα, αναδεικνύονται υπό τη ανάλυση των πιθανοτήτων αστοχίας του υπό μελέτη συστήματος.
3. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των υποσυστημάτων του υπό μελέτη συστήματος, καθώς και της βαρύτητας πιθανής αστοχίας τους, προς την πιθανή αστοχία του συστήματος αναδεικνύονται επίσης μέσω της ανάπτυξης δυναμικού μπεϋζιανού δικτύου και αντικατοπτρίζουν την πραγματικότητα που αντιμετωπίζουν οι έμπειροι μηχανικοί πάνω στα πλοία.
4. Ο σχεδιασμός του συστήματος, ώστε να υπάρχουν υποσυστήματα με πάνω από ένα μηχανήματα, εκ των οποίων έστω ένα είναι σε αναμονή και έτοιμο να αναλάβει λειτουργία και σκοπό μετά την αστοχία του κύριου εξοπλισμού αποτελεί σημαντική μέθοδο ελάττωσης του ρίσκου του εκάστοτε υποσυστήματος.
5. Μέσω της εφαρμογής μεθοδολογίας RBI, το βέλτιστο πλάνο επιθεώρησης και συντήρησης προκύπτει ώστε να γίνει σε συγκριμένο χρονικό σημείο η επιθεώρηση όλου του εξοπλισμού του υπό μελέτη συστήματος, αποτελώντας έτσι ένα μοντέλο ομαδοποίησης διαδικασιών I&M που μπορούν να λάβουν χώρα στο υπό μελέτη σύστημα.
6. Η σημαντικότητα της αποτελεσματικότητας της συντήρησης αναδεικνύεται μέσω του υπολογισμού του ρίσκου του συστήματος για διαφορετικές περιπτώσεις εισάγοντας καθαυτό τον τρόπο τον ανθρώπινο παράγοντα στην παρούσα μελέτη. Όπως αναλύθηκε, μικρές διαφορές στην αποτελεσματικότητα της I&M, οδηγούν σε σημαντικές μεταβολές στο ρίσκο του συστήματος. Γίνεται κατανοητό πως η ορθή και μεθοδική εκπαίδευση των διαχειριστών του υπό μελέτη συστήματος που οδηγεί σε αποτελεσματικές επιθεωρήσεις και συντηρήσεις του εξοπλισμού, είναι καθοριστικής σημασίας για το ρίσκο που αυτό ενέχει.
7. Η ορθότερη προσέγγιση ως προς το ρίσκο, υπό ικανοποιητική αποτελεσματικότητα I&M, απεδείχθη των 500 ωρών, που γίνεται η παραδοχή πως εκτελείται ταυτόχρονα και για όλο τον εξοπλισμό του υπό μελέτη συστήματος. Αμέσως μετά ακολουθούν τα πλάνα των 400 και 600 ωρών χωρίς σημαντικές διαφορές ρίσκου μεταξύ τους, που σημαίνει πως η μελέτη του συστήματος έγινε με μεγάλο βαθμό ακρίβειας.
8. Μέσω της σύγκρισης των διαφορετικών αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα διάφορα πλάνα και αποτελεσματικότητα I&M, γίνεται κατανοητή η σημαντικότητα της προσέγγισης της

επίβλεψης μηχανολογικών εγκαταστάσεων μέσω μεθοδολογίας RBI, ως προς τον έλεγχο και κατανόηση του ρίσκου που αυτό φέρει.

8.2 Προτάσεις περαιτέρω έρευνας

Κατά την ανάπτυξη και υλοποίηση του παρόντος μοντέλου εφαρμογής RBI στο δίκτυο κυκλοφορίας θαλάσσης, προέκυψαν πολυάριθμες προτάσεις και κατευθύνσεις για πιθανές έρευνες μέσω των μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία:

1. Μέσω της ανάληψης των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, θα μπορούσε να ακολουθήσει η ανάπτυξη/δημιουργία από τους μελετητές ενός πιο αξιόπιστου συστήματος ψύξης, και προτάσεις για τον περαιτέρω μετριασμό του ρίσκου του. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί καθώς εδώ αναδείχθηκαν οι σχέσεις των διαφόρων υποσυστημάτων του συστήματος ψύξης προς την πιθανή αστοχία που αυτό μπορεί να έχει σε όλα τα χρονικά βήματα και πλαίσια της μελέτης που έγινε.
2. Μία μελέτη της αποτελεσματικότητας της συντήρησης και επιθεώρησης πάνω στα πλοία και ειδικότερα στα διάφορα μηχανολογικά συστήματά τους μπορεί να αποτελέσει βάση για την αποτύπωση και αναγνώριση του ρίσκου που φέρει πραγματικά το σύστημα ψύξης ανάλογα τον τύπο του πλοίου, της κατάστασης του πληρώματος και του περιβάλλοντος δραστηριοποίησής του. Καθαυτό τον τρόπο μπορούν να παρουσιαστεί η ανάγκη για περαιτέρω κατευθυντήριες γραμμές προς την επιθεώρηση και συντήρηση του υπό μελέτη συστήματος, όπως έχει ήδη γίνει για περιοχές με μειωμένη θερμοκρασία όπως οι θάλασσες της αρκτικής από τους νηογνώμονες.
3. Σημαντικό βήμα για τον αντικατοπτρισμό του υπό μελέτη συστήματος αλλά και άλλων συστημάτων πάνω στο πλοίο, αποτελεί η ανάπτυξη δυναμικών μπεϋζιανών μοντέλων μέσω της οποίας λαμβάνεται υπόψη και ενδιάμεση κατάσταση των υποσυστημάτων ή εξαρτημάτων του όπως «έχει αστοχήσει», «υπολειτουργεί», «λειτουργεί ικανοποιητικά», «λειτουργεί σωστά». Η πολυπλοκότητα καθαυτό τον τρόπο θα αυξηθεί σημαντικά και η ανάπτυξη πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων θα είναι στην καλύτερη προσεγγιστική, ωστόσο θα μπορέσει να γίνει αντικατοπτρισμός πραγματικών καταστάσεων καλύτερα και σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.
4. Επόμενο βήμα είναι η ανάπτυξη μοντέλου που να προσεγγίζει μέσω της RBI τα διαφορετικά υποσυστήματα που αναφέρθηκαν στην παρούσα εργασία, ώστε να βελτιστοποιεί τα χρονικά πλαίσια I&M του καθενός ως προς το ολικό ρίσκο του συστήματος ψύξης θαλασσινού νερού και να αποδίδει το ελάχιστο δυνατό κόστος και αλληλουχία συντήρησης και επιθεώρησης πολλών μηχανημάτων εντός ενός μόνο Μπεϋζιανού δικτύου.

Κατάλογος Αναφορών

Ait Allal, A., Mansouri, K., Youssfi, M., & Qbadou, M. (2017). Toward a reliable sea water central cooling system for a safe operation of autonomous ship. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*, 5(12), 7-14. ISSN(p): 2347-6982, ISSN(e): 2349-204X.

American Bureau of Shipping. (2006). *Guide For Vessels Operating In Low Temperature Environments*, September 2006.

American Bureau of Shipping. (2011). *RULES FOR BUILDING AND CLASSING OFFSHORE SUPPORT VESSELS, RULE NOTE NR 568, Classification of Offshore Units - Risk Based Approach*.

American Bureau of Shipping. (2018). *Guide for risk-based inspection for floating offshore installations*, November 2018.

American Petroleum Institute. (2009). *API-580 Risk Based Inspection*. Retrieved from <https://www.studocu.com/my/document/petronas-university-of-technology/inspection-and-repairs/api-580>

American Society of Mechanical Engineers (ASME). (1991). *Risk-Based Inspection-Development of Guidelines: General Document: Volume 1*. ISBN 9780791806180.

Aven, T. (2010). A holistic framework for conceptualising and describing risk. *Journal of Polish Safety and Reliability Association*, 1(1).

Aven, T. (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, 99, 33-44.

Bennett, P. (2001). Mutual risk: P&I insurance clubs and maritime safety and environmental performance. *Marine Policy*, 25(1), 13-21.

Bertolini, M., Bevilacqua, M., Ciarapica, F.E., & Giacchetta, G. (2009). A risk-based approach for planning the maintenance of safety systems in a chemical plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, 244-253.

Boudali, H., & Dugan, J. B. (2006). A continuous-time Bayesian network reliability modeling, and analysis framework. *IEEE Transactions on Reliability*, 55(1), 86–97.

Bureau Veritas. (2017). *Risk-Based Structural Integrity Management of Offshore Jacket Structures. Guidance Note, NI 624 DT R00 E. Marine & Offshore*. Retrieved from <http://www.veristar.com>.

Bureau Veritas. (2019). *Classification Scheme under Risk Based Inspection. Guidance Note, NI 657 DT R00 E. Marine & Offshore*. Retrieved from <https://marine-offshore.bureauveritas.com/bv-rules>.

Byun, J.-E., & Song, J. (2021). A general framework of Bayesian network for system reliability analysis using junction tree. *Reliability Engineering and System Safety*, 216, 107952.

