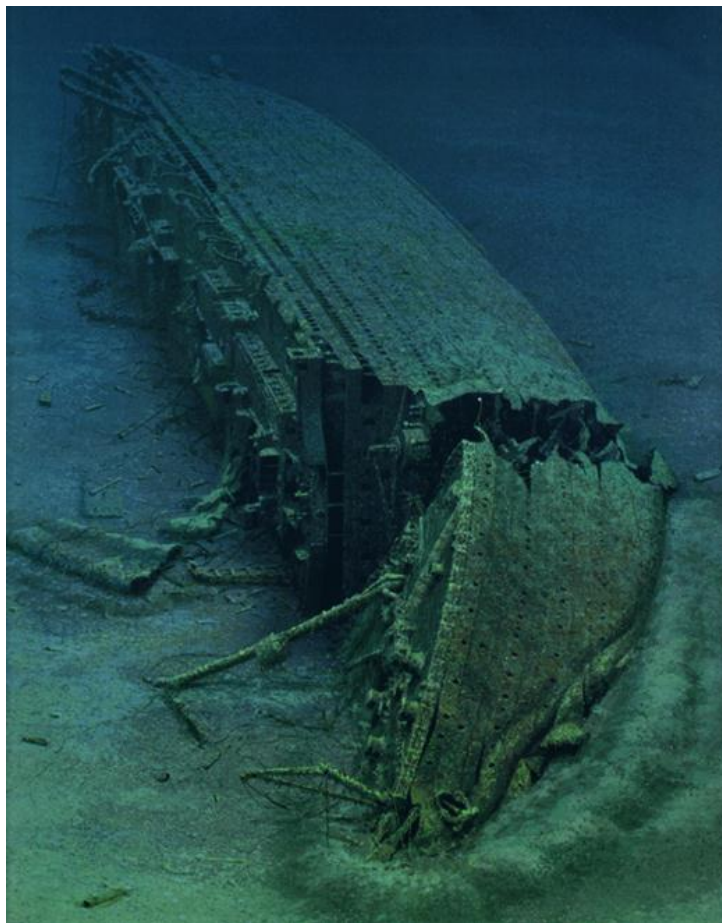




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΙΣΚΟΥ ΓΙΑ ΝΑΥΑΓΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ



Όνοματεπώνυμο: Κωνσταντίνος Λούζης

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

Ιούλιος 2011

Μελέτη Ρίσκου για Ναυάγια στην Ελλάδα

Ανάπτυξη μοντέλου για την εκτίμηση της επικινδυνότητας για το περιβάλλον της διαρροής πετρελαίου από πλήρως βυθισμένα ναυάγια

Ονοματεπώνυμο: Κωνσταντίνος Λούζης

Επιβλέπων: Νικόλαος Βεντίκος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ιούλιος 2011

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Μεταφορών
Εργαστήριο Θαλασσίων Μεταφορών

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	2
Κατάλογος Πινάκων	4
Κατάλογος Σχημάτων	5
Abstract	8
Περίληψη	10
1. Εισαγωγή	12
2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση	17
3. Εισαγωγή στη Θεωρία της Ασαφούς Λογικής	27
3.1. Εισαγωγή	27
3.2. Ασαφή σύνολα	30
3.3. Συναρτήσεις Συμμετοχής	38
3.4. Defuzzification	41
3.5. Ασαφείς Κανόνες	46
3.6. Ασαφή Συστήματα	49
4. Ρίσκο, Αβεβαιότητα, και Ανάλυση	63
4.1. Ορισμός	63
4.2. Είδη Αβεβαιότητας	66
4.3. Ανάλυση Ρίσκου	67
5. Περιγραφή Μεθοδολογίας	68
5.1. Πορεία Υπολογισμών	68
5.2. Βάση Δεδομένων	69
5.3. Πιθανή ποσότητα πετρελαίου	77
5.4. Ανάλυση Ρίσκου	85
5.5. Ανάλυση αβεβαιότητας	115
6. Αποτελέσματα	119
6.1. Βάση δεδομένων	119
6.2. Πιθανή ποσότητα πετρελαίου	131
6.3. Ανάλυση ρίσκου	138
6.4. Δοκιμή μοντέλου	153
6.5. Ανάλυση Αβεβαιότητας	159
7. Συμπεράσματα	163

Α΄ Παράρτημα	166
Α΄.1. Γεωγραφικά Δεδομένα και Μέθοδος Ανάλυσης	166
Βιβλιογραφία	171

Κατάλογος Πινάκων

3.1. Κανονική μορφή απλών ασαφών κανόνων	47
5.1. Πηγές στο διαδίκτυο	70
5.2. Προτιμώμενες ομάδες πληροφοριών ανάλογα με την πηγή	72
5.3. Πεδία πληροφοριών βάσης δεδομένων	75
5.4. Ποσοστά πληρότητας	78
5.5. Ποσοστιαία κατανομή των πλοίων του δείγματος σε κατηγορίες	78
5.6. Ποσοστιαία κατανομή των πλοίων του δείγματος σε κατηγορίες	80
5.7. Ποσοστιαία κατανομή των πλοίων του δείγματος σε κατηγορίες	82
5.8. Στατιστικά μεγέθη δειγμάτων	82
5.9. Τυπικές τιμές του λόγου καύσιμα προς μέγεθος πλοίου, κατά κατηγορία πλοίου	83
5.10. Σχέσεις παλινδρόμησης συναρτήσει ολικής χωρητικότητας	84
5.11. Σχέσεις παλινδρόμησης πλοίου συναρτήσει μήκους μεταξύ καθέτων	84
5.12. Κατάταξη κριτηρίων ρίσκου σύμφωνα με την παράμετρο που επηρεάζουν	87
5.13. Κατάταξη κριτηρίων ρίσκου σε ποσοτικά και ποιοτικά	88
5.14. Ορισμός μεταβλητών εισόδου	90
5.15. Κλίμακα κατάταξης επιπέδου έκτασης βλαβών	103
5.16. Παράμετροι θεωρητικών κατανομών κατά τύπο πλοίου	117
6.1. Εκτιμήσεις για την πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου	131
6.2. Στατιστικά στοιχεία των κατανομών τιμών για τις μεταβλητές εξόδου	138
6.3. Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο ασαφούς λογικής	155
6.4. Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου	156
6.5. Δεδομένα εισόδου για το υπολογιστικό μοντέλο	156
6.6. Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου	157

Κατάλογος Σχημάτων

1.1. Προσεγγιστική κατανομή των πλήρως βυθισμένων ναυαγίων παγκοσμίως [46]	13
3.1. Δομή απλού ασαφούς συστήματος	30
3.2. Συμπλήρωμα ασαφούς συνόλου	33
3.3. Ένωση δύο ασαφών συνόλων A και B	33
3.4. Τομή δύο ασαφών συνόλων A και B	34
3.5. Χαρακτηριστικά στοιχεία συνάρτησης συμμετοχής	39
3.6. Είδη ασαφούς συνόλου A με κριτήριο την κανονικότητα	40
3.7. Είδη ασαφούς συνόλου A με κριτήριο την κυρτότητα	40
3.8. Τομή δύο ασαφών συνόλων	41
3.9. Τυπικό ασαφές αποτέλεσμα	42
3.10. Μέθοδος της μέγιστης συμμετοχής	43
3.11. Μέθοδος κεντροειδούς	44
3.12. Μέθοδος σταθμικού μέσου	44
3.13. Μέθοδος του μέσου όρου των μεγίστων	45
3.14. Μέθοδος του κέντρου των αθροισμάτων	45
3.15. Μέθοδος της μέγιστης επιφάνειας	46
3.16. Μέθοδος του πρώτου μέγιστου ή του τελευταίου μέγιστου	46
3.17. Ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων	50
3.18. Ασαφές σύστημα Mamdani δύο εισόδων, με δύο κανόνες	52
3.19. Defuzzification με τη μέθοδο του κέντρου μάζας	54
3.20. Defuzzification με τη μέθοδο του μέσου όρου των μεγίστων	54
3.21. Διάγραμμα ασαφούς συστήματος	54
3.22. Κανόνας Sugeno	56
3.23. Παράδειγμα ορισμού κανόνων και συναρτήσεων συμμετοχής	57
3.24. Γενική ιεραρχική δομή ασαφών συστημάτων	59
3.25. Είδη ιεραρχικής δομής	59
3.26. Ιεραρχική δομή δύο επιπέδων	61
5.1. Πορεία μεθοδολογίας	68
5.2. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην	79
5.3. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου	79
5.4. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	80
5.5. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πετρελαιοφόρα	80
5.6. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα επιβατηγά πλοία	81
5.7. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία απόθεσης καλωδίων	81
5.8. Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Ηλικία ναυαγίου»	94
5.9. Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Κρίσιμο Βάθος»	94
5.10. Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Βάθος», implosion	95
5.11. Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Βάθος», διάβρωση	95
5.12. Συνάρτηση συμμετοχής: «Απόσταση από τον κοντινότερο οικονομικό στόχο»	96
5.13. Συνάρτηση συμμετοχής: «Απόσταση από περιοχή NATURA 2000»	96

5.14. Συνάρτηση συμμετοχής: «Απόσταση από την κοντινότερη ακτή»	97
5.15. Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Υδροστατική πίεση»	97
5.16. Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Λειτουργική ζωή πλοίου»	98
5.17. Συνάρτηση συμμετοχής: «Πιθανή εγκλωβισμένη ποσότητα πετρελαίου»	98
5.18. Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Μέγεθος πλοίου»	105
5.19. Γενική δομή του μοντέλου ασαφούς λογικής με τους βασικούς παράγοντες .	105
5.20. Κλάδος εκτίμησης έντασης των συνεπειών	106
5.21. Υποσύστημα για το δυναμικό της ρύπανσης από το φορτίο πετρέλαιο	106
5.22. Κίνδυνος προσέγγισης του διαρρέοντος πετρελαίου στους κοντινούς στόχους	107
5.23. Κλάδος εκτίμησης της επικινδυνότητας για τη διαρροή του πετρελαίου	108
5.24. Υποσύστημα εκτίμησης της αντοχής της γάστρας του ναυαγίου	108
5.25. Μεταβολή των ιδιοτήτων του θαλασσινού νερού σε συνάρτηση με το βάθος .	109
5.26. Θερμοκρασία - Βάθος στην περιοχή του Αιγαίου	109
5.27. Υποσύστημα αξιολόγησης των βλαβών της γάστρας του ναυαγίου	109
5.28. Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης της αντοχής της γάστρας του ναυαγίου	110
5.29. Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης των βλαβών της γάστρας του ναυαγίου	111
5.30. Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης του κινδύνου διαρροής πετρελαίου .	112
5.31. Κανόνες: εκτίμηση των επιπτώσεων για τις ευαίσθητες περιοχές	112
5.32. Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης των επιπτώσεων για την ακτή	113
5.33. Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης της έντασης των συνεπειών	113
5.34. Κανόνες για το υποσύστημα για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου .	114
5.35. Επιφάνεια τιμών περιβαλλοντικού ρίσκου	114
6.1. Σημαίες πλοίων	121
6.2. Αριθμός ναυαγίων ανά δεκαετία	121
6.3. Κατανομές πλοίων με διάφορα κριτήρια	122
6.4. Κατανομές πλοίων με διάφορα κριτήρια	123
6.5. Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο τον τύπο του ατυχήματος	124
6.6. Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων: διάρκεια λειτουργικής ζωής	125
6.7. Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο το μέγεθος (μήκος <i>LBP</i>)	126
6.8. Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο την ηλικία	127
6.9. Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων σε παράκτιες περιοχές	128
6.10. Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων: κατηγορία και λειτουργία	129
6.11. Συγκέντρωση ναυαγίων κατά γεωγραφική περιοχή	130
6.12. Κατανομές πετρελαίου / πλοίο με διάφορα κριτήρια	133
6.13. Ιστόγραμμα συχνοτήτων εγκλωβισμένου πετρελαίου	134
6.14. Συσχέτιση ηλικίας ναυαγίου με την μέση ποσότητα πετρελαίου ανά πλοίο . . .	134
6.15. Γεωγραφική κατανομή για την πιθανή ποσότητα καυσίμου	135
6.16. Γεωγραφική κατανομή για την πιθανή ποσότητα φορτίου πετρελαίου	136
6.17. Συγκέντρωση εγκλωβισμένου πετρελαίου κατά γεωγραφική περιοχή	137
6.18. Κίνδυνος διαρροής πετρελαίου για κάθε ναυάγιο	140
6.19. Ένταση συνεπειών για κάθε ναυάγιο (κάτω όριο εκτίμησης)	141
6.20. Ένταση συνεπειών για κάθε ναυάγιο (άνω όριο εκτίμησης)	142
6.21. Επίπεδο περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναυάγιο (κάτω όριο εκτίμησης) .	143
6.22. Επίπεδο περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναυάγιο (άνω όριο εκτίμησης) . .	144
6.23. Ιστόγραμμα τιμών για την ένταση συνεπειών	145
6.24. Ιστόγραμμα τιμών για το περιβαλλοντικό ρίσκο	145
6.25. Περιοχές με παρόμοια ένταση συνεπειών	146
6.26. Περιοχές με παρόμοιο περιβαλλοντικό ρίσκο	147
6.27. Επίπεδο έντασης συνεπειών για προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000 .	148

6.28. Περιοχές με παρόμοια επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου	149
6.29. Σύγκριση κατά γεωγραφική περιοχή: επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου . .	149
6.30. Σύγκριση κατά γεωγραφική περιοχή για την ένταση των συνεπειών	150
6.31. Σύγκριση κατά γεωγραφική περιοχή για το περιβαλλοντικό ρίσκο	151
6.32. Ασφαλείς και επικίνδυνες περιοχές	152
6.33. Pearl Harbor, Hawai - Τοποθεσία του ναυαγίου USS Arizona	153
6.34. Βηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου	157
6.35. Βηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου	158
6.36. Σύγκριση περιοχών με παρόμοιο περιβαλλοντικό ρίσκο (κάτω όριο)	161
6.37. Σύγκριση περιοχών με παρόμοιο περιβαλλοντικό ρίσκο (άνω όριο)	162
A'.1. Στοιχεία βαθμμετρίας για την Ελλάδα	168
A'.2. Γεωγραφική έκταση προστατευόμενων περιοχών NATURA 2000	168
A'.3. Γεωγραφική έκταση των παράκτιων περιοχών	169
A'.4. Κατάταξη των Ελληνικών ακτών κατά τύπο	169
A'.5. Επιφανειακή θαλάσσια κυκλοφορία	170
A'.6. Γεωγραφικός χάρτης ανάλυσης	170

Abstract

The consequences on the stability of the environment that stem from the extended use of fossil fuels, has motivated the international community to develop new ways of dealing and preventing environmental pollution. The maritime industry has been similarly motivated to reduce the operational as well as the accidental ship source pollution. A ship might carry a large number of various substances that are potentially dangerous to the environment in case they are released. The most common pollutant on board a ship is the oil that is carried either as fuel for propulsion or power generation or as cargo. The involvement of a ship in an accident often leads to sinking and oil being trapped inside the wreck. The effect of the corrosive environment of the sea on the hull of the ship leads to either chronic or sudden discharges of the trapped oil.

Oil leaking from a shipwreck can have devastating environmental effects, more so in the event that they are not detected in time. To determine the magnitude of the danger there are two main steps, recording the shipwrecks and estimating or verifying, through on-site surveys, the amount of trapped oil quantities. A detailed and comprehensive risk analysis can contribute to the pro-active neutralization of the shipwrecks to avoid pollution from a potential leak. Such an analysis should include the estimation of the probability of an oil discharge as well as the assessment of the consequence severity. Furthermore, a risk analysis is important for the allocation of the limited available financial resources depending on the risk of each shipwreck.

This thesis deals with the development and application of a risk analysis approach regarding the importance and fate of shipwrecks in Greece. The analysis includes recording the shipwrecks in the Greek waters. Additionally, a methodology is proposed for the preliminary risk assessment to prioritize the shipwrecks according to the magnitude of the environmental risk attributed to each one. The basic tools that are employed are a fuzzy inference system and a GIS system, which have been developed specially for this work. The proposed methodology can be integrated into a decision making system, whose purpose will be to estimate the magnitude of the danger and to allocate the available financial resources.

The methodology involves the collection of data and information, the estimation of potential remaining oil quantities on-board each shipwreck, the assessment of the environmental risk, the statistical and geographical analysis of the results, testing of the model, and finally an uncertainty analysis. The necessary data and information were collected from a number of various sources and were finally organized into a dedicated shipwreck database. The database contains tanker vessels over 150 GRT and non-tanker vessels over 400 GRT, with steel hulls, and fuel oil used for propulsion. The estimation of the trapped oil quantities is necessitated by the lack of available data and was based on the estimation of the maximum permissible fuel and payload quantities. The uncertainty over the actual oil quantities on-board each shipwreck was modeled by a range of values. An hierarchical fuzzy inference system was developed for the assessment of the environmental risk using a series of risk criteria. Furthermore, statistical and geographical analyses of the results were applied to detect geographical correlations and mark the areas that have the higher risk from a probable oil release. The testing of the model was accomplished by feeding the data of two shipwrecks, which are not part of the database, namely the

warships USS Arizona and USS Mississinewa. The process is concluded by determining the sources of uncertainty for the system and implementing an uncertainty analysis to determine their relative effect on the uncertainty of the environmental risk of each shipwreck.

The compiled database contains 402 records of shipwrecks that sank after 1940. Tanker ships consist 7% of the database, while merchant non-tankers and warships 78% and 15% respectively. Most recorded incidents happened during the decade 1940 - 1950. The total remaining oil quantity is estimated from approximately 18,000 to 133,000 tons. About 55% of these quantities is located on-board tanker ships. Furthermore, most of the trapped oil resides in shipwrecks at least 15 years old. The risk assessment results show that the majority of shipwrecks pose a *significant environmental risk*. The geographical analysis of the results shows that the areas of the Gulfs of Saronikos, Thermaikos, and Patraikos are exposed to the greatest cumulative risk relative to the other areas. The uncertainty analysis results show that in tanker ships the cargo quantity has the greatest effect on the uncertainty of the environmental risk.

The calculation of the remaining oil quantities indicates that there might be significant oil quantities trapped in the recorded shipwrecks, although the estimation process has an inherent uncertainty factor. From the geographical analysis it is concluded that: a) areas that contain old shipwrecks in small depths are exposed to high danger of oil release, and b) areas with large concentration of estimated remaining oil and shipwrecks that lie within a small distance from the shore and the protected areas are characterized by high consequence severity. Furthermore, areas where main ports are located and also have large concentration of trapped oil are high risk areas. Finally, it is concluded that the oil release from sunken shipwrecks is an actual danger and that the fuzzy inference system, which was developed, can contribute to addressing the problem by supporting a broader decision making process.

Περίληψη

Οι αρνητικές επιδράσεις για την ισορροπία του περιβάλλοντος, από την αλόγιστη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων, έχει κινητοποιήσει τη διεθνή κοινότητα προς την ανάπτυξη καινούριων τρόπων αντιμετώπισης και αποφυγής της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Η ναυτική βιομηχανία έχει κινητοποιηθεί για τον περιορισμό τόσο της επιχειρησιακής όσο και της ατυχηματικής ρύπανσης. Ένα πλοίο μπορεί να μεταφέρει πολλές διαφορετικές ουσίες που μπορεί να είναι επικίνδυνες για το περιβάλλον στην περίπτωση διαρροής. Ο πιο κοινός ρυπαντής που μεταφέρει ένα πλοίο είναι το πετρέλαιο, ή ως καύσιμο για πρόωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε ως φορτίο. Η εμπλοκή ενός πλοίου σε ατύχημα συχνά καταλήγει στη βύθιση αυτού και πολλές φορές εγκλωβίζονται στις δεξαμενές του ποσότητες πετρελαιοειδών. Η επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος του θαλασσινού νερού στη μεταλλική κατασκευή της γάστρας οδηγεί ή σε χρόνιες είτε σε ξαφνικές διαρροές του εγκλωβισμένου πετρελαίου.

Οι διαρροές πετρελαίου από ένα ναυάγιο μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες για το περιβάλλον, από τη στιγμή μάλιστα που μπορεί να μην γίνουν άμεσα αντιληπτές. Ο προσδιορισμός του μεγέθους του κινδύνου προϋποθέτει αρχικά την καταγραφή των ναυαγίων και κατόπιν την εκτίμηση ή εξακριβίωση, μέσω επί τόπου έρευνας, των εγκλωβισμένων ποσοτήτων πετρελαίου σε ένα ναυάγιο. Μια λεπτομερής και ολοκληρωμένη ανάλυση ρίσκου μπορεί να συνεισφέρει στην προληπτική αδρανοποίηση των ναυαγίων και επομένως την αποφυγή της ρύπανσης από μια πιθανή διαρροή. Μια τέτοια ανάλυση πρέπει να περιλαμβάνει τόσο τον υπολογισμό της πιθανότητας διαρροής όσο και μια εκτίμηση του μεγέθους των συνεπειών. Επιπλέον, η ανάλυση ρίσκου είναι σημαντική για τον καταμερισμό των, συνήθως περιορισμένων, διαθέσιμων οικονομικών πόρων ανάλογα με το ρίσκο κάθε ναυαγίου.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την ανάπτυξη και εφαρμογή μιας προσέγγισης στην ανάλυση ρίσκου που σχετίζεται με τη σπουδαιότητα και την τύχη των ναυαγίων στην Ελλάδα. Η ανάλυση περιλαμβάνει την καταγραφή των ναυαγίων στην Ελλάδα. Επιπλέον προτείνεται μια μεθοδολογία προκαταρκτικής ανάλυσης ρίσκου για την κατάταξη των ναυαγίων σύμφωνα με το μέγεθος του περιβαλλοντικού ρίσκου του καθενός. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι ένα σύστημα ασαφούς λογικής και ένα σύστημα GIS, τα οποία αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να ενταχθεί σε ένα σύστημα λήψεως αποφάσεων που θα έχει στόχο τόσο την εκτίμηση του μεγέθους της επικινδυνότητας όσο και τον καταμερισμό των διαθέσιμων οικονομικών πόρων.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε συμπεριλαμβάνει συλλογή δεδομένων και πληροφοριών, εκτίμηση των ποσοτήτων πετρελαίου που μπορεί να έχουν εγκλωβιστεί σε κάθε ναυάγιο, εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου, στατιστική και γεωγραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων, δοκιμή μοντέλου και αξιολόγηση, και τέλος ανάλυση αβεβαιότητας. Τα απαραίτητα δεδομένα και πληροφορίες συγκροτήθηκαν από διάφορες πηγές και οργανώθηκαν σε μια ειδική βάση δεδομένων. Σε αυτή συμπεριλήφθηκαν πετρελαιοφόρα άνω των 150 GRT και λοιπά πλοία άνω των 400 GRT, με μεταλλική γάστρα, και εγκατάσταση πρόωσης που χρησιμοποιεί καύσιμο πετρέλαιο. Η εκτίμηση των εγκλωβισμένων ποσοτήτων πετρελαίου είναι αναγκαία εξαιτίας της έλλειψης πληροφοριών και βασίστηκε στην εκτίμηση της μέγιστης μεταφερόμενης ποσότητας καυσίμων και του ωφέλιμου φορτίου για τα πετρελαιοφόρα. Η αβεβαιότητα για τις πραγματικές ποσότητες που βρίσκονται στο ναυάγιο μοντελοποιήθηκε με τη χρήση ενός διαστήματος τιμών. Για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου,

αναπτύχθηκε ένα σύστημα ασαφούς λογικής με ιεραρχική δομή που χρησιμοποιεί μια σειρά κριτηρίων ρίσκου. Κατόπιν έγινε η στατιστική και γεωγραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων να εντοπιστούν γεωγραφικές συσχετίσεις και να σημανθούν οι περιοχές που απειλούνται περισσότερο από πιθανές διαρροές πετρελαίου. Η δοκιμή του μοντέλου έγινε σε δύο ναυάγια, τα οποία δεν περιέχονται στη βάση δεδομένων, τα πολεμικά πλοία USS Arizona και USS Mississinewa. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον προσδιορισμό των πηγών της αβεβαιότητας του συστήματος και την ανάλυση αβεβαιότητας ώστε να εξακριβωθεί η σχετική επίδραση αυτών στην αβεβαιότητα του περιβαλλοντικού ρίσκου κάθε ναυαγίου.

Η βάση δεδομένων που καταρτίστηκε περιέχει 402 εγγραφές ναυαγίων που βυθίστηκαν μετά το 1940. Τα πετρελαιοφόρα πλοία αποτελούν το 7% των περιπτώσεων, τα εμπορικά μη πετρελαιοφόρα το 78%, και τα πολεμικά πλοία το 15%. Τα περισσότερα πλοία που καταγράφονται βυθίστηκαν τη δεκαετία 1940 - 1950. Η συνολική ποσότητα πετρελαίου που εκτιμάται ότι βρίσκεται εγκλωβισμένη στα ναυάγια της βάσης δεδομένων κυμαίνεται από περίπου 18,000 έως 133,000 tons. Περίπου το 55% αυτής της ποσότητας εκτιμάται ότι συγκεντρώνεται στα πετρελαιοφόρα πλοία. Επιπλέον η μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου εκτιμάται ότι βρίσκεται σε πλοία που βρίσκονται βυθισμένα για διάστημα περίπου 15 ετών. Η εκτίμηση του ρίσκου δείχνει ότι τα περισσότερα ναυάγια έχουν *σημαντικό περιβαλλοντικό ρίσκο*. Η γεωγραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι οι περιοχές του Σαρωνικού, του Θερμαϊκού, και του Πατραϊκού Κόλπου εκτίθενται στο μεγαλύτερο ανθρωπιστικό ρίσκο σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Από την ανάλυση αβεβαιότητας προκύπτει ότι στα πετρελαιοφόρα πλοία η ποσότητα του φορτίου έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στην αβεβαιότητα του περιβαλλοντικού ρίσκου.

Ο υπολογισμός των ποσοτήτων πετρελαίου υποδεικνύει ότι μπορεί να υπάρχουν σημαντικές ποσότητες εγκλωβισμένες στα καταγεγραμμένα ναυάγια, αν και η διαδικασία της εκτίμησης χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα. Από τη γεωγραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων του ρίσκου προκύπτει ότι: α) μεγάλη επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου εμφανίζεται σε περιοχές όπου βρίσκονται παλαιά ναυάγια σε μικρά βάθη, και β) μεγάλη ένταση συνεπειών εμφανίζεται σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση της εκτιμώμενης ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου, και τα ναυάγια βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τις ακτές και τις προστατευόμενες περιοχές. Επιπλέον, μεγάλο ρίσκο εμφανίζεται στις περιοχές όπου βρίσκονται κύρια λιμάνια και εμφανίζεται μεγάλη συγκέντρωση ναυαγίων και ποσοτήτων εγκλωβισμένου πετρελαίου. Τέλος συμπεραίνεται ότι η διαρροή πετρελαίου από πλήρως βυθισμένα ναυάγια αποτελεί ένα πραγματικό κίνδυνο και ότι το σύστημα ασαφούς λογικής που αναπτύχθηκε μπορεί να συνεισφέρει στην αντιμετώπιση του προβλήματος με την υποστήριξη μιας ευρύτερης διαδικασίας λήψεως αποφάσεων.

1. Εισαγωγή

Η ετυμολογική προέλευση της λέξης «ναυάγιο» είναι η σύνθεση των λέξεων «ναύς» και «άγνυμι» που σημαίνει σπασμένο πλοίο. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization) ορίζει το ναυάγιο ως [29]:

1. Ένα βυθισμένο ή προσαραγμένο πλοίο,
2. Οποιοδήποτε μέρος ενός βυθισμένου ή προσαραγμένου πλοίου, συμπεριλαμβανομένου οποιουδήποτε αντικειμένου που είναι ή ήταν επί ενός τέτοιου πλοίου,
3. Οποιοδήποτε αντικείμενο το οποίο είναι προσαραγμένο, βυθισμένο ή επιπλέει στη θάλασσα και έχει απολεσθεί στη θάλασσα από ένα πλοίο,
4. Ένα πλοίο που πρόκειται, ή πιθανώς αναμένεται, να βυθιστεί ή να προσαράξει και δεν έχουν ληφθεί αποτελεσματικά μέτρα για τη διάσωση του πλοίου ή οποιασδήποτε περιουσίας που βρίσκεται σε κίνδυνο.

Οι λόγοι για τους οποίους μπορεί να βυθιστεί ένα πλοίο μπορούν να καταταχθούν στις ακόλουθες κατηγορίες: λάθη ναυσιπλοίας και άλλα ανθρώπινα λάθη που έχουν ως αποτέλεσμα σύγκρουση, προσάραξη, ή δημιουργία ρήγματος από πρόσκρουση, μετακίνηση φορτίου, κατασκευαστική αστοχία που μπορεί να οφείλεται σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, ή εσφαλμένη σχεδίαση, πυρκαγιά και έκρηξη, και απώλεια πολέμου [32, 36].

Οι κίνδυνοι προς τρίτους που προκύπτουν από τη βύθιση ενός πλοίου είναι ή η διαρροή πετρελαιοειδών και λοιπών επικίνδυνων ουσιών¹ είτε η παρεμπόδιση της ναυσιπλοίας². Τα πλοία φέρουν, στην πλειονότητά τους, πολλές και διαφορετικές επικίνδυνες ουσίες. Η διαρροή αυτών των ουσιών στο περιβάλλον μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες τόσο για το οικοσύστημα όσο και για οικονομικές δραστηριότητες στις οποίες εμπλέκονται οι τοπικές κοινωνίες, όπως για παράδειγμα η αλιεία, ο τουρισμός αλλά και η βιομηχανία. Ο κατάλογος των επικίνδυνων ουσιών πάνω σε ένα πλοίο περιλαμβάνει: τοξίνες (π.χ. αντιρρυπαντικά χρώματα), αμίαντος, πλαστικά, βαρέα μέταλλα, ραδιενεργά υλικά (πυρηνοκίνητα υποβρύχια) και πετρελαιοειδή³. Μετά τη βύθιση ενός πλοίου οι περισσότερες από αυτές τις επικίνδυνες ουσίες μπορεί να εγχλωβιστούν στο ναυάγιο, οπότε με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται η πιθανότητα να διαρρεύσουν στο περιβάλλον. Θα μπορούσαμε να πούμε λοιπόν ότι τα ναυάγια αποτελούν ωρολογιακές βόμβες τόσο για το περιβάλλον όσο και για τις δραστηριότητες των τοπικών κοινωνιών.

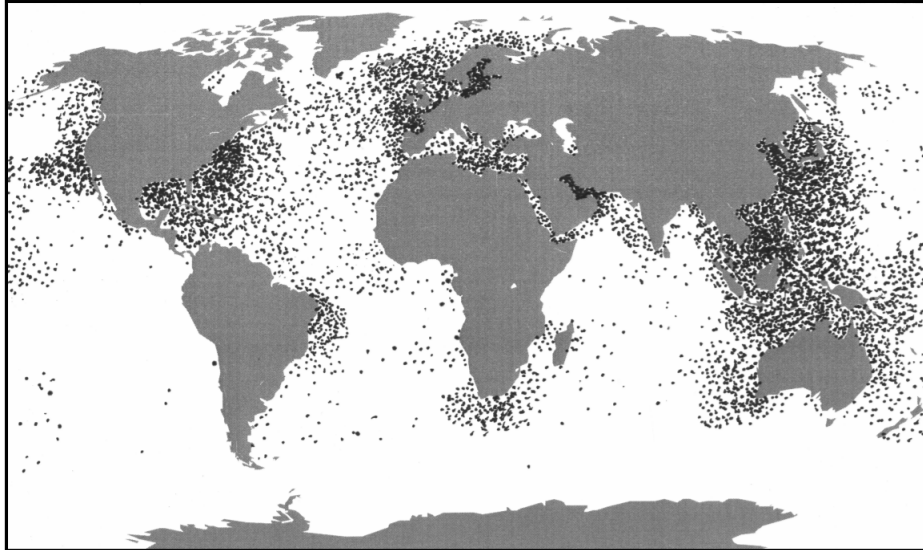
Για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξανόμενη ανησυχία διεθνώς γύρω από τις συνέπειες στο περιβάλλον που μπορεί να επιφέρουν πιθανές διαρροές πετρελαιοειδών από πλήρως βυθισμένα ναυάγια. Μερικοί από τους λόγους που έχουν συντελέσει σε αυτό το γεγονός περιγράφονται παρακάτω.

¹ Η διαρροή επικίνδυνων ουσιών από ένα πλοίο μπορεί να γίνει ή κατά τη διάρκεια του ατυχήματος είτε κατόπιν αυτού.

² Η παρεμπόδιση της ναυσιπλοίας περιλαμβάνει την παρεμπόδιση διαύλων και την απόθεση επιπλέοντων αντικειμένων όπως είναι τα εμπορευματοκιβώτια.

³ Τα πετρελαιοειδή σε ένα πλοίο μπορεί να είναι ή σε μορφή καυσίμων είτε σε μορφή φορτίου που μεταφέρουν τα πετρελαιοφόρα πλοία ή λοιπά λειτουργικά υγρά όπως τα λιπαντικά και τα ψυκτικά υγρά.

Κατά τη διάρκεια του προηγούμενου αιώνα βυθίστηκε ένας μεγάλος αριθμός πλοίων παγκοσμίως, που αποτελούνται κυρίως από απώλειες κατά τη διάρκεια του Α΄ και Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου. Εκτιμάται ότι υπάρχουν περίπου 8,500 πιθανώς ρυπογόνα ναυαγία παγκοσμίως, από τα οποία τα δύο τρίτα βρίσκονται στον Νότιο Ειρηνικό και το Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό [46]. Η γεωγραφική κατανομή αυτών των ναυαγίων φαίνεται στο Σχ. 1.1.



Σχήμα 1.1.: Προσεγγιστική κατανομή των πλήρως βυθισμένων ναυαγίων παγκοσμίως [46]

Ήδη έχουν παρατηρηθεί διαρροές πετρελαίου από διάφορα ναυαγία, ανάμεσα στα οποία είναι και το θωρηκτό USS Mississinewa, το οποίο βυθίστηκε κατά τη διάρκεια της επίθεσης του Ιαπωνικού στόλου στην περιοχή Ulithi Lagoon στη Μικρονησία στις 20 Νοεμβρίου, 1944. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν εκτενείς αναφορές σε παρόμοιες περιπτώσεις διαρροής πετρελαίου από βυθισμένα ναυαγία.