- Carlton, J. (2012). *Marine Propellers and Propulsion*, Second Edition, Global Head of Marine Technology and Investigation, Lloyd's Register. ISBN: 978-0080971239.
- Ceylan, B. O., Karatuğ, Ç., Ejder, E., Uyanık, T., & Arslanoğlu, Y. (2022). Risk assessment of sea chest fouling on the ship machinery systems by using both FMEA method and ERS process. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 1-20.
- Chan, J.-K. and Shaw, L., (1993). Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 42, pp.566-571.
- Charitos, T., van der Gaag, L. C., Visscher, S., Schurink, K. A. M., & Lucas, P. J. F. (2009). A dynamic Bayesian network for diagnosing ventilator-associated pneumonia in ICU patients. *Expert Systems with Applications*, 36, 1249-1258.
- Chemweno P., Pintelon L., Muchiri P. N. & van Horenbeek A. (2018). Risk assessment methodologies in maintenance decision making: A review of dependability modelling approaches. *Reliability Engineering and System Safety*, 173(February), 64–77.
- Chybowski, L., Gawdzińska, K., & Laskowski, R. (2019). Assessing the unreliability of systems during the early operation period of a ship—A case study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(7), 213.
- Conachey, R., Serratella, C. M., & Wang, G. (2008). Risk-based strategies for the next generation of maintenance and inspection programs. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 7, 151-173.
- Cullum J., Binns J., Lonsdale M., Abbassi R. & Garaniya V. (2018). Risk-Based Maintenance Scheduling with application to naval vessels and ships. *Ocean Engineering*, 148(August 2017), 476–485.
- Dabagh, Sh., Javid, Y., Sobhani, F.M., Saghajee, A., & Parsa, K. (2022). Self-Adaptive Risk-Based Inspection Planning in Petrochemical industry by evolutionary algorithms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 77, 104762. ISSN 0950-4230.
- Dagum, P., Galper, A., & Horvitz, E. (1992). Dynamic network models for forecasting. In D. Dubois, M. P. Wellman, B. D'Ambrosio, & P. Smets (Eds.), *Uncertainty in Artificial Intelligence* (pp. 41-48). Morgan Kaufmann. ISBN 9781483282879.
- De Carlo, F. and Arleo, M.A., (2016). *Imperfect Maintenance Models, from Theory to Practice. System Reliability*. Italy, IntechOpen.
- Dey, P.K. (2001). A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(1), 25-43.
- DNV GL. (2015). DNV-RP-C210: Probabilistic methods for planning of inspection for fatigue cracks in offshore structures.
- Ezgi, C., & Ozbalta, N. (2012). Optimization of heat exchanger cleaning cycle on a ship. *Journal of Naval Science and Engineering*, 8(1), 33-46.

Gong, Q., Yang, L., Li, Y., & Xue, B. (2022). Dynamic Preventive Maintenance Optimization of Subway Vehicle Traction System Considering Stages. *Applied Sciences*, 12(17), 8617. MDPI AG.

Hageman, R.B., van der Meulen, F.H., Rouhan, A. and Kaminski, M.L., (2022). Quantifying uncertainties for Risk-Based Inspection planning using in-service Hull Structure Monitoring of FPSO hulls. *Marine Structures*, 81, p.103100.

Hellenic Shipping News Worldwide, (2022). Weekly Tanker Time Charter Estimates <https://www.hellenicshippingnews.com/weekly-tanker-time-charter-estimates-january-05-2022>

International Maritime Organization. (2018). Revised Guidelines For Formal Safety Assessment (FSA) For Use In The IMO Rule-Making Process, MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2, 9 April 2018, London.

International Maritime Organization. (2020). SOLAS 1974, SOLAS 2020 Consolidated Edition.

International Maritime Organization. (2021). MARPOL ANEX VI RESOLUTION MEPC.340(77) adopted 26 November 2021.

Jensen, F. V., & Nielsen, T. D. (2007). *Bayesian networks and decision graphs*. Springer.

Jordan, M. I. (2004). Graphical models. *Statist. Sci.*, 19(1), 140-155.

Kabir, S., Taleb-Berrouane, M., & Papadopoulos, Y. (2019). Dynamic reliability assessment of flare systems by combining fault tree analysis and Bayesian networks. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-18.

Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*, 1(1), 11–27.

Khan, F.I., & Haddara, M.R. (2004). Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities. *Journal of Hazardous Materials*, A108, 147-159.

Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2011). Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(8), 925-932.

Krishnasamy, L., Khan, F., & Haddara, M. (2005). Application of risk-based inspection to chemical process industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18, 69-81.

Langseth, H., Nielsen, T. D., Rumí, R., & Salmerón, A. (2009). Inference in hybrid Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(10), 1499-1509.

Lazakis, I. (2011). Establishing an innovative and integrated reliability and criticality based maintenance strategy for the maritime industry. A thesis presented in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy

Lee, C. C., Yeh, T. K., & Chang, Y. H. (2011). Research on energy-saving control of the seawater cooling pump in ships. In *Proceedings of the 32th Symposium on Electrical Power Engineering*.

- Leonard, T., & Hsu, S. J. J. (1999). *Bayesian methods: An analysis for statisticians and interdisciplinary researchers*. Cambridge University Press.
- Li, K. X., Yin, J., Bang, H. S., Yang, Z., & Wang, J. (2014). Bayesian network with quantitative input for maritime risk analysis. *Transportmetrica A: Transport Science*, 10(2), 89-118.
- Lloyd's Register. (2017). *Guidance notes for the risk based inspection of hull structures*. Version 2.0. Retrieved from info.lr.org/offshore.
- Lloyd's Register. (2017). *Guidance notes for the risk-based inspection of hull structures*, version 2.0, September 2017.
- Lloyd's Register. (2019). *Guidance note NI 657 DT R00 E - Classification Scheme under Risk Based Inspection*, February 2019.
- Magruk, A., (2017). Phenomenon of Uncertainty in the Process of Holistic Anticipation of Non-deterministic Reality. In: *7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, Faculty of Management, Bialystok University of Technology, Wiejska 45A, 15-351 Bialystok, Poland.
- MAIB. (2015). *Report on the investigation of the flooding and foundering of the fishing vessel Louisa, with the loss of three crew members*. Marine Accident Investigation Branch, Department for Transport, UK.
- Marquez, D., Neil, M., & Fenton, N. (2008). Solving dynamic fault trees using a new hybrid Bayesian network inference algorithm. In *2008 16th Mediterranean Conference on Control and Automation* (pp. 609-614). IEEE.
- Medjaher, K., Moya, J.-Y., & Zerhouni, N. (2009). Failure prognostic by using dynamic Bayesian networks. *2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems (DCDS'09)*.
- Mobley, R. K. (2008). *Total productive maintenance*. Mobley RK, Higgins LR, Wikoff DJ, *Maintenance engineering handbook*, The McGraw-Hill Companies, New York.
- Nilsen, T., & Aven, T. (2003). Models and model uncertainty in the context of risk analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(3), 309–317.
- Ordonez Galan, C. A., Matias, J. M., Rivasa, T., & Bastante, F. G. (2009). Reforestation planning using Bayesian networks. *Environmental Modelling & Software*, 24, 1285-1292. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.002>
- Pearl, J. (2009) *Causality: models, reasoning and inference*. 2nd edition. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pugh, S. J., Hewitt, G. F., & Müller-Steinhagen, H. (2005). Fouling during the use of seawater as coolant—The development of a user guide. *Heat transfer engineering*, 26(1), 35-43.
- Qi, X. M., Jiao, J. Y., & Zheng, G. (2016, December). Research on optimize design method of ship sea water cooling system. In *2016 13th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)* (pp. 440-443). IEEE.

- Ross, S. (2010) A first Course in Probability, 8th Edition, ISBN: 978-960-461-457-8
- Rampini, G. H. S., Takiab, H., & Berssaneti, F. T. (2019). Critical success factors of risk management with the advent of ISO 31000 2018 – Descriptive and content analyzes. In 25th International Conference on Production Research Manufacturing Innovation: Cyber Physical Manufacturing, August 9-14, 2019, Chicago, Illinois.
- Rohmer, J. (2020). Uncertainties in conditional probability tables of discrete Bayesian Belief Networks: A comprehensive review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 88, 103384.
- Rubio, D., Casanueva, J. F., & Nebot, E. (2015). Assessment of the antifouling effect of five different treatment strategies on a seawater cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 85, 124-134.
- Sakai, S. (2003). Risk-based Maintenance. JR EAST Technical Review-No.17, Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo.
- Selvik, J. T., & Aven, T. (2011). A framework for reliability and risk centered maintenance. *Reliability engineering & system safety*, 96(2), 324-331.
- Smith, D. J. (2011). Reliability, maintainability and risk: practical methods for engineers. Butterworth-Heinemann, 8th edition 2011, ISBN 978-0-08-096902-2
- Sotiralis, P., Ventikos, N. P., Hamann, R., Golyshev, P., & Teixeira, A. P. (2016). Incorporation of human factors into ship collision risk models focusing on human centred design aspects. *Reliability Engineering & System Safety*, 156, 210-227.
- Stephenson, T. A. (2000). An introduction to Bayesian network theory and usage (No. REP_WORK). Idiap.
- Su, C. L., Chung, W. L., & Yu, K. T. (2013). An energy-savings evaluation method for variable-frequency-drive applications on ship central cooling systems. *IEEE Transactions on industry applications*, 50(2), 1286-1294.
- Tan Z., Li J., Wu Z., Zheng J. & He, W. (2011). An evaluation of maintenance strategy using risk-based inspection. *Safety Science*, 49(6), 852–860.
- Tavor, T., (2019). The theoretical attitude and actual behavior of an individual towards risk, *Journal of Behavioral and Experimental Finance*, Volume 23, 2019, Pages 1-11, ISSN 2214-6350,
- Theotokatos, G., Sfakianakis, K., Vassalos, D. (2016).: Investigation of ship cooling system operation for improving energy efficiency. *J. Mar. Sci. Technol.* 22(1), 38–50
- Topalis, P., Korneliussen, G., Hermanrud, J., & STeo, Y. (2012). Risk Based Inspection Methodology and Software Applied to Atmospheric Storage Tanks. 25th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering. *Journal of Physics: Conference Series*, 364, 012125.
- Van Handel, R. (2009). The stability of conditional Markov processes and Markov chains in random environments. *The Annals of Probability*, 37(5), 1876-1925.