Έχουν ήδη γίνει ανεξάρτητες εκτιμήσεις που υποδεικνύουν ότι υπάρχουν μεγάλες ποσότητες εγκλωβισμένου πετρελαίου σε ναυαγία, από 2.5 έως και 20.4 εκ. tons, οι οποίες αποτελούν πιθανό κίνδυνο στην περίπτωση που διαρρεύσουν στο περιβάλλον [46, 26]. Οι εκτιμώμενες ποσότητες αποτελούν από 180 έως και 1500 φορές την ποσότητα πετρελαίου που καταλήγει στη θάλασσα από διαρροές στην επιφάνεια, αν ληφθεί υπόψη ο ετήσιος ρυθμός διαρροής $14,000 \frac{\text{tons}}{\text{έτος}}$, για το διάστημα 2000-2007 [16].

Το νομικό πλαίσιο, μέχρι στιγμής, που διέπει τη διαχείριση των ναυαγίων αλλά και την αναγνώρισή τους ως κίνδυνο περιγράφεται στη Διεθνή Σύμβαση για την Απομάκρυνση των Ναυαγίων (International Convention on the Removal of Wrecks) που ανέπτυξε ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός το 2007 [29]. Χαρακτηριστικά άρθρα της σύμβασης είναι το Άρθρο 6, στο οποίο ορίζονται τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία αναγνωρίζεται ένα συγκεκριμένο ναυαγίο ως κίνδυνο, και το Άρθρο 9, στο οποίο ορίζεται ότι ο ιδιοκτήτης του ναυαγίου θα το απομακρύνει στην περίπτωση που αυτό αποτελεί κίνδυνο (Παρ. 2). Η Διεθνή Σύμβαση για την Απομάκρυνση των Ναυαγίων δεν έχει επικυρωθεί ακόμη, καθότι δεν έχει συγκεντρωθεί ο απαραίτητος αριθμός υπογραφών, αν και το κείμενο της σύμβασης συντάχθηκε το 2007. Ακολουθεί κατάλογος με τα κριτήρια του IMO, τα οποία πρέπει να λαμβάνει υπόψη το Κράτος που έχει την κυριότητα του ναυαγίου:

1. ο τύπος, το μέγεθος και η κατασκευή του ναυαγίου,
2. το βάθος της περιοχής,

3. παλίρροιες και ρεύματα της περιοχής,
4. ιδιαίτερα ευαίσθητες περιοχές,
5. εγγύτητα ναυσιπλοϊκών οδών,
6. πυκνότητα και συχνότητα θαλάσσιας κυκλοφορίας,
7. είδος θαλάσσιας κυκλοφορίας,
8. είδος και ποσότητα του φορτίου του ναυαγίου και πετρελαιοειδών (π.χ., καύσιμα και λιπαντικά έλαια) που έχουν εγκλωβιστεί στο ναυάγιο, και επίσης οι πιθανές συνέπειες στην περίπτωση που ή το φορτίο είτε τα πετρελαιοειδή διαρρεύσουν στο περιβάλλον,
9. ευαισθησία κοντινών λιμενικών εγκαταστάσεων,
10. επικρατούσες μετεωρολογικές και υδρολογικές συνθήκες,
11. υποθαλάσσια τοπογραφία της περιοχής,
12. ύψος κατά το οποίο απέχει το ναυάγιο είτε κάτω ή πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας στο χαμηλότερο σημείο της αστρονομικής παλίρροιας,
13. ακουστικό και μαγνητικό προφίλ του ναυαγίου,
14. εγγύτητα παράκτιων βιομηχανικών εγκαταστάσεων, αγωγών, καλώδια τηλεπικοινωνιών και παρόμοιων κατασκευών, και
15. οποιεσδήποτε άλλες συνθήκες που μπορεί να επιτάσσουν την απομάκρυνση του ναυαγίου.

Στην Ελλάδα το σχετικό νομικό πλαίσιο περιγράφεται στο Νόμο 2881/2001. Τα βασικότερα άρθρα του νόμου είναι τα ακόλουθα:

Άρθρο 2, Παρ. 1. Ο κύριος του ναυαγίου υποχρεούται να το απομακρύνει όταν αυτό αποτελεί κίνδυνο για τη ναυσιπλοΐα σε περιοχή λιμένα, διώρυγας ή διαύλου ή απειλεί το περιβάλλον.

Άρθρο 4, Παρ. 1. Παρομοίως με το Άρ. 2 για περιπτώσεις όπου το ναυάγιο βρίσκεται εκτός λιμένων, διωρύγων ή διαύλων και εμποδίζει την ελεύθερη ναυσιπλοΐα.

Άρθρο 12. Ρυθμίζει την κάλυψη των εξόδων και των ζημιών για τις επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης (Search and Rescue).

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη διαρροή των εγκλωβισμένων πετρελαιοειδών από ένα πλήρως βυθισμένο ναυάγιο. Η διαρροή των εγκλωβισμένων ποσοτήτων πετρελαίου μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για τις ακτές, τα προστατευόμενα οικοσυστήματα, αλλά και για στόχους οικονομικού ενδιαφέροντος που βρίσκονται κοντά στην τοποθεσία του ναυαγίου⁴. Επομένως, γίνεται προσπάθεια για τον ορισμό ενός πλαισίου για την περιβαλλοντική απειλή που προκύπτει από τα βυθισμένα ναυάγια που βρίσκονται στην Ελλάδα. Στόχος της εργασίας είναι να καταγράψει τα επικίνδυνα ναυάγια στην Ελλάδα και να εκτιμήσει το μέγεθος του περιβαλλοντικού ρίσκου για το καθένα από αυτά.

⁴ Οι στόχοι οικονομικού ενδιαφέροντος περιλαμβάνουν περιοχές τουριστικής αξίας, περιοχές με δραστηριότητες όπως η αλιεία και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, που εξαρτούν τη λειτουργία τους στη διαθεσιμότητα καθαρού θαλασσινού νερού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο χώρος εντός των θαλάσσιων συνόρων της Ελλάδας παρουσιάζει ενδιαφέρον εξαιτίας αφενός της μοναδικής γεωμορφολογίας που περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό συμπλεγμάτων νησιών, και αφετέρου της αυξημένης θαλάσσιας κυκλοφορίας που είναι αποτέλεσμα ενός αρκετά αναπτυγμένου τομέα ακτοπλοΐας που περιλαμβάνει τόσο τη μεταφορά επιβατών όσο και τη μεταφορά αγαθών και πρώτων υλών.

Μέσω της εκτίμησης του περιβαλλοντικού ρίσκου για το κάθε ναυάγιο, επιχειρείται η αναγνώριση των γεωγραφικών περιοχών με υψηλό κίνδυνο για διαρροή πετρελαίου και για τις οποίες θα υπάρχουν μεγάλες συνέπειες από μια πιθανή διαρροή. Μια τέτοια διαδικασία μπορεί να χρησιμεύσει στην ιεράρχηση των περιοχών για την οργάνωση της απάντησης του εγκλωβισμένου πετρελαίου από τα ναυάγια που βρίσκονται σε αυτή. Η απάντηση των πετρελαιοειδών θα είχε ως αποτέλεσμα την αδρανοποίηση των ναυαγίων και επομένως την εξουδετέρωση του κινδύνου διαρροής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν εκτιμάται ότι θα μπορούσαν να αποτελούν τμήμα μιας ευρύτερης διαδικασίας λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση του κινδύνου από μια πιθανή διαρροή εγκλωβισμένου πετρελαίου σε πλήρως βυθισμένα ναυάγια.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο βασικά εργαλεία. Το πρώτο είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων με τη χρήση της θεωρίας της ασαφούς λογικής (Fuzzy Inference), ως μέθοδος για τη μοντελοποίηση του ρίσκου, και το δεύτερο είναι η γεωγραφική ανάλυση (GIS Analysis), για την αναγνώριση και ανάλυση γεωγραφικών σχέσεων μεταξύ διαφόρων μεγεθών.

Η ασαφής λογική (Fuzzy Logic) χρησιμοποιείται για τη εξαγωγή συμπερασμάτων βάσει ενός συνόλου δεδομένων εισόδου και την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου για το κάθε ναυάγιο. Η θεωρία της ασαφούς λογικής κάνει χρήση της έννοιας των ασαφών συνόλων και δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να διαχειρίζεται ασαφή δεδομένα.

Η ανάπτυξη ενός Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (Geographic Information System) συνεισφέρει στην ανάλυση αλλά και την αποθήκευση των δεδομένων. Αυτά τα συστήματα προσφέρουν ένα μοναδικό νέο τρόπο αποθήκευσης πληροφοριών που έχουν ισχυρή συσχέτιση με τη γεωγραφική τοποθεσία. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές κατά την ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων που διατηρεί πληροφορίες για την τοποθεσία των ναυαγίων αλλά και άλλων δεδομένων που σχετίζονται με αυτά. Επιπλέον, οι μέθοδοι γεωγραφικής ανάλυσης αποδεικνύονται ιδιαίτερα χρήσιμες στη διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης ρίσκου που περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση των συνεπειών από μια ανεπιθύμητη κατάσταση, η οποία σε αυτό το πλαίσιο αφορά την διαρροή πετρελαίου από ένα ναυάγιο, παρέχοντας κρίσιμα γεωγραφικά δεδομένα.

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται στα ακόλουθα τμήματα: βιβλιογραφική επισκόπηση, θεωρητικό μέρος, περιγραφή της μεθοδολογίας, παρουσίαση των αποτελεσμάτων, και τέλος των συμπερασμάτων.

Στο Κεφ. 2 πραγματοποιείται μια επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τη ρύπανση από τα ναυάγια, την αντιμετώπιση αυτής καθώς και την εφαρμογή ιεραρχικών συστημάτων ασαφούς λογικής στο πεδίο της ανάλυσης ρίσκου.

Στο Κεφ. 3 παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας της Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic) και των ιεραρχικών συστημάτων ασαφούς λογικής (hierarchical fuzzy inference systems).

Στο Κεφ. 4 εξετάζεται ο ορισμός της έννοιας του ρίσκου, η διάκριση της αβεβαιότητας σε κατηγορίες καθώς και τα βασικά βήματα που αποτελούν μια γενική διαδικασία ανάλυσης του ρίσκου (Risk Analysis).

Στο Κεφ. 5 περιγράφονται τα διάφορα στάδια της ανάλυσης. Στην ενότητα 5.2 περιγράφεται η δομή της βάσης δεδομένων με τα ναυάγια στην Ελλάδα και παρουσιάζεται η σχετική στατιστική και γεωγραφική ανάλυση. Στην ενότητα 5.3 αναλύονται τα βήματα της

μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την εκτίμηση των πιθανών ποσοτήτων εγκλωβισμένου πετρελαίου για κάθε ναυάγιο και παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα με τη σχετική στατιστική και γεωγραφική ανάλυση. Στην ενότητα 5.4 περιγράφονται τα βήματα της ανάλυσης ρίσκου. Πρώτα γίνεται αναφορά στα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου, κατόπιν περιγράφεται λεπτομερώς το υπολογιστικό μοντέλο συμπεριλαμβανομένου της δομής, της βάσης κανόνων, και των συναρτήσεων συμμετοχής. Στην ενότητα 5.5 παρουσιάζονται τα βήματα της ανάλυσης αβεβαιότητας, που έχει ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης της αβεβαιότητας του τελικού αποτελέσματος (περιβαλλοντικό ρίσκο) με δεδομένη αβεβαιότητα για τις μεταβλητές εισόδου του ασαφούς συστήματος.

Στο Κεφ. 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των διαφόρων φάσεων της ανάλυσης. Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται η επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω της εφαρμογής του μοντέλου σε περιπτώσεις που δεν περιέχονται στη βάση δεδομένων.

Τέλος, στο Κεφ. 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας. Το επισυναπτόμενο παράρτημα περιέχει χάρτες με τα γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, τις πηγές τους, καθώς και μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τη γεωγραφική ανάλυση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων.

2. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Η αναπτυσσόμενη διεθνής συνειδητοποίηση των επιπτώσεων της ρύπανσης για το περιβάλλον και την βιωσιμότητα της ανάπτυξης έχει πρόσφατα φέρει στο προσκήνιο τον κίνδυνο που προκύπτει από πιθανώς ρυπογόνα ναυάγια. Από τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο έως και σήμερα έχει συσσωρευτεί παγκοσμίως ένας μεγάλος αριθμός ναυαγίων. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια, έχει αναδειχθεί το πρόβλημα της διαρροής επικίνδυνων ουσιών από τα ναυάγια που δεν έχουν ανελκυθεί ή απομακρυνθεί. Όλα τα πλοία μεταφέρουν πολλές διαφορετικές ουσίες που είναι πιθανώς επικίνδυνες για το περιβάλλον στην περίπτωση που διαρρεύσουν σε αυτό. Η πιο κοινή κατηγορία ρυπαντών είναι το πετρέλαιο και τα παράγωγά του που μεταφέρονται από τα πλοία ή ως καύσιμο για πρόωση είτε ως φορτίο.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες εργασίες που αναφέρονται σε αυτό το πρόβλημα. Μεταξύ αυτών των διαφορετικών πηγών υπάρχουν μερικά κοινά σημεία, τα οποία προσδιορίζουν τον τρόπο αντιμετώπισης της διαρροής επιβλαβών ουσιών από πλήρως βυθισμένα ναυάγια. Το πρώτο είναι η δημιουργία εξειδικευμένων βάσεων δεδομένων για ναυάγια που περιέχουν κατάλληλες πληροφορίες για το καθένα, όπως οι ποσότητες των πετρελαιοειδών που βρίσκονται εγκλωβισμένες σε αυτά και η κατάσταση του ναυαγίου. Το δεύτερο είναι η εκτίμηση του ρίσκου μιας πιθανής διαρροής πετρελαίου από πλήρως βυθισμένα ναυάγια για την κατανομή των περιορισμένων διαθέσιμων οικονομικών πόρων σε αυτά με τη μεγαλύτερη πιθανότητα διαρροής και τις μεγαλύτερες επιπτώσεις για το περιβάλλον.

Στην παρούσα βιβλιογραφική επισκόπηση γίνεται αναφορά στα είδη των ρυπαντών που βρίσκονται σε ναυάγια, τις συνέπειες διαρροής αυτών στο περιβάλλον και τρόπους αντιμετώπισης, στο φαινόμενο της διάβρωσης και πώς επηρεάζει τη μεταλλική κατασκευή ενός ναυαγίου, σε εξειδικευμένες βάσεις δεδομένων ναυαγίων, στις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του ρίσκου διαρροής επιβλαβών ουσιών στο περιβάλλον, και τέλος σε εφαρμογές των συστημάτων ασαφούς λογικής με ιεραρχική δομή σε διάφορους τομείς.

Ρύπανση από ναυάγια και αντιμετώπιση

Οι ωκεανοί και οι θάλασσες καλύπτουν περίπου το 70% της συνολικής επιφάνειας της Γης και χαρακτηρίζονται από πλούσια βιοποικιλότητα. Οι ωκεανοί αποτελούν πηγές τροφής τόσο για τους διάφορους οργανισμούς όσο και για τον άνθρωπο. Επίσης, πολλές από τις χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται για τη θεραπεία ενός μεγάλου αριθμού ασθενειών προέρχονται από φυτά και οργανισμούς των ωκεανών. Είναι επομένως σημαντική η προστασία αυτών των ευαίσθητων οικοσυστημάτων από κάθε είδους ρύπανση που μπορεί να διαταράξει την ισορροπία τους.

Τα πλοία μεταφέρουν διαφόρων ειδών φορτία και επίσης κατασκευάζονται από μια πλειάδα υλικών, πολλά από τα οποία επιφέρουν ανεπιθύμητες συνέπειες στην περίπτωση που διαρρεύσουν στο περιβάλλον. Όταν ένα πλοίο ναυαγήσει και βυθιστεί υπάρχει ο κίνδυνος πολλές από αυτές τις επιβλαβείς ουσίες να διαρρεύσουν. Μερικές από τις σημαντικότερες επιβλαβείς ουσίες είναι το πετρέλαιο και τα παράγωγά του, διάφορες τοξίνες, ο αμίαντος, τα πλαστικά, και ραδιενεργά υλικά [32].

Τα πετρελαιοειδή είναι χημικές ενώσεις που αποτελούνται από διάφορους πολυκυκλικούς

αρωματικούς υδρογονάνθρακες (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), μεταξύ άλλων βενζίνη, προπάνιο, ακετυλίνη, νάφθα, και κηροζίνη που μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία. Οι τοξίνες είναι επιβλαβείς ουσίες που συχνά μεταφέρονται ως φορτίο και προκαλούν διάφορες ασθένειες όταν έλθουν σε επαφή ή απορροφηθούν από ιστούς του σώματος. Επιπλέον, οι τοξίνες συσσωρεύονται στην τροφική αλυσίδα. Ο αμιάντος χρησιμοποιούταν ευρύτατα στον κατασκευαστικό τομέα αλλά και στη ναυπηγική, εξαιτίας των πυράντοχων ιδιοτήτων του, έως ότου οι επιβλαβείς επιδράσεις για την υγεία έγιναν αντιληπτές οπότε απαγορεύτηκε η χρήση του. Ωστόσο, σε πολλά ναυάγια, ιδιαίτερα πλοίων παλαιάς κατασκευής υπάρχουν στοιχεία κατασκευασμένα από αμιάντο. Τα πλαστικά επιφέρουν το θάνατο σε διάφορους οργανισμούς που ή τα καταναλώνουν ως τροφή είτε παγιδεύονται μέσα σε αυτά. Μάλιστα, οι επιπτώσεις από την ύπαρξη πλαστικών αντικειμένων σε ένα οικοσύστημα διαρκούν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα αφού αυτά τα υλικά αποσυντίθενται με πολύ αργό ρυθμό. Ραδιενεργά υλικά βρίσκονται κυρίως σε πολεμικά υποβρύχια, τα οποία είτε έχουν βυθιστεί σκόπιμα είτε κατά τη διάρκεια πολεμικών επιχειρήσεων, που χρησιμοποιούν πυρηνικούς αντιδραστήρες για πρόωση. Οι επιπτώσεις, από την έκθεση σε υψηλά επίπεδα ραδιενέργειας, επηρεάζουν τόσο την περιοχή στην άμεση γειτονία του ναυαγίου όσο και την ευρύτερη, με τη διασπορά των ραδιενεργών ουσιών καθώς τα μεταλλικά ελάσματα των δοχείων που τα περιέχουν αλλά και η μεταλλική κατασκευή των σκαφών καταρρέουν υπό την επίδραση της διάβρωσης.