- Ventikos, N.P., & Theofanidis, D. (2018). The impact of training on the human factors for the encounter of on board fire emergencies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 232(3), 462-472.
- Ventikos, N.P., Sotiralis, P., & Annetis, E. (2022). A combined risk-based and condition monitoring approach: developing a dynamic model for the case of marine engine lubrication. *Transportation Safety and Environment*, 4(3), tdac020.
- Ventikos, N. P., Sotiralis, P., Annetis, M., Podimatas, V. C., Boulougouris, E., Stefanidis, F., Chatzinikolaou, S., et al. (2023). The Development and Demonstration of an Enhanced Risk Model for the Evacuation Process of Large Passenger Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 84. MDPI AG.
- Ventikos, N.P., Sotiralis, P., Drakakis, M. (2018). A dynamic model for the hull inspection of ships: The analysis and results. *Ocean Engineering*, 51, 355-365. ISSN 0029-8018.
- Wang, H. and Pham, H., (1996). A quasi renewal process and its applications in imperfect maintenance. *International Journal of Systems Science*, 27, pp.1055-1062.
- Wei, L., Cao, H., & Ma, Z. (2022). Parameter Prediction of Marine Seawater Cooling System Based on Chaos-Elman Combined Model. *IEEE Access*, 10, 77272-77283.
- Xu, Q., Liu, H., Song, Z., Dong, S., Zhang, L., & Zhang, X. (2023). Dynamic risk assessment for underground gas storage facilities based on Bayesian network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 82, 104961.
- You, D., & Frangopol, D. M. (2015). Risk-informed life-cycle optimum inspection and maintenance of ship structures considering corrosion and fatigue. *Marine Structures*, 44, 126–142.
- You, J.S., Kuo, H.T., & Wu, W.F. (2006). Case studies of risk-informed in-service inspection of nuclear piping systems. *Nuclear Engineering and Design*, 236(1), 35-46.
- Zhang, G., & Thai, V. V. (2016). Expert elicitation and Bayesian Network modeling for shipping accidents: A literature review. *Safety science*, 87, 53-62.
- Βεντικός, Ν. Π., Βεντούρης-Παπασημακόπουλος, Π., (2016), Στοιχεία θεωρίας ρίσκου: ορισμοί, μεθοδολογίες και παραδείγματα.
- Δαγκίνης, Ι. Κ., Γλυκάς, Α. Ι., & Χατζηδημητρίου, Ε. Α. (2017). Βοηθητικά Μηχανήματα Πλοίων. Εκδόσεις Αντ. Σάκκουλα. ISBN: 978-960-568-177-5
- Ζιούτας, Χ. Γ. (2014). Πιθανότητες και στοιχεία στατιστικής για μηχανικούς, Αθήνα: Εκδόσεις ΖΗΤΗ. ISBN: 978-618-5191-05-9.
- Ιωαννίδης, Ι. Π., (2002) Συστήματα και Βοηθητικά Μηχανήματα πλοίων, Τεύχος 1, Δίκτυα Σωληνώσεων, ΑΘΗΝΑ
- Κυρτάτος, Ν.Π., (1993). Ναυτικοί Κινητήρες Diesel, Θέματα Σχεδίασης Και Λειτουργίας. Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ. ISBN 978-960-11-0032-6.

Παντελής, Δ.Ι. and Τσιούρβα, Δ., (2012). Διάβρωση και Προστασία Ναυπηγικών και Μηχανολογικών Κατασκευών. Αθήνα.

Παπανικολάου, Α., (2009). Μελέτη πλοίου, Μεθοδολογίες προμελέτης. Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ ΕΚΔΟΣΕΙΣ. ISBN 978-960-8955-00-2.

Σπύρου, Κ. (2017). Μελέτη και εξοπλισμός πλοίου II, Σημειώσεις διδάσκοντος και πρόσθετο βοηθητικό υλικό, Ιανουάριος 2017

Χρυσουλάκης, Γ. Δ., & Παντελής, Δ. Ι. (2008). Επιστήμη και Τεχνολογία των μεταλλικών υλικών. Εκδόσεις Τζιόλα. ISBN: 978-960-418-284-9.

9. Παραρτήματα

9.1 Παράρτημα Ι – Πίνακες Δεσμευμένων Πιθανοτήτων

Οι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων του ανεπτυγμένου Μπεϋζιανού δικτύου επισυνάπτονται παρακάτω, και αντικατοπτρίζουν την σχέση μεταξύ των κόμβων του υπό μελέτη συστήματος. Η ανάπτυξή τους έγινε λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική λειτουργία των υποσυστημάτων τυπικής διάταξης δικτύου ψύξης θαλάσσης, καθώς οι αναρροφήσεις θαλάσσης, οι αντλίες και οι εναλλάκτες θερμότητας έχουν πάνω από μία μονάδα εξοπλισμού, με άλλες μονάδες σε αναμονή σε περίπτωση αστοχίας της κύριας (υπό χρήση).

Αρχικά, για την κατανόηση των πινάκων δεσμευμένων πιθανοτήτων παρουσιάζεται η αρχικοποίηση των κόμβων του BN και του συμβολισμού που τους δόθηκε για την ευκολότερη καταγραφή τους κατά την υλοποίηση της παρούσας εργασίας. Οι συμβολισμοί αποδίδονται για κάθε εξάρτημα με την εξής λογική:

- Σε περίπτωση που τα επιστόμια εισαγωγής των αντλιών ονομάζονται vip –(Valve Inlet Pump), τότε σε κάθε αντλία θα αποδοθούν με τον συμβολισμό VIP1, VIP2 και VIP3 αντίστοιχα.

Οι πιθανότητες αστοχίας των κόμβων γονέων του μοντέλου που επηρεάζονται από το χρόνο μέσω της αντιστοίχισης της πιθανότητας λειτουργίας τους με την απόδοση της εκθετικής κατανομής είναι οι εξής:

Πίνακας 9.1 Συμβολισμοί εξαρτημάτων μοντέλου – Κόμβοι Γονείς με πιθανότητα αστοχίας υπό την εκθετική κατανομή

Εξοπλισμός	Συμβολισμός	Αρίθμηση
Μηχανικά μέρη(πτερωτή, κέλυφος κλπ) αντλίας	Pp	1A, 4P, 7G
Σωλήνωση αντλίας και εναλλάκτη, δικτύου	Pip	10J, 13M, 16P, 20T, 24X, 29AC
Μηχανική Σύνδεση (Coupling) Αντλίας	Cp	2B, 5E, 8H
Μοτέρ Αντλίας	Em	3C, 6F, 9I
Επιστόμια εισαγωγής αντλιών και εναλλακτών	Vip, Viel	11K, 14N, 17Q, 21U, 25Y
Επιστόμια εξαγωγής αντλιών και εναλλακτών	Vop, Voel	12L, 15O, 18R, 22V, 26Z
Σένσορες αντλίας και εναλλακτών	Ss	30AD, 31AE, 32AF, 33AG, 34AH
Αναρροφήσεις θαλάσσης	HSC, LSC	27AA, 28AB
Μηχανικά μέρη εναλλάκτη(μεταλλικές πλάκες, παρεμβύσματα, φίλτρο κλπ)	Cl	19S, 23W

Ο Πίνακας 9.2, αποτυπώνει τη μοντελοποίηση κατανομής πιθανοτήτων – προγενέστερες πιθανότητες των παραπάνω κόμβων.

Πίνακας 9.2 Πίνακας αποτύπωσης κατανομής πιθανοτήτων κόμβων γονέων που επηρεάζονται από το χρόνο

MARGINAL PROBABILITIES TABLE								
	A	P(A)	B	P(B)	C	P(C)	D	P(D)
FAILED	1	l_{pp}	1	l_{pi}	1	l_{em}	1	l_{pp}
NORMAL FUNCTION	2	$1-l_{pp}$	2	$1-l_{pi}$	2	$1-l_{em}$	2	$1-l_{pp}$

Οι κόμβοι παιδιά του BN στους οποίους αποδίδονται οι πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων και αποτελούν ουσιαστικά υποσυστήματα και συστήματα του υπό μελέτη μοντέλου παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.3.

Πίνακας 9.3 Συμβολισμοί εξαρτημάτων μοντέλου – Κόμβοι Γονείς με πιθανότητα αστοχίας υπό την εκθετική κατανομή

Εξοπλισμός	Συμβολισμός	Αρίθμηση
Αντλία (No. 1, 2, 3)	SCP	35CA, 36CB, 37CC
Υποσύστημα κάθε Αντλίας (No. 1, 2, 3)	SCPsub	38CD, 39CE, 40CF
Σύστημα κάθε Αντλίας (No. 1, 2, 3)	SCPXsys,	43CI, 44CJ, 45CK
Σύστημα των τριών Αντλιών	SCPsys	49CO
Σύστημα Αναρροφήσεων Θαλάσσης(High, Low)	SCsys	48CN
Υποσύστημα κάθε Εναλλάκτη (No. 1, 2)	LTCsub	41CG, 42CH
Σύστημα κάθε Εναλλάκτη (No. 1, 2)	LTCXsys	46CL, 47CM
Σύστημα των δύο Εναλλακτών	LTCsys	50CP
Σύστημα Ψύξης Θαλασσινού Νερού	SWCS	51CQ

Πίνακας 9.4 Πίνακες δεσμευμένων πιθανοτήτων κόμβων που συμβολίζουν υποσυστήματα και συστήματα του υπό μελέτη μοντέλου

	35	Parent Nodes			Sea Cooling Pump No. 1	
		A	B	C	$P(CA=1; A,B,C)$	$P(CA=2; A,B,C)$
1		1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	0
3		1	2	1	1	0
4		1	1	2	1	0
5		2	1	2	1	0
6		1	2	2	1	0
7		2	2	1	1	0
8		2	2	2	0	1

	36	nodes			Sea Cooling Pump No. 2	
		D	E	F	$P(CB=1; D,E,F)$	$P(CA=B; D,E,F)$
1		1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	0
3		1	2	1	1	0
4		1	1	2	1	0
5		2	1	2	1	0
6		1	2	2	1	0
7		2	2	1	1	0
8		2	2	2	0	1

	37	nodes			Sea Cooling Pump No. 3	
		G	H	I	$P(CC=1; G,H,I)$	$P(CC=2; G,H,I)$
1		1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	0
3		1	2	1	1	0
4		1	1	2	1	0
5		2	1	2	1	0
6		1	2	2	1	0
7		2	2	1	1	0
8		2	2	2	0	1

	38	Parent Nodes				Sea Cooling Pump No. 1 Subsystem	
		CA	J	K	L	P(CD=1; CA,J,K,L)	P(CD=2; CA,J,K,L)
1		1	1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	1	0
3		1	2	1	1	1	0
4		1	1	2	1	1	0
5		2	1	2	1	1	0
6		1	2	2	1	1	0
7		2	2	1	1	1	0
8		2	2	2	1	1	0
9		1	1	1	2	1	0
10		2	1	1	2	1	0
11		1	2	1	2	1	0
12		1	1	2	2	1	0
13		2	1	2	2	1	0
14		1	2	2	2	1	0
15		2	2	1	2	1	0
16		2	2	2	2	0	1

	39	Parent Nodes				Sea Cooling Pump No. 2 Subsystem	
		CB	M	N	O	P(CE=1; CB,M,N,O)	P(CE=2; CB,M,N,O)
1		1	1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	1	0
3		1	2	1	1	1	0
4		1	1	2	1	1	0
5		2	1	2	1	1	0
6		1	2	2	1	1	0
7		2	2	1	1	1	0
8		2	2	2	1	1	0
9		1	1	1	2	1	0
10		2	1	1	2	1	0
11		1	2	1	2	1	0
12		1	1	2	2	1	0
13		2	1	2	2	1	0
14		1	2	2	2	1	0
15		2	2	1	2	1	0
16		2	2	2	2	0	1

	40	Parent Nodes				Sea Cooling Pump No. 3 Subsystem	
		CC	P	Q	R	P(CF=1; CC,P,Q,R)	P(CF=2; CC,P,Q,R)
1		1	1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	1	0
3		1	2	1	1	1	0
4		1	1	2	1	1	0
5		2	1	2	1	1	0
6		1	2	2	1	1	0
7		2	2	1	1	1	0
8		2	2	2	1	1	0
9		1	1	1	2	1	0
10		2	1	1	2	1	0
11		1	2	1	2	1	0
12		1	1	2	2	1	0
13		2	1	2	2	1	0
14		1	2	2	2	1	0
15		2	2	1	2	1	0
16		2	2	2	2	0	1

	41	Parent Nodes				Low Temperature Cooler No. 1 Sub System	
		S	T	U	V	P(CG=1; S,T,U,V)	P(CG=2; S,T,U,V)
1		1	1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	1	0
3		1	2	1	1	1	0
4		1	1	2	1	1	0
5		2	1	2	1	1	0
6		1	2	2	1	1	0
7		2	2	1	1	1	0
8		2	2	2	1	1	0
9		1	1	1	2	1	0
10		2	1	1	2	1	0
11		1	2	1	2	1	0
12		1	1	2	2	1	0
13		2	1	2	2	1	0
14		1	2	2	2	1	0
15		2	2	1	2	1	0
16		2	2	2	2	0	1

	42	Parent Nodes				Low Temperature Cooler No. 2 Sub System	
		W	X	Y	Z	P(CH=1; W,X,Y,Z)	P(CH=2; W,X,Y,Z)
1		1	1	1	1	1	0
2		2	1	1	1	1	0
3		1	2	1	1	1	0
4		1	1	2	1	1	0
5		2	1	2	1	1	0
6		1	2	2	1	1	0
7		2	2	1	1	1	0
8		2	2	2	1	1	0
9		1	1	1	2	1	0
10		2	1	1	2	1	0
11		1	2	1	2	1	0
12		1	1	2	2	1	0
13		2	1	2	2	1	0
14		1	2	2	2	1	0
15		2	2	1	2	1	0
16		2	2	2	2	0	1

	43	Parent Nodes		SW Cooling Pump No. 1 system	
		AD	CD	P(CI=1; AD,CD)	P(CI=2; AD,CD)
1		1	1	1	0
2		2	1	1	0
3		1	2	0	1
4		2	2	0	1

	44	Parent Nodes		SW Cooling Pump No. 2 system	
		AE	CE	P(CI=1; AE,CE)	P(CI=2; AE,CE)
1		1	1	1	0
2		2	1	1	0
3		1	2	0	1
4		2	2	0	1

	45	Parent Nodes		SW Cooling Pump No. 3 system	
		AF	CF	P(CK=1; AF,CF)	P(CK=2; AF,CF)
1		1	1	1	0
2		2	1	1	0
3		1	2	0	1
4		2	2	0	1

	46	Parent Nodes		LT Cooler No 1 System	
		AG	CG	P(CL=1; AG,CG)	P(CL=2; AG,CG)
1		1	1	1	0
2		2	1	1	0
3		1	2	0	1
4		2	2	0	1

	47	Parent Nodes		LT Cooler No 2 System	
		AH	CH	P(CM=1; AH,CH)	P(CM=2; AH,CH)
1		1	1	1	0
2		2	1	1	0
3		1	2	0	1
4		2	2	0	1

	48	Parent Nodes		Sea Chests H&L System	
		AA	AB	P(CN=1; AA,AB)	P(CN=2; AA,AB)
1		1	1	1	0
2		2	1	0	1
3		1	2	0	1
4		2	2	0	1

	49	Parent Nodes			SW Cooling Pump System	
		CI	CJ	CK	P(CO=1; CI,CJ,CK)	P(CO=2; CI,CJ,CK)
1		1	1	1	1	0
2		2	1	1	0	1
3		1	2	1	0	1
4		1	1	2	0	1
5		2	1	2	0	1
6		1	2	2	0	1
7		2	2	1	0	1
8		2	2	2	0	1

	50	Parent Nodes		LT Coolers System	
		CL	CM	P(CP=1; CL,CM)	P(CP=2; CL,CM)
1		1	1	1	0
2		2	1	0	1
3		1	2	0	1
4		2	2	0	1

51	Parent Nodes				SEA WATER COOLING SYSTEM	
	CN	AC	CO	CP	$P(CQ=1 CN, AC, CO, CP)$	$P(CQ=2 CN, AC, CO, CP)$
1	1	1	1	1	1	0
2	2	1	1	1	1	0
3	1	2	1	1	1	0
4	1	1	2	1	1	0
5	2	1	2	1	1	0
6	1	2	2	1	1	0
7	2	2	1	1	1	0
8	2	2	2	1	1	0
9	1	1	1	2	1	0
10	2	1	1	2	1	0
11	1	2	1	2	1	0
12	1	1	2	2	1	0
13	2	1	2	2	1	0
14	1	2	2	2	1	0
15	2	2	1	2	1	0
16	2	2	2	2	0	1

9.2 Παράρτημα II – Κόστη I&M και Επισκευών

Το κόστος επιθεώρησης και συντήρησης, επισκευών του δικτύου ψύξης, προέκυψε μέσω της αναζήτησης εγγραφών στο PMS (Planned Maintenance System) για τις διαδικασίες συντήρησης και επιθεώρησης που εκτελούνται στα υποσυστήματα του δικτύου ψύξης θαλασσινού νερού καθώς και τιμολογίων και αρχείων ναυτιλιακής εταιρείας για τα εξαρτήματα και μέρη του εξοπλισμού που ενδεικτικά μπορεί να αντικαθίσταται σε κάποια συντήρηση ή επισκευή (πράξη που εκτελείται μετά από αστοχία κάποιου μηχανήματος).