Η ρύπανση που προκύπτει από το πετρέλαιο και τα παράγωγά του εντοπίζεται τόσο στα ιζήματα, επιφανειακά και σε βάθος, του πυθμένα όσο και στη στήλη του νερού. Η διείσδυση ρυπαντών από το πετρέλαιο στον πυθμένα μπορεί να φτάσει ακόμα και σε βάθος 250 m [62]. Επιπλέον, η οριζόντια εξάπλωση των ρυπαντών μπορεί να είναι ακόμα και σε απόσταση 400 m μακριά από το ναυάγιο. Η διαρροή πετρελαίου σε ένα θαλάσσιο οικοσύστημα μπορεί να είναι πηγή ρύπανσης από βαρέα μέταλλα, τα οποία είναι συνιστώσες της σύνθεσης του πετρελαίου, για τη στήλη του νερού. Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή που βρίσκεται το Prestige [56] έδειξαν μεγάλες συγκεντρώσεις χαλκού και μολύβδου στο άνω στρώμα της στήλης του νερού, οι οποίες όμως δεν παρατηρήθηκαν στα κατώτερα στρώματα όπου βρίσκεται το ναυάγιο.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται κατά την εκτίμηση των συνεπειών της ρύπανσης στο οικοσύστημα από τα πετρελαιοειδή είναι η έλλειψη της γνώσης γύρω από την κίνηση και τη διασπορά πετρελαίου που προέρχεται από ένα ναυάγιο σε μεγάλο βάθος και για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Πιθανότατα, μέρος της ποσότητας του πετρελαίου παραμένει σε μεγάλο βάθος, ή θα μπορούσε να παγιδευτεί στο στρώμα της στήλης του νερού ακριβώς κάτω από το θερμοκλινές. Μελέτη αυτού του φαινομένου για το Prestige [16], από το οποίο διέρρεε πετρέλαιο σε βάθος 3,800 m τρία χρόνια αφότου τα ανοίγματα του ναυαγίου είχαν σφραγιστεί ώστε να αποφευχθεί περαιτέρω διαρροή. Το πετρέλαιο που έφτασε στην επιφάνεια δεν είχε σημάδια γήρανσης αφήνοντας ένα ομογενές αποτύπωμα στη στήλη του νερού, το οποίο ήταν επομένως πανομοιότυπο με αυτό της πηγής.

Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού πιθανώς επιβλαβών ουσιών που μπορεί να βρίσκονται σε ένα ναυάγιο αλλά και των πολυάριθμων αλληλεπιδράσεων αυτών με το τοπικό οικοσύστημα, είναι σημαντική η διεξαγωγή ολοκληρωμένων μελετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τον πληρέστερο δυνατό προσδιορισμό των συνεπειών από πιθανές διαρροές. Τέτοιες μελέτες μπορούν να βοηθήσουν στην κατάστρωση κατάλληλης στρατηγικής για την διαχείριση του ναυαγίου και την έγκαιρη αντιμετώπιση των πιθανών συνεπειών. Παράδειγμα αποτελεί η μελέτη για τη στρατηγική περιβαλλοντική εκτίμηση (strategic environmental assessment), όπου προσδιορίζονται οι πιθανές μελλοντικές συνέπειες από μια διαρροή πετρελαίου, για το ναυάγιο του Β' Παγκοσμίου Πολέμου Hoyo Maru που βρίσκεται στην περιοχή Chuuk Lagoon στη Μικρονησία [70]. Η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων που έγινε για το

ναυάγιο M/V *Avantis* [42], το οποίο βρίσκεται βυθισμένο στη δυτική λεκάνη του Σαρωνικού κόλπου, διερεύνησε τις επιπτώσεις των υλικών που μετέφερε το πλοίο καθώς και αυτές της μεταλλικής κατασκευής αυτού στο τοπικό θαλάσσιο οικοσύστημα. Στόχος της μελέτης ήταν η εκτίμηση την ανάγκη απομάκρυνσης του ναυαγίου σε σχέση με την επικινδυνότητα που παρουσιάζει για το περιβάλλον.

Βασική παράμετρος για την αξιολόγηση των επιδράσεων των ρυπαντών στο περιβάλλον είναι η συνεχής λήψη μετρήσεων, για τον εντοπισμό ασυνήθιστα υψηλών επιπέδων συγκέντρωσης. Η κατάλληλη ανάλυση τέτοιων δεδομένων μπορεί να υποστηρίξει τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, που σχετίζονται για παράδειγμα με την αδρανοποίηση των ναυαγίων ή την απομάκρυνσή τους, αλλά και να παρέχει δεδομένα για την διαρκή παρακολούθηση των ναυαγίων με σκοπό, για παράδειγμα, τον εντοπισμό διαρροών πετρελαίου από αυτά. Η συνεχής λήψη επιφανειακών μετρήσεων μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός πλοίου ευκαιρίας (opportunity ship). Αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται τις διαδρομές πλοίων εν ενεργεία, τα οποία εξοπλίζονται κατάλληλα, για την παροχή των απαιτούμενων δεδομένων. Μια επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου αποτελεί ο εντοπισμός διαρροής φωσφορικών οξέων από το ναυάγιο M/V *Ece* που βρίσκεται στο κανάλι της Μάγχης [34].

Πολλές φορές, επειδή είτε η ακριβής τοποθεσία των ναυαγίων δεν είναι γνωστή είτε η καταγραφή των ναυαγίων για μια περιοχή είναι ελλιπής, εμφανίζονται ποσότητες πετρελαίου που δεν μπορούν να αντιστοιχιστούν σε μια συγκεκριμένη πηγή (mystery oil spills). Για την ολοκληρωμένη αντιμετώπιση των επιπτώσεων του πετρελαίου στο περιβάλλον είναι αναγκαίος ο εντοπισμός της πηγής των διαρροών. Μια τέτοια περίπτωση διαρροής πετρελαίου με άγνωστη πηγή είναι αυτή που παρατηρήθηκε τη χρονική περίοδο 1992 - 2002 κατά μήκος της ακτογραμμής της κεντρικής Καλιφόρνια, ΗΠΑ η οποία προκάλεσε σημαντικές επιπτώσεις στους τοπικούς πληθυσμούς πτηνών. Έρευνα που διεξήχθη μετά το 2001 εντόπισε τελικά ως πηγή της διαρροής το ναυάγιο SS *Jacob Luckenbach* [45], το οποίο είχε βυθιστεί κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Για τη διεξαγωγή της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν διάφορες σύγχρονες τεχνικές συμπεριλαμβανομένου: ανάλυση δειγμάτων πετρελαίου, παρατηρήσεις από δορυφόρους, αεροπλάνα, και πλοία, καθώς και προβολής στο παρελθόν (hindcasting).

Διάβρωση ναυαγίων

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζει την πιθανότητα διαρροής του εγκλωβισμένου πετρελαίου από ένα ναυάγιο είναι η διάβρωση της γάστρας, υπό την επίδραση των διαφόρων περιβαλλοντικών παραγόντων. Επιπλέον, ο προσδιορισμός της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων στο ρυθμό της διάβρωσης μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη του χρονικού ορίζοντα της κατάρρευσης της μεταλλικής κατασκευής του ναυαγίου, επομένως και της διαρροής των ουσιών που βρίσκονται εγκλωβισμένες σε αυτό.

Σε αυτό το πλαίσιο, η σπουδαιότητα της μελέτης των διαβρωτικών διαδικασιών επί της μεταλλικής κατασκευής των ναυαγίων έγκειται, πρώτον στη δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης του φαινομένου σε συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα, και δεύτερον στην πρόβλεψη της κατάρρευσης των δεξαμενών και των κυτών που περιέχουν πετρέλαιο ή άλλες επιβλαβείς ουσίες[55]. Η διαδικασία της διάβρωσης είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την κατηγοριοποίηση των ναυαγίων σύμφωνα με την ανάγκη άμεσης επέμβασης για την απομάκρυνση των πηγών ρύπανσης από αυτά. Η συγκεκριμένη μελέτη επιχειρεί να προσδιορίσει την επίδραση του βάθους στο ρυθμό της διάβρωσης, τον χαρακτηρισμό της διαδικασίας ως χημική, φυσική, ή βιολογική, τον σαφή προσδιορισμό της εξέλιξης της αποσύνθεσης της γάστρας, και τέλος αν η διαδικασία για τα μεταλλικά ελάσματα των πλοίων είναι ομαλή σε συνάρτηση με το χρόνο.

Η μελέτη για την περιοχή Lakshadweep της Ινδίας επιχειρεί να ποσοτικοποιήσει την αντίσταση στη διάβρωση και τη συμπεριφορά στο θαλασσινό νερό επιλεγμένων ναυαγίων [75]. Για τη μελέτη της διάβρωσης των ναυαγίων στο θαλασσινό νερό εκτελέστηκαν πειράματα επιτάχυνσης της διάβρωσης σε εργαστήριο. Επιπλέον, προσδιορίστηκαν οι ρυθμοί της διάβρωσης για το σίδηρο, το μόλυβδο, και τον ορείχαλκο - μέταλλα τα οποία συλλέχθηκαν από τα επιλεγμένα ναυάγια.

Για τη μελέτη του φαινομένου είναι σημαντική η παρακολούθηση και η συλλογή δεδομένων από πλήρως βυθισμένα ναυάγια. Μια τέτοια εφαρμογή για τα πολεμικά σκάφη HMAS Swan και HMAS Perth, τα οποία βυθίστηκαν σκόπιμα ώστε να μετατραπούν σε τεχνητούς υφάλους στα ανοικτά της δυτικής ακτής της Αυστραλίας το 1997 και το 2001 αντίστοιχα, παρουσιάζεται στο [38]. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν συνέργεια μεταξύ των υλικών κατασκευής της γάστρας, των ιζημάτων, και του θαλάσσιου οικοσυστήματος με τη σταθερότητα της μεταλλικής κατασκευής των ναυαγίων.

Ένα από τα ναυάγια που έχει μελετηθεί εκτενώς στα πλαίσια του ρίσκου διαρροής πετρελαίου είναι το USS Arizona. Επίσης με αφετηρία το πρόβλημα της διαρροής επιβλαβών ουσιών από ναυάγια, το συγκεκριμένο παράδειγμα έχει χρησιμεύσει και για διάφορες μελέτες που αφορούν την επίδραση της διάβρωσης στην κατασκευαστική ακεραιότητα της γάστρας των ναυαγίων. Η ανάλυση δειγμάτων της μεταλλικής κατασκευής του USS Arizona [31] δείχνει μειούμενους ρυθμούς διάβρωσης από περίπου 0.03 σε 0.08 mm/y, που είναι μικρότεροι κατά το ένα τρίτο από τους αναμενόμενους ελλείψει ρύπανσης της γάστρας (biofouling) ή κατακαθίσεων (concretions). Στόχος της τρέχουσας έρευνας που αφορά το USS Arizona είναι η ανάπτυξη τεχνικών για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής του ναυαγίου. Μια τεχνική υπολογισμού της διάβρωσης με ελάχιστη παρέμβαση (minimum impact) έχει αναπτυχθεί [64], η οποία συμπεριλαμβάνει αναλύσεις των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των κατακαθίσεων στη γάστρα του ναυαγίου. Σε αυτό το πλαίσιο έχει προκύψει μια εξίσωση που συνδέει το πάχος, την πυκνότητα, και τη συγκέντρωση σε σίδηρο του στρώματος των κατακαθίσεων με το ρυθμό διάβρωσης των μεταλλικών ελασμάτων. Σημαντικό στοιχείο αυτών των μεθόδων είναι η ελάχιστη παρέμβαση στο ναυάγιο, εφόσον απαιτούν την αφαίρεση μικρών κομματιών του στρώματος των κατακαθίσεων από τη γάστρα.

Εκτός από μετρήσεις του ρυθμού της διάβρωσης από ανάλυση δειγμάτων, έχει γίνει προσπάθεια πληρέστερης ανάλυσης ώστε να προσδιοριστεί η παρούσα κατάσταση καθώς και να προβλεφθεί η αντοχή και η κατασκευαστική ακεραιότητα του ναυαγίου στο μέλλον με τη χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων [21]. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει θεωρητικές φορτίσεις, τη διάδοση των δυνάμεων, και μεταβολές στη μορφή μιας κατασκευής υπό φόρτιση χρησιμοποιώντας ένα πλήθος στοιχειωδών κομματιών της κατασκευής, για το καθένα από τα οποία η απόκριση στη φόρτιση είναι γνωστή. Στη συγκεκριμένη μελέτη δημιουργήθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για ένα τμήμα της γάστρας μήκους 25 m, το οποίο αξιοποιεί ήδη υπάρχοντα δεδομένα όπως μετρήσεις των ρυθμών διάβρωσης, πληροφορίες από επιτόπου εξέταση του ναυαγίου, και ανάλυση των κατακαθίσεων που καλύπτουν τη γάστρα του ναυαγίου. Στόχος της μελέτης είναι η δημιουργία ενός ενιαίου εργαλείου για την πρόβλεψη της εξέλιξης της κατάρρευσης της μεταλλικής κατασκευής, υπό την επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων.

Βάσεις Δεδομένων

Η δημιουργία ειδικών βάσεων δεδομένων για πλήρως βυθισμένα ναυάγια είναι ένα πολύ βασικό κομμάτι για την αντιμετώπιση της περιβαλλοντικής απειλής που προκύπτει από αυτά. Η κατάρτιση καταλόγων ναυαγίων συνεισφέρει αφενός στην αναγνώριση του μεγέθους του

προβλήματος για μια συγκεκριμένη περιοχή και αφετέρου στην προληπτική αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος. Είναι εύκολα κατανοητό ότι μια προληπτική αντιμετώπιση μιας πιθανής διαρροής από ένα ναυάγιο προσφέρει τη δυνατότητα του ελέγχου και της σχεδόν ολοκληρωτικής απάλειψης των συνεπειών από αυτή την ανεπιθύμητη εξέλιξη. Επιπλέον, η εμπειρία από διάφορες επιχειρήσεις απορρύπανσης έχει δείξει ότι το κόστος για την αντιμετώπιση μιας ξαφνικής διαρροής πετρελαίου μπορεί να υπερβαίνει το αντίστοιχο κόστος μιας προληπτικής επιχείρησης απάντλησης πετρελαίου από ένα ναυάγιο.

Τα τελευταία χρόνια έχουν καταρτιστεί διάφορες βάσεις δεδομένων, ή σε παγκόσμιο είτε σε τοπικό επίπεδο, που καταγράφουν λεπτομέρειες σχετικά με τα πλήρως βυθισμένα ναυάγια. Μερικές από αυτές είναι οι ακόλουθες: Resources and UnderSea Threats (RUST), Atlantic, Mediterranean and Indian Ocean (AMIO), και βάση δεδομένων που καταρτίστηκε στα πλαίσια του προγράμματος Pacific Regional Environment Programme (SPREP).

Η βάση δεδομένων Resources and UnderSea Threats (RUST) δημιουργήθηκε με έναυσμα διάφορες περιπτώσεις διαρροών επικίνδυνων ουσιών από πλήρως βυθισμένα ναυάγια στις Η. Π. Α. [54]. Ο στόχος που προορίζεται να καλύψει αυτή η βάση δεδομένων είναι η καταγραφή των ναυαγίων και ο προσδιορισμός του μεγέθους της πιθανής περιβαλλοντικής απειλής που προκύπτει από αυτά. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την ενσωμάτωση στοιχείων από διάφορες πηγές, τόσο κρατικές όσο και ιδιωτικές, και στοχεύει στο να καλύψει τις ανάγκες σε πληροφορία μιας προληπτικής αντιμετώπισης του προβλήματος.

Η βάση δεδομένων του προγράμματος Pacific Regional Environment Programme (SPREP) δημιουργήθηκε για την καταγραφή των ναυαγίων του Β' Παγκοσμίου Πολέμου για τις θαλάσσιες περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού που πρόσκεινται στην Ασία. Σε αυτή καταγράφονται πληροφορίες που αφορούν το κάθε πλοίο, τη χωρητικότητά του καθώς και την τοποθεσία του και περιέχει 3,800 σκάφη, από τα οποία τα 330 είναι πετρελαιοφόρα πλοία. Η βάση δεδομένων SPREP χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τη δημιουργία της βάσης δεδομένων για ναυάγια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου Atlantic, Mediterranean and Indian Ocean (AMIO) [47], η οποία περιέχει περισσότερα από 3,950 σκάφη μεγαλύτερα των 1,000 tons, από τα οποία τα 529 είναι πετρελαιοφόρα. Η βάση δεδομένων AMIO βρίσκεται υπό διαδικασία συνεχούς αναθεώρησης και προσθήκης πληροφοριών και έχει στόχο να παρέχει τα κατάλληλα δεδομένα για τη διεξαγωγή αναλύσεων ρίσκου, οι οποίες θα βοηθήσουν στη διαμόρφωση στρατηγικών αντιμετώπισης του κινδύνου που προβάλλουν τα ναυάγια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Τα πλεονεκτήματα της κατάρτισης μια βάσης δεδομένων για ναυάγια επισημαίνονται στη μελέτη [18], όπου η καταγραφή σχετικών πληροφοριών για ναυάγια σε παγκόσμιο επίπεδο έχει βοηθήσει στην αναγνώριση ενός δυναμικού ρύπανσης, το οποίο εκφράζεται με τη συνολική ποσότητα επιβλαβών ουσιών που μπορεί να είναι εγκλωβισμένη στα ναυάγια και εκτιμάται από 2.5 έως 20 εκ. tons. Στην ίδια μελέτη επισημαίνεται η ανάγκη για προληπτική αντιμετώπιση του προβλήματος, υπό τη μορφή κατάλληλα σχεδιασμένων επιχειρήσεων απομάκρυνσης των επικίνδυνων ουσιών, περιγράφοντας ως παράδειγμα την περίπτωση του SS Jacob Luckenbach, το οποίο βυθίστηκε το 1953 μετά από πρόσκρουση στην περιοχή του San Francisco. Το ναυάγιο αυτό έχει αναγνωριστεί, από το 1992, ως η πηγή «άγνωστων» διαρροών πετρελαίου που είχαν σημαντικές επιπτώσεις στο τοπικό οικοσύστημα. Επιπλέον, το συγκριτικό κόστος της απορρύπανσης σε σχέση με την απομάκρυνση των επιβλαβών ουσιών προβάλλεται ως ισχυρό επιχείρημα για την ανάγκη προληπτικής αντιμετώπισης.

Η ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων παρουσιάζει ορισμένα προβλήματα που αφορούν τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές και την αβεβαιότητα που συνοδεύει την καταγραφή αυτών. Αυτό το πρόβλημα παρουσιάζεται στη μελέτη [57], στο πλαίσιο της εφαρμογής της Formal Safety Assessment ως προληπτικό εργαλείο που βασίζεται στην ανάλυση ιστορικών δεδομένων. Τονίζεται ότι η εγκυρότητα αυτών των δεδομένων υπονομεύεται από το επίπεδο

της αβεβαιότητας που τα συνοδεύει. Αυτή η μελέτη επισημαίνει την έλλειψη πληροφοριών σε βάσεις δεδομένων που σχετίζονται με περιστατικά ατυχημάτων πλοίων, η οποία θεωρείται ο βασικός λόγος για τον οποίο δεν είναι δυνατή η άμεση και άκριτη χρήση ιστορικών δεδομένων. Για αυτό το σκοπό, γίνεται ανάλυση δεδομένων ατυχημάτων, για μια δεκαετία, πλοίων που είναι εγγεγραμμένα στη Νορβηγία από τις βάσεις δεδομένων Lloyd's Register FairPlay (LRFP) και Norwegian Maritime Directorate (NMD). Τελικά υπολογίζεται η απόδοση καταγραφής (reporting performance) αυτών των βάσεων δεδομένων.

Εκτίμηση Ρίσκου Διαρροής Επιβλαβών ουσιών

Το βασικό συστατικό στοιχείο μιας διαδικασίας που έχει σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση των πιθανώς ρυπογόνων ναυαγίων είναι η εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου που σχετίζεται με κάθε ναυάγιο ξεχωριστά. Τα βασικά εργαλεία, για την επίτευξη αυτού του στόχου, περιλαμβάνουν μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στον τομέα της ανάλυσης ρίσκου, όπως η πιθανοθεωρητική εκτίμηση ρίσκου (Probabilistic Risk Assessment), η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση ρίσκου (Quantitative and Qualitative Risk Assessment), και η εκτίμηση μέσω κατάλληλων πινάκων ρίσκου (Risk Matrices).

Η εκτίμηση του ρίσκου αποτελείται από τη διάσταση της πιθανότητας και των συνεπειών. Για την εκτίμηση των συνεπειών από μια πιθανή διαρροή από ναυάγιο είναι σημαντικός ο προσδιορισμός τόσο του είδους όσο και της ποσότητας των επικίνδυνων ουσιών που βρίσκονται εγκλωβισμένα σε αυτό. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ευαισθησία των οικοσυστημάτων που βρίσκονται κοντά στην τοποθεσία του ναυαγίου. Από τις μελέτες που έχουν διεξαχθεί γίνεται σαφές ότι μεγάλος κίνδυνος προκύπτει από ναυάγια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, εξαιτίας του μεγάλου χρονικού διαστήματος κατά το οποίο η μεταλλική τους κατασκευή υφίσταται τις επιδράσεις του διαβρωτικού θαλάσσιου περιβάλλοντος. Μεγάλη συγκέντρωση τέτοιων ναυαγίων παρατηρείται στην περιοχή του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού και για το λόγο αυτό πολλές μελέτες επικεντρώνουν την ανάλυσή τους σε αυτή την περιοχή.

Η μελέτη [46] χρησιμοποιεί μια βηματική διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας παγκόσμιας βάσης δεδομένων για ναυάγια και τον ορισμό του πλαισίου για την εκτίμηση των κινδύνων και των συνεπειών διαρροών πετρελαίου από ναυάγια, ώστε να προσδιορίσει το επίπεδο του ρίσκου που προκύπτει από τα πιθανώς ρυπογόνα ναυάγια σε θαλάσσια ύδατα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει τον υπολογισμό της πιθανότητας και των συνεπειών της διαρροής πετρελαίου χρησιμοποιώντας περιβαλλοντικά, οικονομικά αλλά και κριτήρια που σχετίζονται με την τοποθεσία των ναυαγίων. Ένα ενδιαφέρον αποτέλεσμα της μελέτης είναι ο υπολογισμός της ποσότητας πετρελαίου που πιθανότατα είναι εγκλωβισμένη σε κάθε ναυάγιο στη Μεσόγειο Θάλασσα, όπου για τη συνολική ποσότητα το άνω όριο της εκτίμησης είναι 1,000,000 tons ενώ το κάτω όριο της εκτίμησης είναι 132,000 tons πετρελαίου. Επίσης τονίζεται η ανάγκη για τη διεξαγωγή συστηματικών αναλύσεων ρίσκου, η οποία στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι επιδράσεις της διάβρωσης στις μεταλλικές κατασκευές των ναυαγίων θα οδηγήσουν αναπόφευκτα σε διαρροές εγκλωβισμένου πετρελαίου.

Η περιβαλλοντική επίδραση των ναυαγίων που βρίσκονται στην περιοχή του Νότιου Ειρηνικού Ωκεανού διερευνήθηκε στο [7], όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από ένα μεγάλο αριθμό πηγών, μεταξύ αυτών και στοιχεία που διατίθενται από το Αυτοκρατορικό Ιαπωνικό Ναυτικό (Imperial Japanese Navy). Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον τόσο για το μεγάλο αριθμό ναυαγίων που συγκεντρώνει όσο και για τα οικοσυστήματα με μεγάλη βιοποικιλότητα και οικολογική σημασία, μεταξύ αυτών πολλές περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως Μνημεία Παγκόσμιας Κληρονομιάς (World Heritage Sites) που περιέχει. Χρησιμοποιήθηκε λογισμικό GIS για τη γεωγραφική ανάλυση των δεδομένων ώστε να

δοθούν απαντήσεις σε ερωτήματα περιβαλλοντικού και γεωπολιτικού ενδιαφέροντος. Ένα σύστημα βαθμολογίας (scoring system) που λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η χωρητικότητα του πλοίου, το βάθος, και την απόσταση από την ακτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό ενός δείκτη ρίσκου (risk index). Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εκτίμηση του ρίσκου χρησιμοποιήθηκε και ένας δείκτης για τη βιοποικιλότητα των κοντινών περιοχών.

Μια έρευνα που διεξήχθη σε τοπικό επίπεδο [26] επισημαίνει τα πιθανώς ρυπογόνα ναυάγια στην περιοχή Skagerrak της Σουηδίας. Σε αυτή προκύπτει ότι η πλειοψηφία των ναυαγίων που βρίσκονται στην περιοχή αποτελούν απώλειες από τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο και ότι έχουν ήδη παρατηρηθεί διαρροές πετρελαίου σε μερικά από αυτά. Η έρευνα επικεντρώνει το ενδιαφέρον της στην οικονομική πλευρά μιας ξαφνικής διαρροής πετρελαίου και στην οικονομική βιωσιμότητα των επιχειρήσεων εξουδετέρωσης μέσω της συγκέντρωσης κεφαλαίων, με παρόμοιο τρόπο όπως γίνεται στις περιπτώσεις εξουδετέρωσης περιοχών στην ξηρά που έχουν ρυπανθεί. Επιπλέον, τονίζεται η ανάγκη δημιουργίας μιας βάσης δεδομένων σε διεθνές επίπεδο που θα περιλαμβάνει αναγνωρισμένα πιθανώς ρυπογόνα ναυάγια αλλά και η σημασία προκαταρκτικής εκτίμησης της κατάστασης των ναυαγίων.

Εκτός από πιθανώς επικίνδυνες ποσότητες πετρελαιοειδών, ένα ναυάγιο μπορεί να περιέχει και άλλες επικίνδυνες ουσίες, όπως χημικά και διάφορες άλλες τοξικές ουσίες. Η μελέτη [48] διερευνά το πρόβλημα στο πλαίσιο των πετρελαιοειδών, χημικών, και πυρομαχικών που δεν έχουν εκραγεί που βρίσκονται σε ναυάγια πολεμικών πλοίων του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου αλλά και εμπορικών πλοίων στις περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού και της Ανατολικής Ασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις επιπτώσεις από πιθανές διαρροές για τις ατόλες του Ειρηνικού που αποτελούν ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο οικοσύστημα. Η μελέτη οδήγησε στην ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων σε συνδυασμό με ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) που περιέχει λεπτομέρειες για το είδος, την χωρητικότητα, και την τοποθεσία περισσότερων από 3,800 πλοίων. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εμφανής ο σημαντικός ρόλος των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στην αντιμετώπιση του προβλήματος.

Η αναφορά [1] περιγράφει την έρευνα που διεξήχθη από το ινστιτούτο FFI για τα πλοία που βυθίστηκαν στην περιοχή Skagerrak της Σουηδίας και έφεραν χημικά πυρομαχικά. Στόχος ήταν η διερεύνηση της κατάστασης των ναυαγίων και να προσδιοριστεί η διαρροή των χημικών ουσιών από αυτά. Οι κίνδυνοι από τη διαρροή αυτών των ουσιών προσδιορίστηκαν προκαταρκτικά μέσω επιτόπιων ερευνών (on-site surveys) με τη χρήση οχημάτων ROV εφοδιασμένα με κάμερες καταγραφής, κατά τις οποίες λήφθηκαν δείγματα ιζημάτων από το βυθό και έγινε ανάλυση της σύστασής τους για τον εντοπισμό συγκεκριμένων χημικών στοιχείων.

Μια εναλλακτική μέθοδος για την εκτίμηση του ρίσκου περιλαμβάνει τη χρήση συστημάτων ασαφούς λογικής (Fuzzy Inference System) που βασίζονται σε βάσεις κανόνων, οι οποίες κωδικοποιούν τη συσσωρευμένη γνώση ειδικών. Το πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων, σε σχέση με τις υπάρχουσες, είναι ότι μπορούν να αντιμετωπίσουν ασαφή και ελλιπή δεδομένα, τα οποία συχνά είναι τα μόνα διαθέσιμα ιδιαίτερα κατά τα προκαταρκτικά στάδια διερεύνησης, για παράδειγμα, της επικινδυνότητας ενός ναυαγίου. Επιπλέον, τα συστήματα ασαφούς λογικής έχουν τη δυνατότητα να αναπαραστήσουν μη γραμμικές συναρτήσεις με οποιοδήποτε βαθμό ακρίβειας [84] και να αξιοποιήσουν την εμπειρία των ειδικών [40]. Στη ναυτιλιακή βιομηχανία παρόμοιες εφαρμογές έχουν εμφανιστεί σχετικά πρόσφατα και επομένως η διεθνής βιβλιογραφία περιέχει περιορισμένο αριθμό τέτοιων παραδειγμάτων.

Στην έρευνα που παρουσιάζεται στα [5, 6] προτείνεται η χρήση ενός αρθρωτού συστήματος ασαφούς λογικής με ιεραρχική δομή, για εφαρμογή στην ασφάλεια στη θάλασσα, ώστε να οριστεί ένας συντελεστής ρίσκου για κάθε πλοίο. Γίνεται η θεώρηση ότι μια τέτοια μέθοδος, η οποία βασίζεται στην θεωρία της ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόληψη της ρύπανσης στην ανοικτή θάλασσα. Ο προτεινόμενος

συντελεστής ρίσκου συντίθεται από ένα στατικό συντελεστή (Static Risk Factor), ο οποίος λαμβάνει υπόψη στατικά στοιχεία για το κάθε πλοίο, και ένα δυναμικό συντελεστή (Dynamic Risk Factor), ο οποίος λαμβάνει υπόψη τις μετεωρολογικές συνθήκες και την ώρα της ημέρας. Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάζεται μέσω προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα.

Τα πλεονεκτήματα μιας προσέγγισης με τη θεωρία της ασαφούς λογικής, για την αντιμετώπιση συστημάτων που έχουν υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας όπως είναι τα ναυτιλιακά συστήματα, περιγράφονται στα [67, 68]. Αυτή η μελέτη προτείνει ότι συστήματα ασφαλείας που προσεγγίζονται από τη θεωρία της ασαφούς λογικής και χρησιμοποιούν ασαφείς κανόνες της μορφής EAN - TOTE (IF - THEN fuzzy rules) μπορεί να μοντελοποιήσει τον ποιοτικό χαρακτήρα της ανθρώπινης γνώσης και των συλλογιστικών διαδικασιών, αποφεύγοντας τη χρήση ποσοτικών αναλύσεων που χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια. Επιπλέον, θεωρείται ότι μια παρόμοια προσέγγιση μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη για τα προκαταρκτικά στάδια της σχεδίασης ναυτιλιακών συστημάτων μεγάλης κλίμακας, κατά τη διάρκεια των οποίων χρησιμοποιούνται συχνά γλωσσικοί όροι για τη διεξαγωγή αξιολόγησης της ασφαλείας (Safety Assessment), χωρίς να απαιτείται ακριβής ποσοτικοποίηση. Τέλος, η μελέτη υποστηρίζει ότι στο μέλλον η ανάλυση του ρίσκου σε ναυτιλιακές εφαρμογές μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως προσεγγίσεις μέσω της θεωρίας ασαφούς λογικής συμπληρωματικά με τις υπάρχουσες μεθοδολογίες.

Εφαρμογές συστημάτων ασαφούς λογικής

Συστήματα με ιεραρχική δομή που βασίζονται στην ασαφή λογική έχουν αναπτυχθεί για εφαρμογή σε διάφορους τομείς, πέραν της ναυτιλίας. Παραδείγματα της διεθνούς βιβλιογραφίας αφορούν εφαρμογές στον κατασκευαστικό τομέα, στη βιομηχανία, στην ιατρική, στην ανάλυση ρίσκου για φυσικές καταστροφές, στον τομέα της διοίκησης (management), αλλά και στην ασφάλεια υπολογιστικών συστημάτων (security of computing facilities). Γίνεται λοιπόν σαφές η ευελιξία καθώς και η ευρύτητα των πιθανών εφαρμογών για τα συστήματα ασαφούς λογικής, με την ενσωμάτωσή τους σε κατάλληλο πλαίσιο και την ανάπτυξη αντίστοιχων εργαλείων. Ακόμη γίνεται εμφανής η δυνατότητα συνδυασμού μεθόδων ασαφούς λογικής με άλλες, όπως είναι τα διαγράμματα επιρροής (Influence Diagrams) και η αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process). Ακολουθεί σύντομη αναφορά σε χαρακτηριστικά παραδείγματα, κατά τομέα εφαρμογής.

Κατασκευαστικός τομέας. Στο [13] αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο για την εκτίμηση του ρίσκου υπέρβασης του κόστους για διεθνή κατασκευαστικά έργα. Το εργαλείο που προέκυψε στοχεύει στη διαμόρφωση κατάλληλων προσφορών σε διεθνείς διαγωνισμούς συνυπολογίζοντας το ρίσκο που χαρακτηρίζει ένα συγκεκριμένο έργο. Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιεί διαγράμματα επιρροής για την κατασκευή ενός μοντέλου για το ρίσκο. Επιπλέον χρησιμοποιείται η προσέγγιση της εκτίμησης του ασαφούς ρίσκου για την υπέρβαση του κόστους ενός κατασκευαστικού έργου. Το μοντέλο αναπτύχθηκε για μια συγκεκριμένη κατασκευαστική εταιρεία και δοκιμάστηκε με τη χρήση πραγματικές πληροφορίες. Τονίζεται επίσης ότι παρόμοια εργαλεία μπορούν να αναπτυχθούν, με την ίδια μεθοδολογία, για οποιαδήποτε άλλη εταιρεία. Στο [83] αναπτύχθηκε υπολογιστικό μοντέλο για την εκτίμηση του ρίσκου ενός κατασκευαστικού έργου. Η χρήση της ασαφούς λογικής προτιμήθηκε λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος που προκύπτει από την ύπαρξη πολλών παραγόντων που συνεισφέρουν στο ρίσκο ενός κατασκευαστικού έργου. Στόχος της μελέτης είναι η ανάπτυξη ενός εργαλείου για την υποβοήθηση λήψης αποφάσεων κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός έργου. Προτείνεται ότι η εφαρμογή τεχνικών ασαφούς συλλογιστικής παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο για την διαχείριση των αβεβαιοτήτων και του

υποκειμενικού χαρακτήρα της διαδικασίας κατασκευής. Για τον προσδιορισμό της σημασίας διαφόρων παραγόντων ρίσκου χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης.