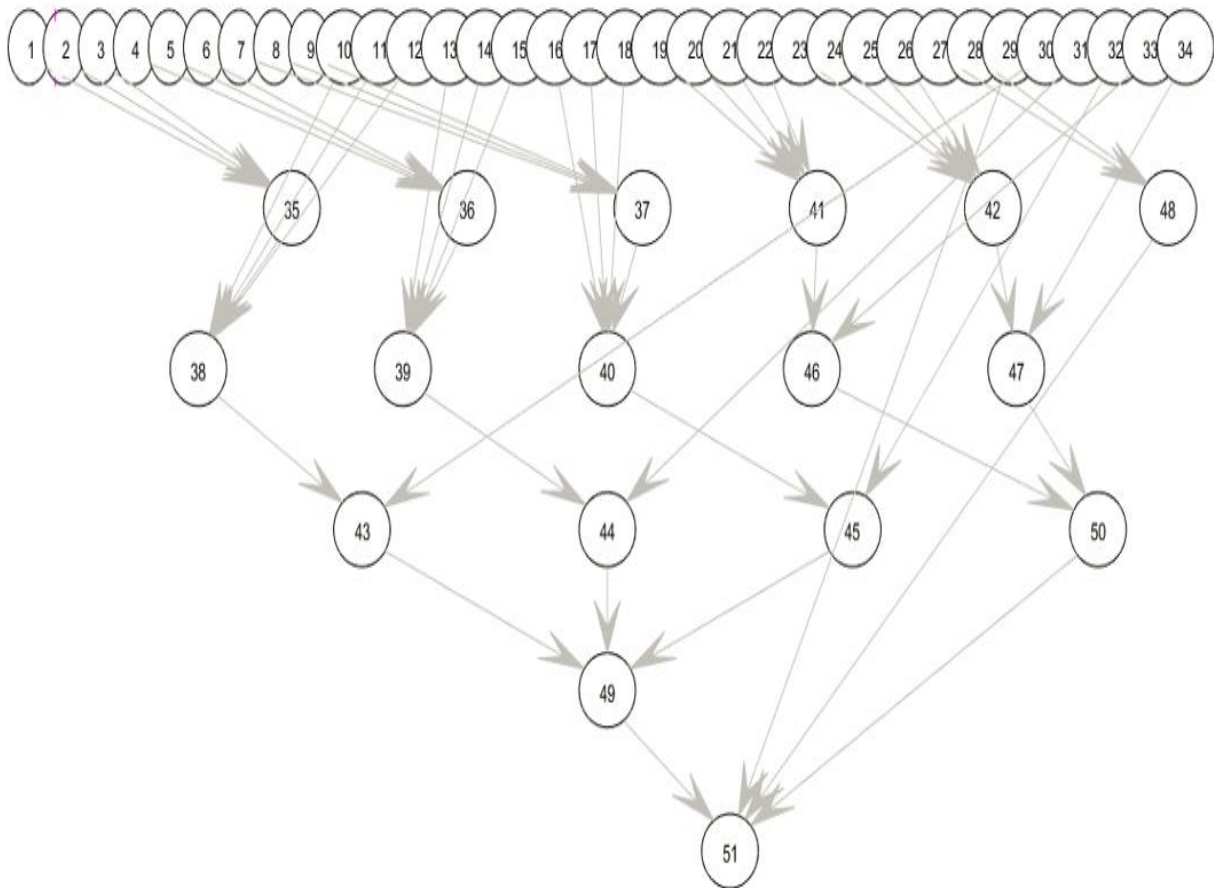
Μέσω των συνεντεύξεων με έμπειρους εργαζόμενους του τομέα της ναυτιλίας και πρωτίστως των πλοίων, προκύπτει ο χρόνος που κατά μέσο όρο μπορεί να χρειαστεί μία επιθεώρηση & συντήρηση και τα ο χρόνος που ενδεικτικά απαιτείται σε περίπτωση επισκευής του υπό μελέτη δικτύου.

Πίνακας 9.5 Αναδυόμενα κόστη δικτύου και απαιτούμενοι χρόνοι για I&M ή επισκευές

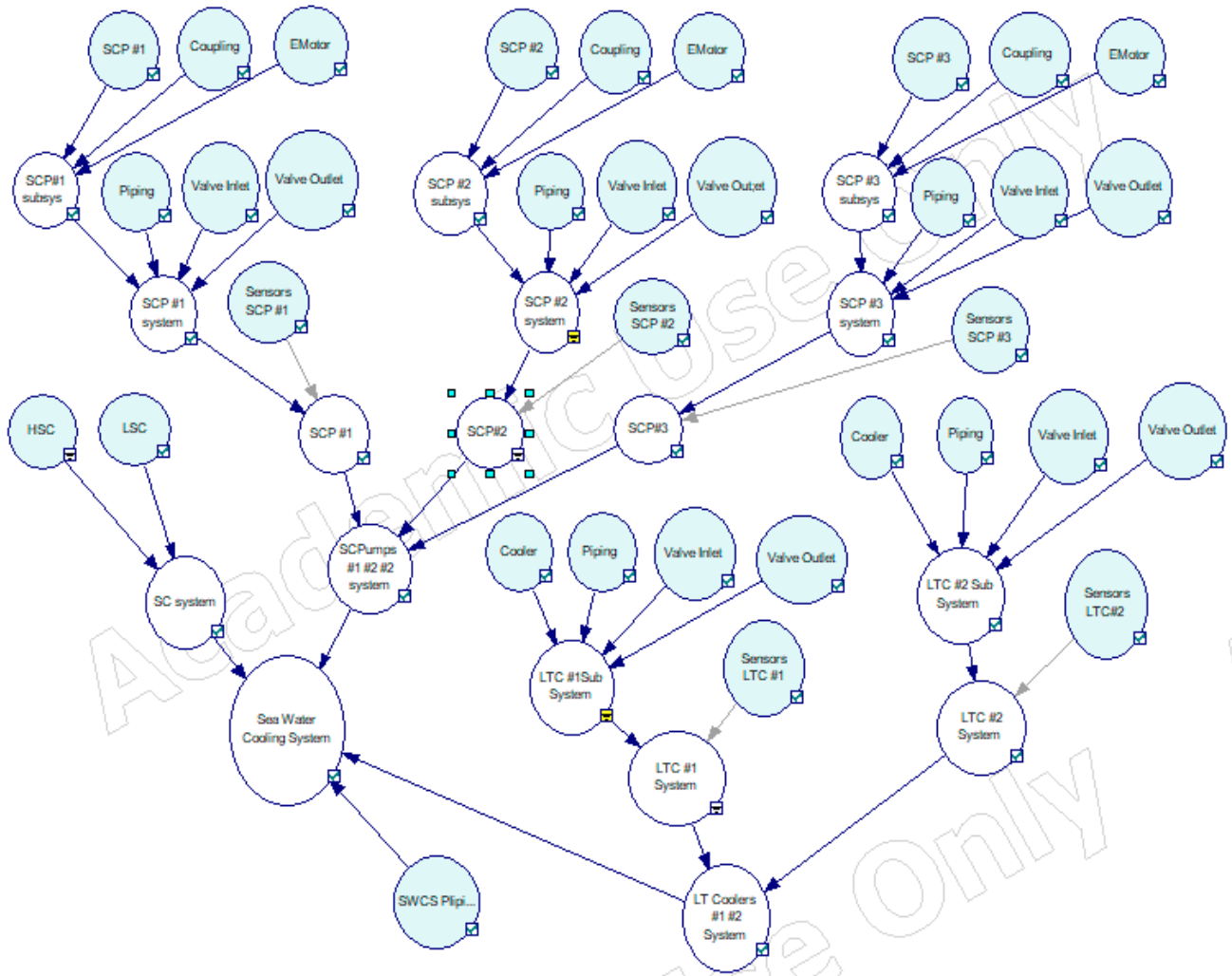
	Time Needed for I&M (minutes)	I&M costs	Probable Replacement Parts during I&M	Time Needed for Repairs (minutes)	Repairs Costs	Probable Replacement Parts during Repairs
SW Cooling Pumps	240	650	Mech Seals, Ball Bearing, Anodes, O-rings, Gaskets	240	2000	Shaft, Pump Casing, Impeller, Mech Seals, Ball Bearing, Anodes, O-rings, Gaskets
Pump Motor	30	25	Bearings, Seals, Electronics of Panels	180	1500	Complete Motor Replacement, Bearings, Seals, Electronics of Panels
Heat Exchangers	540	500	Gaskets, Strainer, Tube Sheets	540	1240	Complete tubes replacement, Strainer replacement, Baffles, Housing of cooler, Gaskets, Strainer, Tube Sheets,
Sea Chests	180	1200	Strainers repairs, Anodes, Isolation Valves parts, UW cleaning of grids, Coating re-application	240	3000	Strainers replacement, Complete replacement of Isolating Valves, UW cleaning or replacement of grids, Coating re-application
SWCS Piping	30	25	Flanges	180	3000	Piping replacement, coating application
Valves	30	150	Valve Seat, Gaskets	30	600	Complete Valve Replacement
Pump Coupling	30	50	Bolts & Nuts	30	300	Complete Coupling Replacement
Sensors	30	0	-	10	200	Complete Sensor Replacement

9.3 Παράρτημα III – Επιβεβαίωση Μοντέλου – Εφαρμογή στο λογισμικό GeNIe – Παράδειγμα Υπολογισμών

Στο λογισμικό GeNIe έγινε η επιβεβαίωση υπολογισμών του BNT που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή BN στο σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού. Ακολουθούν οι απεικονίσεις του μπεϋζιανού δικτύου όπως προκύπτουν από MATLAB και GeNIe καθώς και τα αποτελέσματα αυτών για τυχαία επιλεγμένες συνθήκες, χρονικά βήματα και χρονικά πλαίσια I&M. Η ακρίβεια και ισότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων δείχνει τη σωστή μοντελοποίηση και υπολογισμούς όπως εκτελέστηκαν στο MATLAB.

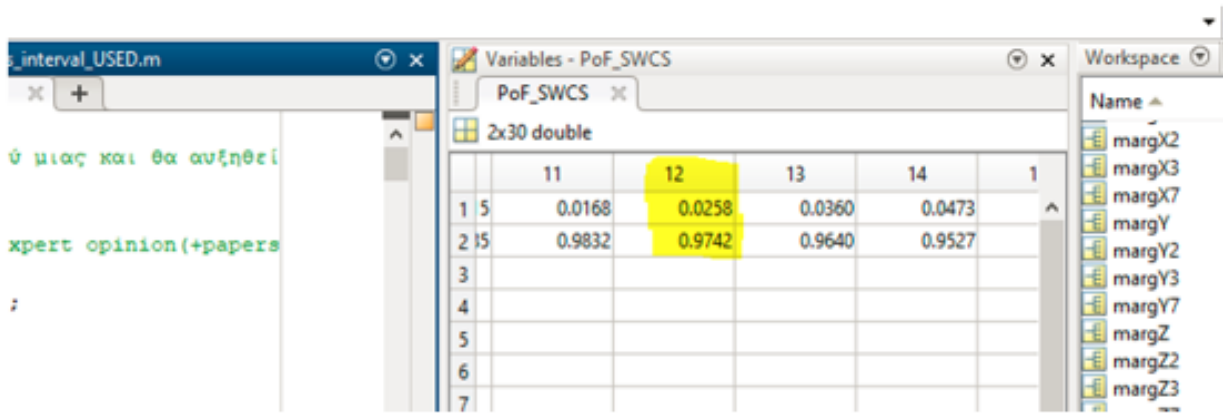


Σχήμα 9.1 Direct Acyclic Graph / Bayesian Network όπως απεικονίζεται στα αποτελέσματα της MATLAB

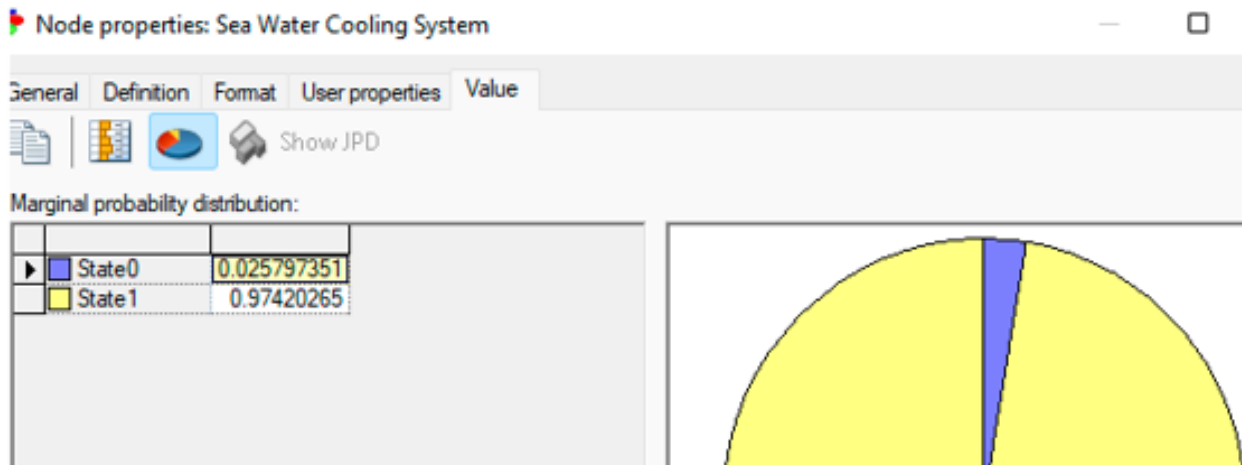


Σχήμα 9.2 DAG/BN όπως αναπτύχθηκε μέσω GeNIe

Ακολουθούν τα αποτελέσματα του κώδικα της MATLAB σε σύγκριση με αποτελέσματα ανάπτυξης του μοντέλου στο λογισμικό GeNIe και διεκπεραίωση υπολογισμών για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων.

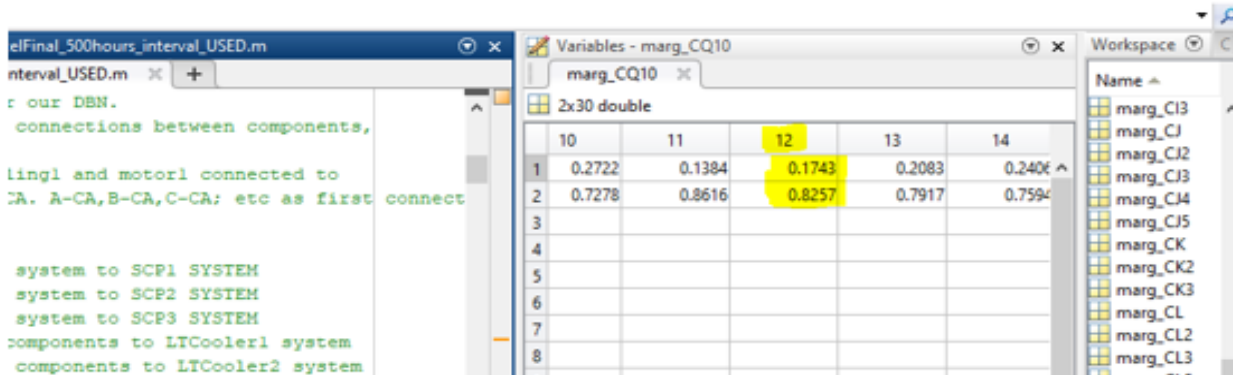


(α)

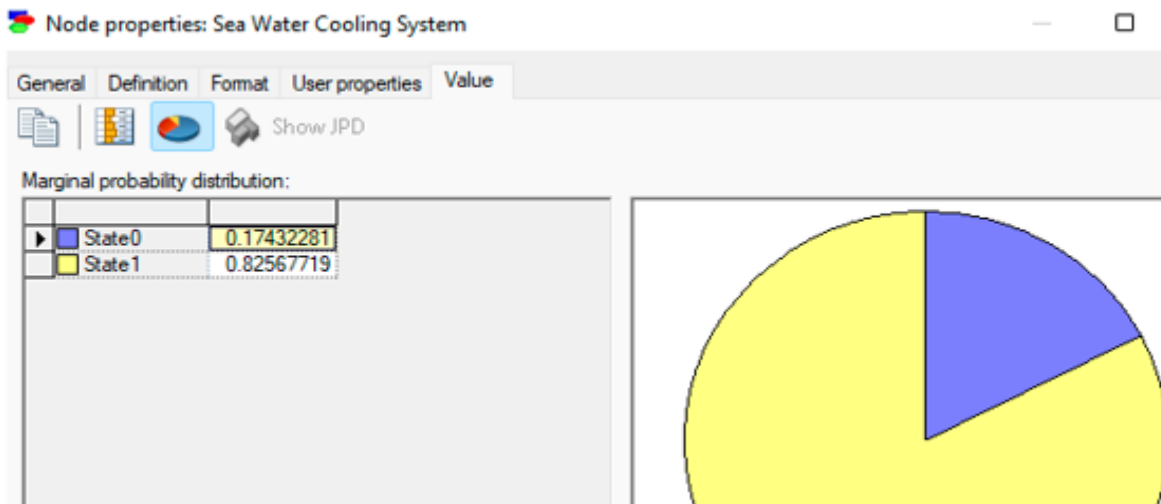


(β)

Σχήμα 9.3 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB(α) και GeNIe(β) για I&M 500 ωρών, 0.8 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 1200 ώρες λειτουργίας χωρίς πρότερη ένδειξη(evidence)

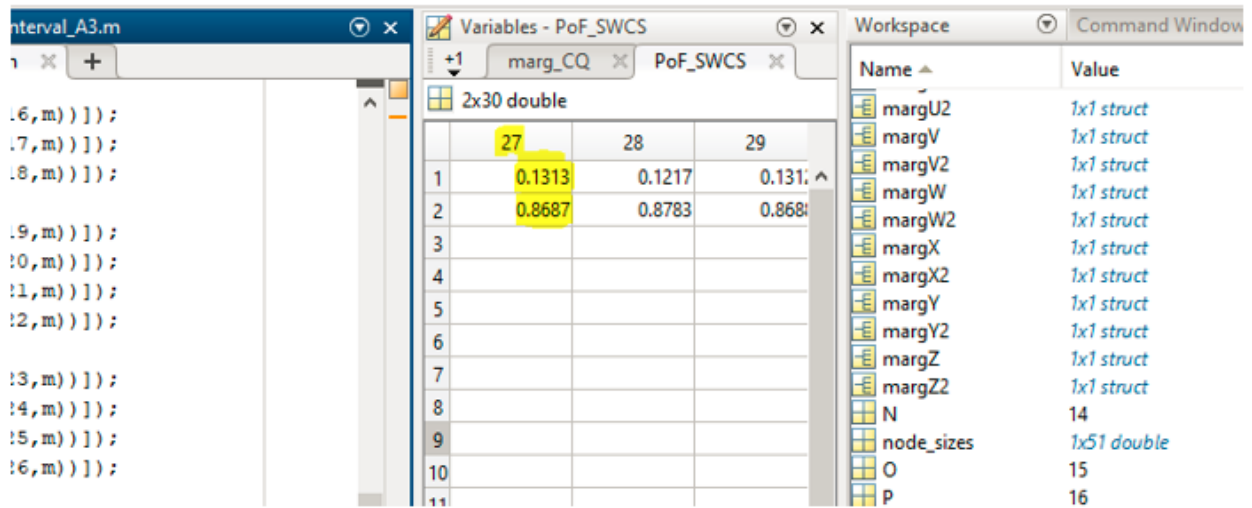


(α)

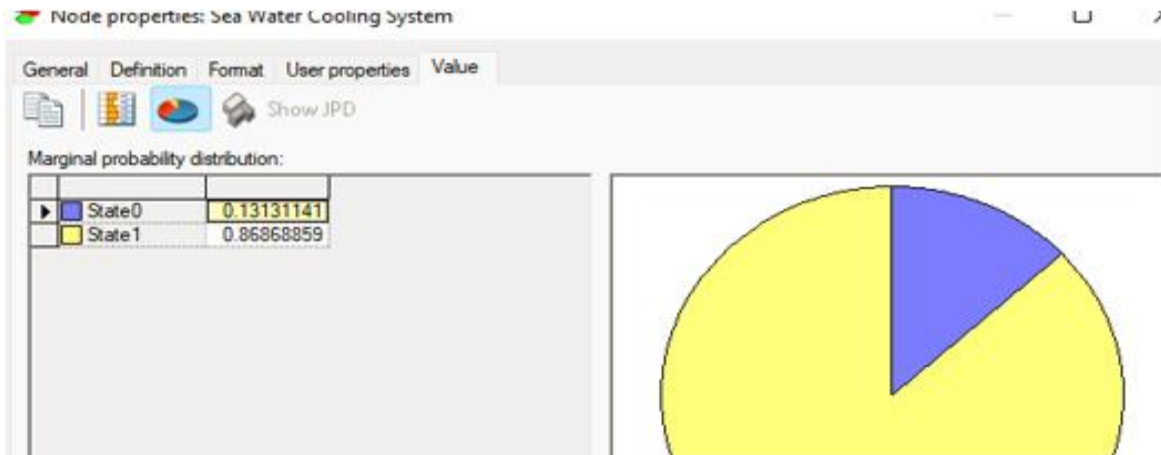


(β)