Μια παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρίσκου βλαβών σε κτήρια που είναι χτισμένα σε εδάφη εξόρυξης στο [41]. Η μέθοδος εξαγωγής συμπερασμάτων με τη χρήση ασαφούς λογικής συνδυάζεται με ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών ώστε να ενσωματωθούν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το ρίσκο, όπως οι επιφανειακές παραμορφώσεις του εδάφους και η αντίσταση των κτηρίων σε αυτές. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να ληφθούν υπόψη τόσο η αβεβαιότητα των δεδομένων όσο και η υποκειμενικότητα στην εκτίμηση διαφόρων παραγόντων από ειδικούς. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου επισημαίνονται με την εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα.

Βιομηχανία. Στο [11] γίνεται εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου ατυχηματικών διαρροών σε χημικά εργοστάσια με τη χρήση ασαφούς λογικής. Στοχεύει στην ανάπτυξη εργαλείου για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε περιπτώσεις ατυχηματικών διαρροών επιβλαβών ουσιών. Κατά την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου τα διαθέσιμα δεδομένα είναι ασαφή και ανακριβή, γεγονός που επιβάλλει κάποιο επίπεδο αβεβαιότητας. Αναφέρεται ότι η αβεβαιότητα σε μια διαδικασία ανάλυσης ρίσκου μπορεί να προέρχεται είτε από την τυχαιότητα είτε από την έλλειψη πληροφοριών. Η εφαρμογή της θεωρίας ασαφούς λογικής, στο πλαίσιο που έχει τεθεί, γίνεται για την αντιμετώπιση αυτού του είδους των αβεβαιότητων.

Ιατρική. Στο [50] αναπτύχθηκε μοντέλο ασαφούς λογικής για την εκτίμηση της νεογνικής θνησιμότητας (neonatal mortality). Το μοντέλο ήταν τύπου Mamdani και το αποτέλεσμα ήταν το ρίσκο θανάτου νεογνού εκφρασμένο ως ποσοστό. Το μοντέλο δοκιμάστηκε με πραγματικά δεδομένα που αναφέρονται σε μια πόλη της Βραζιλίας. Η ακρίβεια του μοντέλου εκτιμήθηκε με τη χρήση καμπυλών ROC (Receiver Operating Characteristic), και σύμφωνα με αυτή προκύπτει ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι κατάλληλο για γενική νοσοκομειακή χρήση.

Ανάλυση ρίσκου για φυσικές καταστροφές. Στην μελέτη [72] αναπτύσσεται ένα έξυπνο σύστημα ασαφούς λογικής για την εκτίμηση του ρίσκου από φυσικές καταστροφές. Η εφαρμογή έγινε για την περίπτωση των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα, ενώ εκτιμάται ότι μπορεί να εφαρμοστεί για οποιοδήποτε τύπο φυσικής καταστροφής. Στόχος του συστήματος είναι η κατηγοριοποίηση των δασικών περιοχών με κριτήριο το μέγεθος του ρίσκου ώστε να υποστηρίξουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων για την κατάλληλη κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Το σύστημα ενσωματώνει τη χρήση δύο ειδών συντελεστών ρίσκου που αντιστοιχούν στο ανθρωπογενές ρίσκο και σε αυτό που οφείλεται στο φυσικό σύστημα. Η ανάπτυξη και η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται στο Fuzzy Logic Toolbox της εφαρμογής MATLAB. Στην περίπτωση [22] αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό μοντέλο για την εκτίμηση του ρίσκου καταστροφών από κεραυνούς. Επιπλέον, αναφέρεται η δυνατότητα που προσφέρει η θεωρία της ασαφούς λογικής για το συνδυασμό γλωσσικών και αριθμητικών μεταβλητών ώστε να εκτιμηθεί η υποκειμενικότητα μιας ανάλυσης ρίσκου και να προσδιοριστεί εάν ένα επίπεδο ρίσκου είναι αποδεκτό.

Τομέας Διοίκησης. Οι τομείς που ασχολούνται με τη διαχείριση της γνώσης, τη στρατηγική πρόβλεψη, και τη διαχείριση των σχέσεων με τους πελάτες συχνά χαρακτηρίζονται από ποιοτικές εκτιμήσεις ειδικών, πιθανή υπερπληροφόρηση (information overflow) αλλά και ασαφείς σχέσεις. Για το λόγο αυτό η επαρκής διαχείριση της ασάφειας είναι σημαντική

για τον τομέα της διοίκησης. Κάποια παραδείγματα εφαρμογών είναι η ανάλυση εταιρικών ισολογισμών με τη χρήση ασαφούς λογικής, η μοντελοποίηση εταιρικής στρατηγικής, και η μοντελοποίηση πληροφοριών ποιοτικού χαρακτήρα σε προσομοιώσεις πραγματικών καταστάσεων [51].

Ασφάλεια Υπολογιστικών Συστημάτων. Η ανάλυση ρίσκου αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία, η οποία συχνά περιλαμβάνει παράγοντες που είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν. Η θεωρία της ασαφούς λογικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των ασαφειών που προκύπτουν και τη μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων με μεγάλο αριθμό παραγόντων. Ειδικότερα στον τομέα της ασφάλειας υπολογιστικών συστημάτων, η χρήση συστημάτων ασαφούς λογικής εκμεταλλεύεται τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα αυτών για τη διεξαγωγή ολοκληρωμένων αναλύσεων ρίσκου. Ένα παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή της ασαφούς λογικής για τη μοντελοποίηση της πιθανής εκμετάλλευσης αδυναμιών στην ασφάλεια βάσεων δεδομένων που είναι αποθηκευμένες σε σκληρούς δίσκους [12]. Με αυτό το παράδειγμα γίνεται σαφής η δυνατότητα των συστημάτων ασαφούς λογικής να καλύψουν αδυναμίες των κλασικών μεθοδολογιών για τη διαμόρφωση συγκεκριμένων προτάσεων αντιμετώπισης, που είναι εξάλλου και ο βασικός στόχος μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης ρίσκου.

3. Εισαγωγή στη Θεωρία της Ασαφούς Λογικής

3.1. Εισαγωγή

Η αντίληψή μας για το φυσικό κόσμο εκφράζεται μέσω εννοιών που δεν έχουν σαφώς ορισμένα όρια. Για παράδειγμα οι εκφράσεις «πολλά», «ψηλός», «πολύ μεγαλύτερο από», «νέο» κλπ. είναι τόσο αληθείς όσο και ψευδείς μέχρι κάποιο βαθμό. Αυτές οι έννοιες μπορούν να οριστούν ως ασαφείς (αόριστες). Αυτή την ασάφεια μπορεί να τη διαχειριστεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος και αποτυπώνεται στη χρήση των φυσικών γλωσσών που χρησιμοποιούνται για την ανθρώπινη επικοινωνία. Ο φυσικός κόσμος είναι πολύπλοκος. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από την εγγενή αβεβαιότητα με τη μορφή της ασάφειας. Η αβεβαιότητα είναι αποτέλεσμα της έλλειψης επαρκούς πληροφορίας. Σύμφωνα με τον *Dr. Lotfi Zadeh*, η Αρχή της Συμβατότητας, η πολυπλοκότητα, και η ανακρίβεια είναι συσχετισμένες και εκφράζεται με την ακόλουθη πρόταση,

Όσο περισσότερο εστιάζουμε σε ένα πραγματικό πρόβλημα, τόσο περισσότερο ασαφής γίνεται η λύση του [69].

Η Ασαφής Λογική (*Fuzzy Logic*) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1965 από τον *Lotfi Zadeh*, και είναι ένα μαθηματικό εργαλείο για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας. Η ασαφής λογική επιτρέπει τη διαχείριση ασαφούς, αβέβαιης, ανακριβούς και ελλιπώς ορισμένης γνώσης και εννοιών με τη χρήση ακριβούς μαθηματικής μοντελοποίησης [73]. Εισάγει την έννοια του υπολογισμού με λέξεις και παρέχει μια τεχνική για την αντιμετώπιση της ανακρίβειας και της έλλειψης της πληροφορίας. Η θεωρία της ασαφούς λογικής παρέχει ένα μηχανισμό για την αναπαράσταση γλωσσικών όρων, όπως «πολλά», «χαμηλό», «μέτριο», «συχνά», «λίγα». Γενικά, η ασαφής λογική προσφέρει μια δομή για την εξαγωγή συμπερασμάτων που δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής της συλλογιστικής που χρησιμοποιεί ο άνθρωπος για τον ίδιο σκοπό. Σε αντίθεση, η παραδοσιακή δυαδική λογική περιγράφει σαφή γεγονότα, τα οποία ή συμβαίνουν είτε όχι χωρίς κάποια ενδιάμεση κατάσταση. Η δυαδική λογική χρησιμοποιεί τη θεωρία πιθανοτήτων για να προσδιορίσει αν ένα γεγονός θα συμβεί, μετρώντας την πιθανότητα με την οποία αναμένεται ένα γεγονός να συμβεί. Η θεωρία της Ασαφούς Λογικής βασίζεται στο ότι ένα γεγονός μπορεί να ανήκει μερικώς σε ένα σύνολο, όπου βασίζονται επίσης οι γνωστικές διαδικασίες (*cognitive processes*). Η χρήση των ασαφών συνόλων οφείλεται στη δυνατότητά τους να μοντελοποιούν αβέβαια ή ασαφή δεδομένα, τα οποία πολύ συχνά συναντάμε στην καθημερινή εμπειρία του κόσμου.

Είναι σημαντικό να τονιστεί η στενή σχέση μεταξύ της ασάφειας και της πολυπλοκότητας. Όταν η πολυπλοκότητα ενός προβλήματος, ή του συστήματος που χρησιμοποιείται για την επίλυση αυτού, ξεπεράσει ένα ορισμένο επίπεδο, τότε η φύση του συστήματος γίνεται ασαφής. Το έναυσμα για την ανάπτυξη της θεωρίας της ασαφούς λογικής ήταν η απότομη μείωση στην πληροφορία που προσφέρουν τα κλασικά μαθηματικά μοντέλα καθώς η πολυπλοκότητα των προβλημάτων μεγαλώνει. Ο *Zadeh* τόνισε το γεγονός, δηλώνοντας ότι με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα η δυνατότητα που έχουμε για ακριβείς προβλέψεις μειώνεται. Τα προβλήματα που απαντώνται στον φυσικό κόσμο χαρακτηρίζονται από μεγάλη πολυπλοκότητα, η οποία εμπεριέχει ένα επίπεδο αβεβαιότητας. Όταν λοιπόν η αβεβαιότητα

γίνεται μεγαλύτερη, τότε την ίδια τάση ακολουθεί και η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Η παραδοσιακή μοντελοποίηση και οι τεχνικές ανάλυσης των συστημάτων απαιτούν μεγάλη ακρίβεια για τέτοιου είδους προβλήματα, ώστε για να διαχειριστούμε αυτή την πολυπλοκότητα εισάγουμε κατάλληλες απλουστεύσεις και υποθέσεις με σκοπό να πετύχουμε ένα ικανοποιητικό συμβιβασμό ανάμεσα στις διαθέσιμες πληροφορίες και στο επίπεδο της αβεβαιότητας που είμαστε διατεθειμένοι να αποδεχτούμε. Από αυτή την οπτική, η θεωρία των ασαφών συστημάτων είναι παρόμοια με διαφορετικές θεωρίες που χρησιμοποιούνται στον κλάδο των μηχανικών, γιατί σχεδόν όλες προσπαθούν να χαρακτηρίσουν τον φυσικό κόσμο προσεγγιστικά.

Το μαθηματικό εργαλείο που παρέχει τα μέσα για την μοντελοποίηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με την ασάφεια, την ανακρίβεια και την έλλειψη πληροφορίας γύρω από ένα πρόβλημα είναι τα *ασαφή σύνολα* [82]. Για παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την έννοια «κοντός άνθρωπος». Για κάποιο άτομο X , κοντός άνθρωπος μπορεί να είναι αυτός του οποίου το ύψος είναι μικρότερο από 1.6 μ. Για ένα άλλο άτομο Y , το όριο μπορεί να είναι στο 1.5 μ. Ο χαρακτηρισμός «κοντός» αποτελεί μια γλωσσική περιγραφή. Ο όρος «κοντός» επικοινωνεί το ίδιο νόημα στα δύο άτομα X και Y , τα οποία όμως δεν δίνουν έναν κοινό και μοναδικό ορισμό. Η μεταβλητή «κοντός» αποτελεί μια *γλωσσική μεταβλητή* και αντιπροσωπεύει την ανακρίβεια του συστήματος.

Η αβεβαιότητα προκύπτει από έλλειψη γνώσης γύρω από τη λειτουργία ενός συστήματος, την εγγενή τυχαιότητα, και την ασάφεια όπως ακριβώς βρίσκεται στις φυσικές γλώσσες. Ο Lotfi Zadeh πρότεινε την ιδέα της *συμμετοχής σε σύνολο* (set membership) ώστε να είναι δυνατή η λήψη κατάλληλων αποφάσεων σε συνθήκες αβεβαιότητας. Εάν θεωρήσουμε ότι «κοντός» είναι ένα ύψος ίσο ή μικρότερο από 1.6 μ., τότε ένα ύψος ίσο με 1.5 μ. εύκολα θα κατηγοριοποιηθεί στο σύνολο «κοντός» και αντίστοιχα ένα ύψος ίσο με 1.7 μ. δεν θα ανήκει στο ίδιο σύνολο. Το ποσοστό συμμετοχής στο σύνολο είναι «1» αν ένα στοιχείο ανήκει στο σύνολο και «0» αν δεν ανήκει σε αυτό. Σε αυτό το πλαίσιο η συμμετοχή σε ένα σύνολο είναι μια δυαδική ιδιότητα, δηλαδή ένα στοιχείο μπορεί ή να ανήκει στο σύνολο είτε όχι. Η μαθηματική απεικόνιση είναι η ακόλουθη:

$$\chi_{A(x)} = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

όπου $\chi_{A(x)}$ είναι το ποσοστό συμμετοχής ενός στοιχείου στο σύνολο A .

Αυτή η ιδιότητα επεκτάθηκε ώστε να περιλαμβάνει «βαθμούς συμμετοχής» στο πραγματικό συνεχές διάστημα $[0,1]$. Ο Zadeh όρισε τα ασαφή σύνολα ως αυτά που μπορούν να περιλάβουν «βαθμούς συμμετοχής» για τα στοιχεία τους. Η έννοια του ασαφούς συνόλου έρχεται σε αντίθεση με την κλασσική έννοια του δυαδικού συνόλου (σαφές σύνολο), του οποίου τα όρια είναι σαφώς καθορισμένα. Μια διαφορετική ερμηνεία είναι η ακόλουθη: ο βαθμός συμμετοχής ενός συγκεκριμένου στοιχείου που ανήκει σε ένα ασαφές σύνολο εκφράζει το βαθμό συμβατότητας του στοιχείου με την έννοια που αντιπροσωπεύει το σύνολο. Επομένως το γεγονός ότι ένα ασαφές σύνολο A περιέχει ένα στοιχείο x στο βαθμό $\alpha(x)$ εκφράζεται ως $\alpha(x) = Degree(x \in A)$ και η εικόνα $\alpha : X \rightarrow \{Membership\ Degrees\}$ καλείται *συνάρτηση συνόλου* ή *συνάρτηση συμμετοχής*. Αυτό το ασαφές σύνολο μπορεί να αναπαρασταθεί ως $A = \{(x, \alpha(x))\}, x \in X$. Αυτός ο ορισμός επιβάλλει έναν ελαστικό περιορισμό στις δυνατές τιμές των στοιχείων $x \in X$ που καλείται *κατανομή δυνατότητας* (*possibility distribution*). Τα ασαφή σύνολα περιγράφουν την ασάφεια αποκλειστικά μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής που είναι εικόνες από ένα πεδίο X σε ένα μοναδιαίο διάστημα που περιλαμβάνει τους βαθμούς συμμετοχής.

Γενικά στα κλασσικά δυαδικά σύνολα δεν υπάρχει αβεβαιότητα, δηλαδή τα όριά τους είναι σαφώς ορισμένα. Στην περίπτωση όμως των ασαφών συνόλων, επειδή υπάρχει αβεβαιότη-

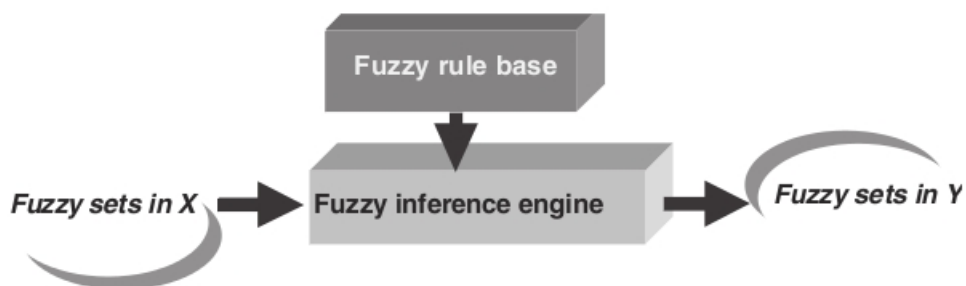
τα, τα όριά τους μπορούν να οριστούν ασαφώς. Η συνάρτηση συμμετοχής ενός συνόλου αντιστοιχίζει κάθε στοιχείου αυτού σε ένα βαθμό συμμετοχής ανάμεσα στο 0 και στο 1 και περιγράφει αυτό το σύνολο κατά μοναδικό τρόπο. Οι τιμές 0 και 1 περιγράφουν αντίστοιχα τις καταστάσεις «δεν ανήκει» και «ανήκει» για ένα κλασσικό σύνολο· οι ενδιάμεσες τιμές εκπροσωπούν την ιδιότητα της ασάφειας (fuzziness). Ο προσδιορισμός της μορφής της συνάρτησης συμμετοχής είναι υποκειμενικός και εξαρτάται από τη συγκεκριμένη περίπτωση. Εξαρτάται δηλαδή από την αντίληψη που υπάρχει για τα δεδομένα και όχι από την τυχαιότητα. Αυτή είναι μια σημαντική διάκριση που ξεχωρίζει τη θεωρία ασαφών συνόλων από τη θεωρία πιθανοτήτων.