Σχήμα 9.4 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB(α) και GeNIe(β) για I&M 500 ωρών, 0.8 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 1200 ώρες λειτουργίας με ένδειξη πως μία αναρρόφηση θαλάσσης, μία αντλία και ένας εναλλάκτης έχουν αστοχήσει

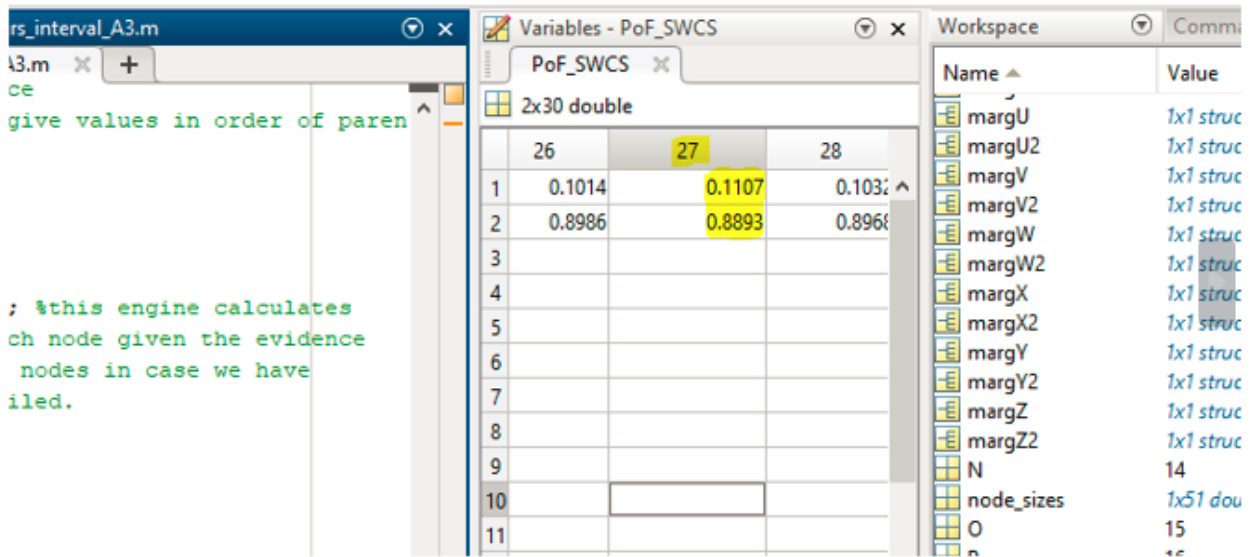


(α)

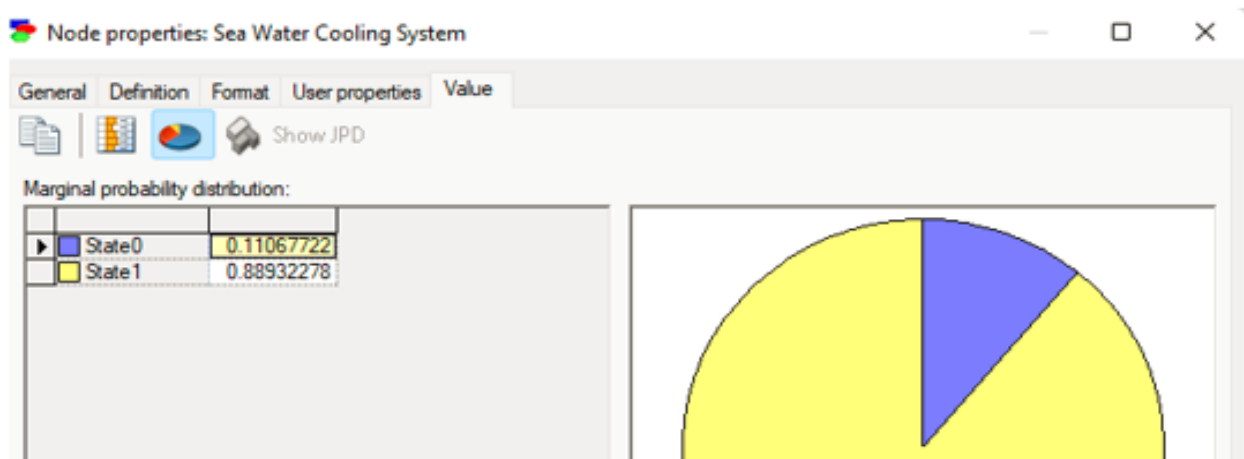


(β)

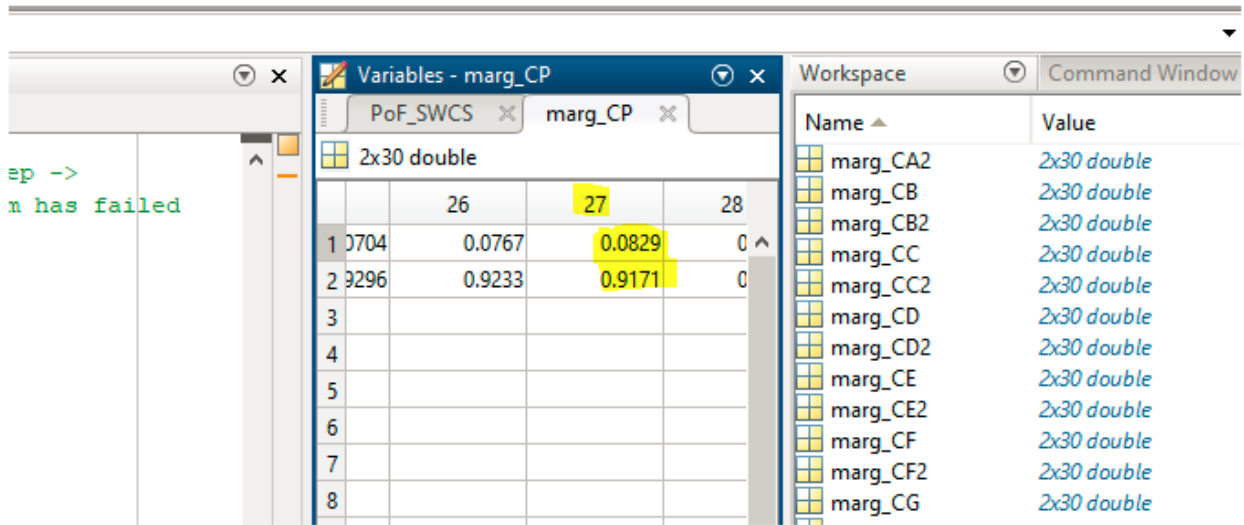
Σχήμα 9.5 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB και GeNIe για I&M 300 ωρών, 0.6 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 2700 ώρες λειτουργίας χωρίς πρότερη ένδειξη(Evidence)



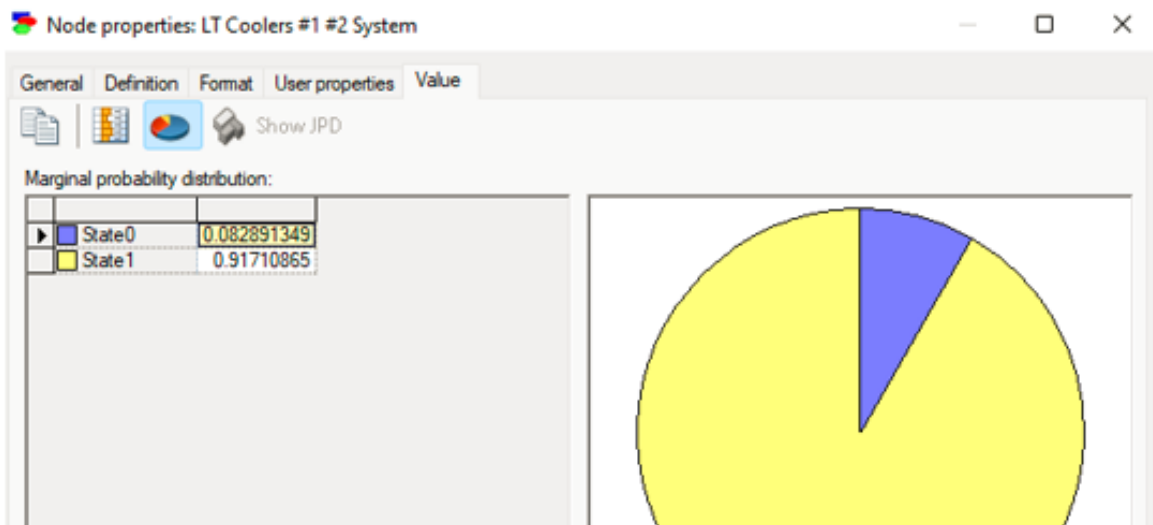
(α) Πιθανότητα Αστοχίας SWCS - MATLAB



(β) Πιθανότητα Αστοχίας SWCS - GeNIe



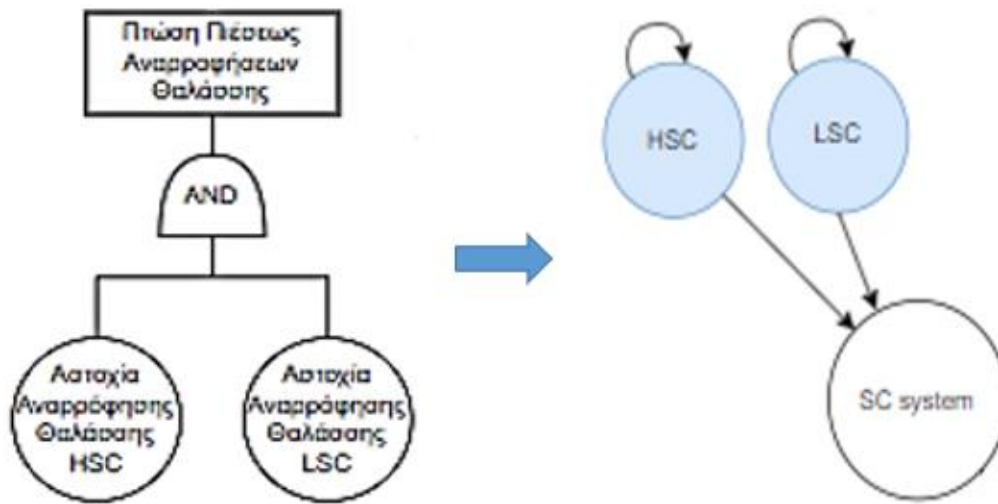
(γ) - Πιθανότητα Αστοχίας Συστήματος Εναλλακτών θερμότητας - MATLAB



(δ) Πιθανότητα Αστοχίας Συστήματος Εναλλακτών θερμότητας - GeNIe

Σχήμα 9.6 Αποτελέσματα κώδικα MATLAB και GeNIe για I&M 300 ωρών, 0.6 βαθμού αποτελεσματικότητας, στις 2700 ώρες λειτουργίας με ένδειξη πως η μία αναρρόφηση θαλάσσης λειτουργεί, ένας εναλλάκτης έχει αστοχήσει, τα μανόμετρα της αντλίας No. 3 έχουν χαλάσει και το μοτέρ της αντλίας No. 2 έχει αστοχήσει

Τέλος, ακολουθεί παράδειγμα υπολογισμού των μαθηματικών που εκτελούνται στα BN. Παρουσιάζεται για το σύστημα αναρρόφησης του δικτύου με σύγκριση των αποτελεσμάτων των πράξεων του BN με Α) Τα αποτελέσματα του FT Β) Τα αποτελέσματα του κώδικα της MATLAB και Γ) Τα αποτελέσματα του GeNIe. Παρουσιάζονται αρχικά τα FT και BN του υπό μελέτη συστήματος αναρρόφησης Σχήμα 9.7.



Σχήμα 9.7 Παράδειγμα υπολογισμού στο σύστημα αναρρόφησης θαλάσσης του υπό μελέτη δικτύου – Δένδρο Σφαλμάτων και Δυναμικό Μπεϋζιανό Δίκτυο

Θα εκτελεστούν οι πράξεις για το άνωθεν σύστημα στο χρόνο $t=1500$ ώρες λειτουργίας. Με τη χρήση της εκθετικής κατανομής, υπολογίζονται οι πιθανότητες αστοχίας της κάθε αναρρόφησης ως εξής (Πίνακας 6.1):

- Failure Rate of Sea Chest High = $5,59E-04$
- Failure Rate of Sea Chest Low = $5,59E-04$

Probability of Failure of Sea Chest High = $P(SCH = \text{failed}) = 1 - e^{-(5,59E-04) \cdot 1500} = 0.225$

Probability of Failure of Sea Chest Low = $P(SCL = \text{failed}) = 1 - e^{-(5,59E-04) \cdot 1500} = 0.225$

SC High	FAIL	0.225
	WORK	0.775

SC Low	FAIL	0.225
	WORK	0.775

A) Δένδρο σφαλμάτων → AND GATE

$P(\text{SCsystem} = \text{failed}) = P(\text{SCH}=\text{failed}) * P(\text{SCL}=\text{failed}) = 0.225 * 0.225 = \mathbf{0.050625}$

B) Μπεϋζιανό Δίκτυο → Πίνακας Δεσμευμένων Πιθανοτήτων CPT(SCsystem | SCL,SCH)

CPT of node: SCsystem	SC Low	FAIL		WORK	
	SC High	FAIL	WORK	FAIL	WORK
SCsystem states	FAIL	1	0	0	0
	WORK	0	1	1	1

Μέσω της χρήσης του κανόνα της ολικής πιθανότητας και του θεωρήματος Bayes όπως παρουσιάστηκαν στο κεφ. 4.1, η πιθανότητα του υπό μελέτη συστήματος, και άρα η κατανομή πιθανότητας του συστήματος αναρροφήσεων, υπολογίζεται ως εξής:

$$P(\text{SCsystem}, \text{SCH}, \text{SCL}) = P(\text{SCsystem} | \text{SCH}, \text{SCL}) P(\text{SCH} | \text{SCL}) P(\text{SCL}) \quad (\text{II})$$

Επισημαίνεται πως τα γεγονότα «αστοχία του SCH» και «αστοχία του SCL» είναι ανεξάρτητα.

$$(\text{II}) = P(\text{SCsystem} | \text{SCH}, \text{SCL}) P(\text{SCH}) P(\text{SCL})$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.225 \\ 0.775 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.225 \\ 0.775 \end{bmatrix} \quad (\text{III})$$

Κατά την εκτέλεση πράξεων στα BN μέσω της τεχνικής της περιθωριοποίησης (marginalization), εκτελούνται πράξεις για τις διάφορες καταστάσεις ενός κόμβου και έτσι ο επιλεγμένος κόμβος περιθωριοποιείται από ένα γινόμενο όπως το (III) ώστε να καταλήξουν οι υπολογισμοί σε υπολογίσιμα γινόμενα όπως στο παρόν παράδειγμα στο γινόμενο $P(\text{SCsystem} | \text{SCH}) * P(\text{SCH})$.

$$\begin{aligned} (\text{III}) &= \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.225 \\ 0.775 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.225 \\ 0.775 \end{bmatrix} \right] * \begin{bmatrix} 0.225 \\ 0.775 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.225 & 0 \\ 0.775 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.225 \\ 0.775 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0.050625 \\ 0.949375 \end{bmatrix} = P(\text{SCsystem}) \end{aligned}$$

Άρα η πιθανότητα αστοχίας τους συστήματος των αναρροφήσεως θαλάσσης είναι:

$$P(\text{SCsystem} = \text{failed}) = \mathbf{0.050625}$$

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της MATLAB και του GeNIe με αποκόμματα από τις εκτελέσεις τους στο εκάστοτε λογισμικό:

$$\text{MATLAB} \rightarrow P(\text{SCsystem} = \text{failed}) = \mathbf{0.050645087...}$$

$$\text{GeNIe} \rightarrow P(\text{SCsystem} = \text{failed}) = \mathbf{0.050625}$$

The screenshot shows a MATLAB workspace with several files open. The Command Window displays the following output:

```

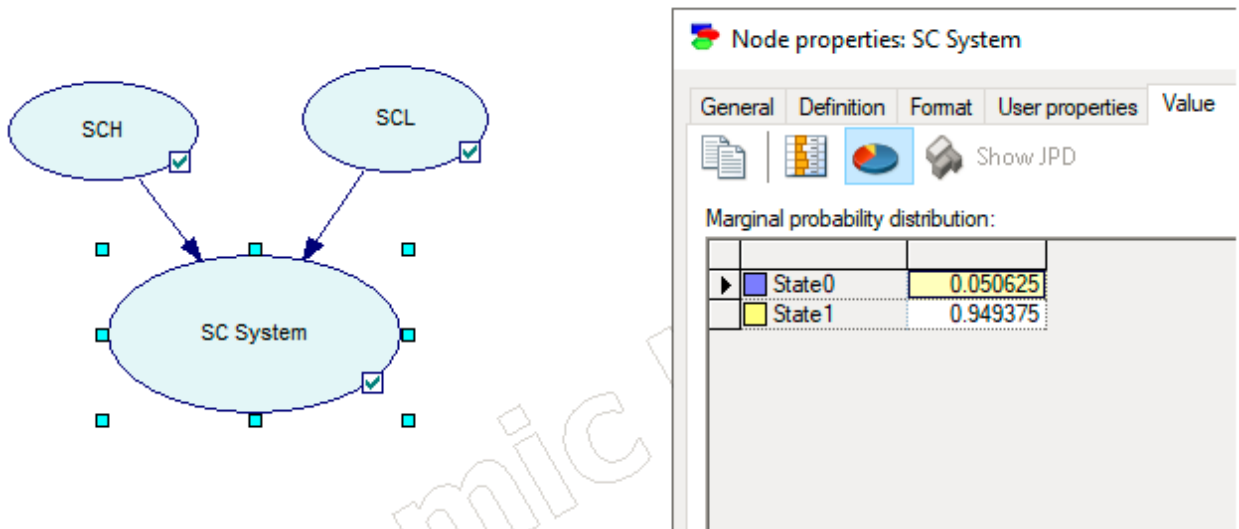
ans =
    0.225044633752866
    0.774955366247134

ans =
    0.225044633752866
    0.774955366247134

ans =
    0.050645087180962
    0.949354912819038

fx >> |
    
```

Σχήμα 9.8 Αποτελέσματα MATLAB P(SCsystem=failed) για t=1500 ώρες λειτουργίας



Σχήμα 9.9 Αποτελέσματα GeNIe P(SCsystem=failed) για t=1500 ώρες λειτουργίας

Η διαφορά που παρατηρείται στα αποτελέσματα του κώδικα στη MATLAB είναι απόρροια της μεγαλύτερης ακρίβειας που ακολουθείται κατά την εκτέλεση των πράξεων σε αυτή.

--- Τέλος εγγράφου ---