Στην πράξη η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για υπολογισμούς με λέξεις. Με αυτή τη δυνατότητα μπορούν να δημιουργηθούν υπολογιστικά συστήματα που ενσωματώνουν την ανθρώπινη γνώση εκπεφρασμένη στη γλώσσα που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Ένα τέτοιο σύστημα, το οποίο καλείται επίσης μηχανή εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων (fuzzy inference engine) ή ασαφής βάση κανόνων (fuzzy rule-base), έχει τη δυνατότητα να βγάζει προσεγγιστικά συμπεράσματα με τρόπο παρόμοιο, αν και πολύ πιο πρωτόγονο, με αυτόν που χρησιμοποιεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Παρόλο που μέχρι σήμερα μόνο μερικές πλευρές της φυσικής γλώσσας μπορούν να εκφραστούν επιτυχώς από τη μαθηματική μοντελοποίηση που προσφέρουν τα ασαφή σύνολα, η ασαφής λογική παραμένει ένας από τους πιο πρακτικούς τρόπους για προσομοίωση της ανθρώπινης γνώσης με ρεαλιστικό τρόπο. Η προσέγγιση αυτής της θεωρίας υποθέτει ότι οι άνθρωποι δεν αναπαριστούν κατηγορίες αντικειμένων (π.χ. κατηγορία των ψηλών ανθρώπων ή την κατηγορία των αριθμών που είναι μεγαλύτεροι από το 50) με σαφή όρια αλλά ως σύνολα που περιέχουν στοιχεία με ενδιάμεσους βαθμούς συμμετοχής σε αυτά ανάμεσα στην πλήρη και τη μηδενική συμμετοχή. Επομένως τα ασαφή σύνολα λειτουργούν ως έννοιες που δίνουν τη δυνατότητα να αντιμετωπίσουμε την ασάφεια με ποσοτικό τρόπο [69].

Τα ασαφή σύνολα αποτελούν τα δομικά στοιχεία για κανόνες της μορφής EAN - TOTE. Η γενική δομή τέτοιου είδους κανόνων είναι η εξής: «EAN X είναι A TOTE Y είναι B», όπου A και B είναι ασαφή σύνολα. Ο όρος «ασαφή συστήματα» αναφέρεται κυρίως σε συστήματα των οποίων η συμπεριφορά καθορίζεται από κανόνες της μορφής EAN - TOTE. Το κομμάτι EAN ενός κανόνα καλείται υποθετικό (*antecedent*) ενώ το δεύτερο κομμάτι TOTE καλείται συμπερασματικό (*consequent*). Ένα ασαφές σύστημα είναι μια συλλογή ασαφών κανόνων που μετασχηματίζει τα δεδομένα εισόδου. Η μηχανή εξαγωγής ασαφών συμπερασμάτων (αλγόριθμος) συνδυάζει τους ασαφείς κανόνες σε μια εικόνα που αντιστοιχίζει ασαφή σύνολα στο χώρο εισόδου X σε ασαφή σύνολα στο χώρο εξόδου Y χρησιμοποιώντας τις αρχές της ασαφούς λογικής (Σχ. 3.1). Από τη σκοπιά της αναπαράστασης πληροφοριών, οι κανόνες της μορφής EAN - TOTE είναι ένας τρόπος έκφρασης γνώσης που είναι ανακριβής. Το βασικό χαρακτηριστικό της συλλογιστικής διαδικασίας χρησιμοποιώντας τέτοιου τύπου κανόνες είναι η δυνατότητα να εξάγουμε ένα συμπέρασμα από έναν ασαφή κανόνα ακόμα και στην περίπτωση που οι συνθήκες αυτού ικανοποιούνται μερικώς.

Τα ασαφή συστήματα έχουν λοιπόν δύο συστατικά στοιχεία. Το ένα είναι η βάση των κανόνων που αποτελεί μια συλλογή κανόνων εκπεφρασμένων σε φυσική γλώσσα και το άλλο είναι η μη γραμμική απεικόνιση των δεδομένων εισόδου σε δεδομένα εξόδου. Αυτά τα συστήματα μπορούν θεωρητικά να αναπαραστήσουν ένα οποιοδήποτε σύστημα με αυθαίρετη ακρίβεια, δηλαδή λειτουργούν ως *universal approximators*.

Είναι σαφές λοιπόν ότι το μεγαλύτερο μειονέκτημα των ασαφών συστημάτων είναι η βάση των κανόνων που χρησιμοποιούν για να εξάγουν συμπεράσματα από τα δεδομένα εισόδου. Η ακρίβεια των συμπερασμάτων εξαρτάται από την ακρίβεια των κανόνων, δηλαδή έξυπνα δομημένοι κανόνες χαρακτηρίζουν ένα έξυπνο σύστημα. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι το



Σχήμα 3.1.: Δομή απλού ασαφούς συστήματος

γεγονός ότι ο αριθμός των κανόνων αυξάνεται εκθετικά με τη διάσταση του χώρου εισόδου (αριθμός των μεταβλητών εισόδου του συστήματος). Η εκθετική αύξηση του αριθμού των κανόνων ονομάζεται *αρχή της διαστατικότητας (principle of dimensionality)* και αποτελεί γενικό πρόβλημα των μαθηματικών μοντέλων.

Επομένως τα ασαφή μοντέλα δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τα πιθανοθεωρητικά μοντέλα αφού σε κάποιες περιπτώσεις δίνουν καλύτερα αποτελέσματα ενώ σε άλλες όχι. Η αποδεδειγμένη επιτυχής χρήση, όσον αφορά την ποιότητα των αποτελεσμάτων, των ασαφών μοντέλων έγκειται σε περιπτώσεις πολύπλοκων προβλημάτων. Επιπλέον η ασαφής λογική έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να συμβιβάσει τις απαιτήσεις για ακρίβεια και σημαντικότητα κατά την επίλυση ενός προβλήματος. Η ασαφής λογική ενσωματώνει τη σχετική σημασία της ακρίβειας: Πόσο σημαντικό είναι να είμαστε πολύ ακριβείς όταν μας αρκεί μια προσεγγιστική απάντηση [71].

Ακολουθεί μια συνοπτική λίστα των πλεονεκτημάτων των ασαφών συστημάτων:

Απλότητα. Οι μαθηματικές έννοιες που υποστηρίζουν τη θεωρία της ασαφούς λογικής είναι πολύ απλές, οπότε η περιγραφή των συστημάτων είναι εύκολα κατανοητή.

Ευελιξία. Είναι πολύ εύκολο να προστεθούν επιπρόσθετες λειτουργίες σε ένα δεδομένο σύστημα.

Ασάφεια. Η ασαφής λογική είναι μια θεωρία που διαχειρίζεται ασαφή δεδομένα.

Universal Approximation. Μέσω της θεωρίας της ασαφούς λογικής μπορούμε να μοντελοποιήσουμε ένα οποιοδήποτε σύστημα με όσο μεγάλη ακρίβεια απαιτούμε. Δηλαδή μπορούμε να αντιστοιχίσουμε ένα οποιοδήποτε σετ δεδομένων εισόδου με οποιοδήποτε σετ δεδομένων εξόδου.

Γνώμες Ειδικών. Για την κατασκευή τέτοιων συστημάτων υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθεί η εμπειρία και η γνώση ειδικών που ήδη κατανοούν το υπό μελέτη σύστημα.

Φυσική Γλώσσα. Η διατύπωση των κανόνων των ασαφών συστημάτων βασίζεται στη χρήση της φυσικής γλώσσας που είναι η βάση της ανθρώπινης επικοινωνίας. Η ευκολία στην εφαρμογή και στην κατανόηση τέτοιου είδους συστημάτων οφείλεται σε αυτό το χαρακτηριστικό.

3.2. Ασαφή σύνολα

Ένα ασαφές σύνολο είναι ένα σύνολο που δεν έχει σαφώς ορισμένα όρια και επομένως μπορεί να περιέχει στοιχεία που συμμετέχουν μερικώς σε αυτό. Δηλαδή ένα ασαφές σύνολο μπορεί

να περιέχει στοιχεία που αποκλίνουν από τις δύο ακραίες περιπτώσεις, οι οποίες είναι να ανήκουν ή να μην ανήκουν σε αυτό.

Για να γίνει κατανοητή η έννοια του ασαφούς συνόλου πρέπει να αναλογιστούμε τον ορισμό του κλασικού συνόλου. Ένα κλασικό σύνολο είναι ένα δοχείο που ή περιέχει είτε δεν περιέχει ένα δεδομένο στοιχείο. Πρώτος ο Αριστοτέλης ήταν αυτός που σχημάτισε την *Αρχή του Αποκλειόμενου Μέσου*, σύμφωνα με την οποία ένα στοιχείο X μπορεί είτε να ανήκει είτε να μην ανήκει σε ένα σύνολο A . Μια διαφορετική διατύπωση αυτής της Αρχής, χρησιμοποιώντας όρους συλλογιστικής είναι:

Για μια οποιαδήποτε πρόταση ισχύει ότι θα είναι αληθής ή η ίδια ή η άρνηση αυτής.

Αυτή η Αρχή απαιτεί ότι οι τιμές της αλήθειας μίας πρότασης μπορεί να είναι μόνο δύο. Δηλαδή δεν υπάρχει κάτι που να αληθεύει σε ένα συγκεκριμένο βαθμό, λίγο ή πολύ.

Η ασαφής λογική δείχνει τη χρησιμότητά της όταν το αντικείμενο της μελέτης είναι ο τρόπος με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται ορισμένες έννοιες στην πραγματικότητα (ανάλογα με τις προσωπικές αντιλήψεις και το πολιτισμικό υπόβαθρο) σε αντίθεση με διάφορες απλουστευτικές κατηγοριοποιήσεις που χρησιμεύουν για λογιστικούς σκοπούς και μόνο. Η ακόλουθη πρόταση θέτει το θεμέλιο λίθο της ασαφούς λογικής.

Στα πλαίσια της ασαφούς λογικής, η αλήθεια μιας οποιαδήποτε πρότασης είναι μερική και όχι απόλυτη [71].

Οποιαδήποτε πρόταση μπορεί να είναι ασαφής. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της ασαφούς λογικής είναι ότι προσφέρει τη δυνατότητα να δώσουμε μια ασαφή απάντηση (όχι ακριβώς ναι ή όχι) σε μια σαφή ερώτηση.

Ακολουθεί ο ορισμός του ασαφούς συνόλου όπως δόθηκε από τον Dr. Lotfi Zadeh.

Ένα ασαφές σύνολο είναι μια ομάδα (κλάση) αντικειμένων που συνοδεύονται από συνεχείς βαθμούς συμμετοχής. Ένα τέτοιο σύνολο χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση συμμετοχής (χαρακτηριστική συνάρτηση) που αναθέτει σε κάθε αντικείμενο ένα βαθμό συμμετοχής ανάμεσα στο 0 και στο 1. Οι έννοιες του υποσυνόλου, της ένωσης, της τομής, του συμπληρώματος, της κυρτότητας κλπ. επεκτείνονται σε τέτοιου είδους σύνολα [81].

Πολύ συχνά στο φυσικό κόσμο απαντώνται κατηγορίες (κλάσεις) αντικειμένων που περιγράφονται από σαφώς ορισμένα κριτήρια συμμετοχής. Για παράδειγμα η κατηγορία των ζώων είναι ξεκάθαρο ότι περιέχει τους σκύλους και τα άλογα και εξίσου ξεκάθαρο ότι εξαιρεί αντικείμενα όπως είναι οι πέτρες και τα φυτά. Από την άλλη όμως η κατηγορία όλων των πραγματικών αριθμών που είναι πολύ μεγαλύτεροι από το 1 δεν είναι τόσο σαφές αν περιέχει τον αριθμό 10. Αν και αυτές οι κατηγορίες δεν αποτελούν σύνολα με τη στενή μαθηματική έννοια, παίζουν σημαντικό ρόλο στη συλλογιστική του ανθρώπου.

Η έννοια του ασαφούς συνόλου παρέχει ένα σημείο έναρξης για τη δημιουργία ενός εννοιολογικού πλαισίου που μοιάζει σε πολλά σημεία με το πλαίσιο που χρησιμοποιείται στα κλασικά σύνολα, αλλά είναι πιο γενικό. Ουσιαστικά ένα τέτοιο πλαίσιο παρέχει ένα τρόπο να αντιμετωπίσουμε προβλήματα στα οποία η πηγή της ασάφειας είναι η απουσία σαφώς ορισμένων κριτηρίων συμμετοχής σε μια κατηγορία, παρά προβλήματα στα οποία η πηγή της ασάφειας είναι η παρουσία τυχαίων μεταβλητών.

Ορισμοί

Έστω X χώρος σημείων (αντικειμένων), όπου x είναι ένα τυχαίο σημείο του X . Οπότε $X = \{x\}$.

Ένα ασαφές σύνολο (κλάση) A στο χώρο X χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση συμμετοχής (χαρακτηριστική) $f_A(x)$ που συσχετίζει κάθε σημείο του X με ένα πραγματικό αριθμό στο διάστημα $[0, 1]$, όπου η τιμή της $f_A(x)$ στο x είναι ο βαθμός συμμετοχής του x στο A . Επομένως όσο πιο κοντά είναι η τιμή της $f_A(x)$ στη μονάδα, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός συμμετοχής του x στο A . Εάν το A είναι ένα κλασικό σύνολο, τότε η συνάρτηση συμμετοχής που το χαρακτηρίζει μπορεί να πάρει μόνο δύο τιμές το 0 και το 1 στις περιπτώσεις που το x δεν ανήκει ή ανήκει σε αυτό αντίστοιχα. Δηλαδή σε αυτή την περίπτωση η συνάρτηση συμμετοχής εκφυλίζεται στη χαρακτηριστική συνάρτηση ενός κλασικού συνόλου A .

Παράδειγμα. Έστω X η γραμμή των πραγματικών αριθμών R^1 και έστω A ένα ασαφές σύνολο αριθμών που είναι πολύ μεγαλύτερο από τη μονάδα. Μπορούμε να ορίσουμε έναν ακριβή, αν και υποκειμενικό, χαρακτηρισμό του A προσδιορίζοντας την $f_A(x)$ ως συνάρτηση επί το R^1 . Αντιπροσωπευτικές τιμές μιας τέτοιας συνάρτησης μπορεί να είναι οι ακόλουθες: $f_A(0) = 0, f_A(1) = 0, f_A(5) = 0.01, f_A(10) = 0.2, f_A(100) = 0.95, f_A(500) = 1$.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, αν και η συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου έχει παρόμοια μορφή με μια συνάρτηση πιθανότητας όταν το X είναι ένα αριθμήσιμο σύνολο¹ (ή με μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας όταν το X είναι συνεχές), υπάρχουν βασικές διαφορές ανάμεσα στις δύο έννοιες. Μάλιστα η έννοια του ασαφούς συνόλου δεν είναι σε καμία περίπτωση στατιστικής φύσεως.

Ακολουθούν διάφοροι ορισμοί που είναι επεκτάσεις των αντίστοιχων ορισμών για τα κλασικά σύνολα.

- Ένα ασαφές σύνολο είναι κενό εάν και μόνο εάν η συνάρτηση συμμετοχής του είναι μηδενική σε όλο το X .
- Δύο ασαφή σύνολα A και B είναι ίσα εάν και μόνο εάν οι συναρτήσεις συμμετοχής τους είναι ίσες για όλα τα x που ανήκουν στο X . Δηλαδή, $A = B \iff f_A(x) = f_B(x), \forall x \in X$.
- Το συμπλήρωμα ενός ασαφούς συνόλου A γράφεται ως A' και ορίζεται από την Εξ. 3.2.1.

$$f_{A'} = 1 - f_A \quad (3.2.1)$$

- Υποσύνολα. Το σύνολο A είναι υποσύνολο του B εάν μόνο εάν ισχύει:

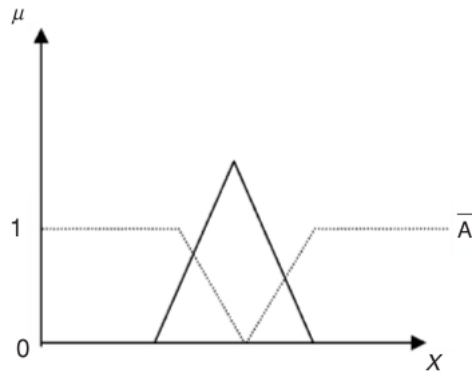
$$A \subset B \iff f_A \leq f_B \quad (3.2.2)$$

- Ένωση. Η ένωση δύο ασαφών συνόλων A και B με συναρτήσεις συμμετοχής $f_A(x)$ και $f_B(x)$ αντίστοιχα είναι ασαφές σύνολο C , γράφεται ως $C = A \cup B$, και η συνάρτηση συμμετοχής αυτού είναι:

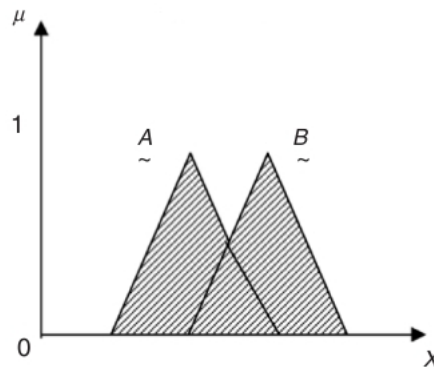
$$f_C(x) = \max[f_A(x), f_B(x)], x \in X \quad (3.2.3)$$

Για την πράξη της ένωσης ισχύει η προσεταιριστική ιδιότητα, $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$.

¹ Αριθμήσιμο είναι ένα σύνολο το οποίο είτε είναι πεπερασμένο ή έχει τον ίδιο αριθμό στοιχείων με κάποιο υποσύνολο του συνόλου των φυσικών αριθμών.



Σχήμα 3.2.: Συμπλήρωμα ασαφούς συνόλου



Σχήμα 3.3.: Ένωση δύο ασαφών συνόλων \tilde{A} και \tilde{B}

- Τομή. Η τομή δύο ασαφών συνόλων A και B με συναρτήσεις συμμετοχής $f_A(x)$ και $f_B(x)$ αντίστοιχα είναι ασαφές σύνολο C , γράφεται ως $C = A \cap B$, και η συνάρτηση συμμετοχής αυτού είναι:

$$f_C(x) = \min [f_A(x), f_B(x)], x \in X \quad (3.2.4)$$

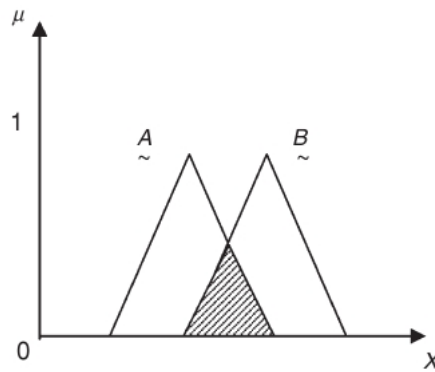
Όπως και στην περίπτωση των κλασικών συνόλων, τα ασαφή σύνολα A και B είναι ξένα μεταξύ τους εάν η τομή τους είναι το κενό σύνολο. Η μεταβατική ιδιότητα ισχύει και για την πράξη της τομής.

- Αρχή του αποκλειόμενου μέσου. Αυτή η αρχή δεν ισχύει για τα ασαφή σύνολα. Εφόσον δύο ασαφή σύνολα μπορούν να υπερκαλύπτουν το ένα το άλλο, τότε το ίδιο μπορεί να ισχύει για ένα ασαφές σύνολο και το συμπλήρωμά του. Επομένως για ένα ασαφές σύνολο A που ανήκει στο χώρο X ισχύουν οι σχέσεις

$$A \cup A' \neq X,$$

$$A \cap A' \neq \emptyset$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι η έννοια του «ανήκειν», η οποία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην περίπτωση των κλασικών συνόλων, δεν έχει την ίδια σημασία στην περίπτωση των ασαφών



Σχήμα 3.4.: Τομή δύο ασαφών συνόλων A και B

συνόλων. Επομένως δεν έχει νόημα η δήλωση ότι ένα σημείο x ανήκει σε κάποιο ασαφές σύνολο A πέραν της τετριμμένης περίπτωσης όταν η $f_A(x)$ είναι θετική. Μπορούμε να ορίσουμε δύο επίπεδα α και β ($0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1, \alpha > \beta$) και να πούμε ότι:

1. Το x ανήκει στο A αν $f_A(x) \geq \alpha$
2. Το x δεν ανήκει στο A αν $f_A(x) \leq \beta$
3. Το x δεν γνωρίζουμε αν ανήκει ή όχι στο A αν $\beta < f_A(x) < \alpha$

Με τα παραπάνω καταλήγουμε σε μια λογική με τρεις τιμές αλήθειας:

- Αληθές όταν $f_A(x) \geq \alpha$
- Ψευδές όταν $f_A(x) \leq \beta$
- Αβέβαιο όταν $\beta < f_A(x) < \alpha$

Ιδιότητες Πράξεων

Έχοντας ορίσει το συμπλήρωμα, την τομή και την ένωση (Εξ. 3.2.1, 3.2.4 και 3.2.3 αντίστοιχα) είναι εύκολο να προεκτείνουμε πολλές από τις βασικές ταυτότητες που ισχύουν για τα κλασικά σύνολα.

Νόμοι του De Morgan

$$(A \cup B)' = A' \cap B' \quad (3.2.5)$$

$$(A \cap B)' = A' \cup B' \quad (3.2.6)$$

Επιμεριστική ιδιότητα

$$C \cap (A \cup B) = (C \cap A) \cup (C \cap B) \quad (3.2.7)$$

$$C \cup (A \cap B) = (C \cup A) \cap (C \cup B) \quad (3.2.8)$$

Αντιμεταθετικότητα

$$A \cup B = B \cup A, \quad (3.2.9)$$

$$A' \cap B' = B' \cap A' \quad (3.2.10)$$

Προσεταιριστική ιδιότητα

$$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C, \quad (3.2.11)$$

$$A' \cap (B' \cap C') = (A' \cap B') \cap C' \quad (3.2.12)$$

Ταυτοδύναμη ιδιότητα

$$A \cup A = A, \quad (3.2.13)$$

$$A' \cap A' = A' \quad (3.2.14)$$

Ταυτότητα

$$A \cup \emptyset = A \text{ και } A \cap X = A,$$

$$A \cap \emptyset = \emptyset \text{ και } A \cup X = X$$

Μεταβατική ιδιότητα

$$\text{Εάν } A \subset B \subset C \text{ τότε } A \subset C$$

Οι προηγούμενες (και παρόμοιες με αυτές) ισότητες μπορούν να αποδειχθούν αν για τις αντίστοιχες σχέσεις για τις συναρτήσεις συμμετοχής των A , B , και C δείξουμε ότι καταλήγουν σε ταυτότητες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της Εξ. 3.2.5 έχουμε

$$1 - \max [f_A, f_B] = \min [1 - f_A, 1 - f_B] \quad (3.2.15)$$

που εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε αν είναι ταυτότητα ελέγχοντας για τις δύο δυνατές περιπτώσεις: $f_A(x) > f_B(x)$ και $f_A(x) < f_B(x)$.

Παρόμοια και στην περίπτωση της εξ. 3.2.8 η αντίστοιχη σχέση με τις συναρτήσεις συμμετοχής είναι:

$$\max [f_C, \min [f_A, f_B]] = \min [\max [f_C, f_A], \max [f_C, f_B]] \quad (3.2.16)$$

που εύκολα μπορούμε να διαπιστώσουμε αν είναι ταυτότητα ελέγχοντας για τις έξι δυνατές περιπτώσεις:

$$f_A(x) > f_B(x) > f_C(x), f_A(x) > f_C(x) > f_B(x), f_B(x) > f_A(x) > f_C(x),$$

$$f_B(x) > f_C(x) > f_A(x), f_C(x) > f_A(x) > f_B(x), f_C(x) > f_B(x) > f_A(x).$$

Αλγεβρικές πράξεις

Εκτός από τις πράξεις της ένωσης και της τομής, μπορούν να οριστούν διάφοροι άλλοι τρόποι ώστε να συνδυάζονται και να συσχετίζονται μεταξύ τους διάφορα ασαφή σύνολα. Μερικές από τις σημαντικότερες πράξεις είναι οι ακόλουθες.

Αλγεβρικό γινόμενο. Το αλγεβρικό γινόμενο δύο συνόλων A και B συμβολίζεται ως AB και ορίζεται ως ακολούθως

$$f_{AB} = f_A f_B$$

Ισχύει,

$$AB \subset A \cap B$$

Αλγεβρικό άθροισμα. Το αλγεβρικό άθροισμα δύο συνόλων A και B συμβολίζεται ως $A + B$ και ορίζεται ως ακολούθως

$$f_{A+B} = f_A + f_B \quad (3.2.17)$$

εάν ισχύει ότι το άθροισμα $f_A + f_B$ είναι μικρότερο ή ίσο της μονάδας. Επομένως το αλγεβρικό άθροισμα μεταξύ δύο ασαφών συνόλων A και B έχει νόημα μόνο όταν ισχύει $f_A(x) + f_B(x) \leq 1, \forall x$.

Απόλυτη διαφορά. Η απόλυτη διαφορά δύο συνόλων A και B συμβολίζεται ως $|A - B|$ και ορίζεται ως ακολούθως

$$f_{|A-B|} = |f_A - f_B| \quad (3.2.18)$$

Κυρτός συνδυασμός. Έστω A, B και Λ αυθαίρετα ασαφή σύνολα. Ο κυρτός συνδυασμός² των A, B και Λ συμβολίζεται ως $(A, B; \Lambda)$ και ορίζεται από την Εξ. 3.2.19:

$$(A, B; \Lambda) = \Lambda A + \Lambda' B \quad (3.2.19)$$

όπου Λ' είναι το συμπλήρωμα του Λ . Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις συμμετοχής η Εξ. 3.2.19 γίνεται

$$f_{(A,B;\Lambda)}(x) = f_\Lambda(x)f_A(x) + [1 - f_\Lambda(x)]f_B(x), x \in X \quad (3.2.20)$$

Μια βασική ιδιότητα του κυρτού συνδυασμού είναι η εξής

$$A \cap B \subset (A, B; \Lambda) \subset A \cup B, \forall \Lambda \quad (3.2.21)$$

Αυτή η ιδιότητα είναι μια άμεση συνέπεια των ανισοτήτων

$$\min [f_A(x), f_B(x)] \leq \lambda f_A(x) + (1 - \lambda) f_B(x) \leq \max [f_A(x), f_B(x)], x \in X, \quad (3.2.22)$$

που ισχύει για όλα τα λ στο διάστημα $[0, 1]$. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι για

² Κυρτός συνδυασμός δύο διανυσμάτων f και g εννοείται ο γραμμικός συνδυασμός της μορφής $\lambda f + (1 - \lambda)g, 0 \leq \lambda \leq 1$.

οποιοδήποτε ασαφές σύνολο C για το οποίο ισχύει $A \cap B \subset C \subset A \cup B$, υπάρχει πάντα ένα σύνολο Λ τέτοιο ώστε $C = (A, B; \Lambda)$. Η συνάρτηση συμμετοχής αυτού του συνόλου ορίζεται από την Εξ. 3.2.23:

$$f_{\Lambda}(x) = \frac{f_C(x) - f_B(x)}{f_A(x) - f_B(x)}, x \in X \quad (3.2.23)$$

Ασαφής συσχέτιση. Η έννοια της συσχέτισης³ (που είναι η γενίκευση της έννοιας της συνάρτησης) επεκτείνεται κατά τρόπο φυσικό στα ασαφή σύνολα και παίζει σημαντικό ρόλο σε αυτή τη θεωρία αλλά και στις εφαρμογές της, ακριβώς όπως συμβαίνει και στην περίπτωση των κλασικών συνόλων.

Στο πλαίσιο των ασαφών συνόλων, η ασαφής συσχέτιση στο χώρο X είναι ένα ασαφές σύνολο στο χώρο $X \times X$. Για παράδειγμα, η συσχέτιση που συμβολίζεται ως $x \gg y$, $x, y \in \mathbb{R}^1$, είναι ένα ασαφές σύνολο A στο χώρο \mathbb{R}^2 , με συνάρτηση συμμετοχής $f_A(x, y)$ με δυνατές (αυθαίρετες) αντιπροσωπευτικές τιμές: $f_A(10, 5) = 0$, $f_A(100, 10) = 0.7$, $f_A(100, 1) = 1$, κλπ.

Γενικότερα, μπορεί να οριστεί μια n -οστή ασαφής συσχέτιση στο χώρο X ως ένα ασαφές σύνολο A στο χώρο $X \times X \times \dots \times X$. Για τέτοιου είδους συσχετίσεις η συνάρτηση συμμετοχής είναι της μορφής $f_A(x_1, \dots, x_n)$, $x_i \in X$, $i = 1, \dots, n$.

Για την περίπτωση των δυαδικών ασαφών συσχετίσεων, η σύνθεση δύο συσχετίσεων A και B συμβολίζεται ως $B \circ A$ και ορίζεται ως μια ασαφής συσχέτιση στο χώρο X , της οποίας η συνάρτηση συμμετοχής συνδέεται με αυτές των A και B μέσω της Εξ. 3.2.24:

$$f_{B \circ A}(x, y) = \sup_{\nu} \min [f_A(x, \nu), f_B(\nu, y)] \quad (3.2.24)$$

Για την πράξη της σύνθεσης ισχύει η μεταβατική ιδιότητα: $A \circ (B \circ C) = (A \circ B) \circ C$.

Ασαφή σύνολα που προκύπτουν από την εφαρμογή συναρτήσεων. Έστω T μια συνάρτηση με πεδίο ορισμού το χώρο X και πεδίο τιμών το χώρο Y . Έστω ασαφές σύνολο B που ανήκει στο χώρο Y και έχει συνάρτηση συμμετοχής $f_B(y)$. Η εφαρμογή της αντίστροφης συνάρτησης T^{-1} έχει ως αποτέλεσμα ένα ασαφές σύνολο A που ανήκει στο χώρο X και του οποίου η συνάρτηση συμμετοχής ορίζεται από την εξίσωση

$$f_A(x) = f_B(y), y \in Y \quad (3.2.25)$$

για κάθε x του X που απεικονίζεται στο y μέσω της συνάρτησης T .

Έχουμε τώρα το αντίστροφο πρόβλημα όπου A είναι ένα ασαφές σύνολο στο χώρο X , και T είναι μια συνάρτηση από το X στο χώρο Y . Θέλουμε να βρούμε τη συνάρτηση συμμετοχής του συνόλου B στο Y που προκύπτει από την εφαρμογή αυτής της συνάρτησης.

Εάν η συνάρτηση T δεν είναι 1-1 τότε προκύπτει ότι δύο ή περισσότερα διακριτά σημεία του X , έστω x_1 και x_2 , που έχουν διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής στο σύνολο A , αντιστοιχίζονται στο ίδιο σημείο y στο χώρο Y . Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει το ερώτημα: ποιο βαθμό συμμετοχής στο σύνολο B πρέπει να αναθέσουμε στο σημείο y ;

Για να λύσουμε αυτό το πρόβλημα αποφασίζουμε να αναθέσουμε στο y το μεγαλύτερο από τους δύο βαθμούς συμμετοχής των x_1 και x_2 . Γενικότερα η συνάρτηση

³ Η συσχέτιση μαθηματικώς ορίζεται ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών· π.χ., το σύνολο όλων των διατεταγμένων ζευγών $\{(x, y) | x \geq y, x, y \in \mathbb{R}\}$.

συμμετοχής για το σύνολο B ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$f_B(y) = \max_{x \in T^{-1}(y)} f_A(x), \quad y \in Y, \quad (3.2.26)$$

όπου $T^{-1}(y)$ είναι το σύνολο των σημείων του X που αντιστοιχίζονται στο y μέσω της συνάρτησης T .

3.3. Συναρτήσεις Συμμετοχής

Σε ένα ασαφές σύνολο το στοιχείο που εκφράζει την ιδιότητα της ασάφειας είναι η συνάρτηση συμμετοχής που το συνοδεύει. Η λειτουργία μιας τέτοιας συνάρτησης είναι να ταξινομεί τα στοιχεία που ανήκουν στο σύνολο. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να προσδιοριστεί η μορφή της συνάρτησης συμμετοχής και ένας από αυτούς είναι να καθοριστεί με γραφικό τρόπο. Είναι δυνατό οι γραφικές αναπαραστάσεις να είναι διαφόρων μορφών. Υπάρχουν όμως περιορισμοί στις μορφές που χρησιμοποιούνται. Η μορφή της συνάρτησης συμμετοχής είναι μια σημαντική παράμετρος και εξαρτάται από τη συγκεκριμένη εφαρμογή υπό μελέτη. Στο παρόν πλαίσιο η συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου A που ανήκει στο χώρο X θα συμβολίζεται ως $f_A(x)$.

Χαρακτηριστικά Συναρτήσεων Συμμετοχής

Μια συνάρτηση συμμετοχής διαθέτει τρία χαρακτηριστικά μεγέθη με τα οποία μπορούμε να την προσδιορίσουμε. Αυτά είναι:

1. Πυρήνας
Ο πυρήνας αποτελείται από όλα εκείνα τα στοιχεία του συνόλου των οποίων η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής είναι μονάδα. Δηλαδή, $\{x | f_A(x) = 1, x \in X\}$.
2. Φορέας
Ο φορέας αποτελείται από όλα εκείνα τα στοιχεία του συνόλου των οποίων η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής είναι θετική. Δηλαδή, $\{x | f_A(x) > 0, x \in X\}$.
3. Σύνορο
Το σύνορο αποτελείται από όλα εκείνα τα στοιχεία του συνόλου των οποίων η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής είναι θετική αλλά μικρότερη της μονάδας. Δηλαδή, $\{x | 0 < f_A(x) < 1, x \in X\}$.

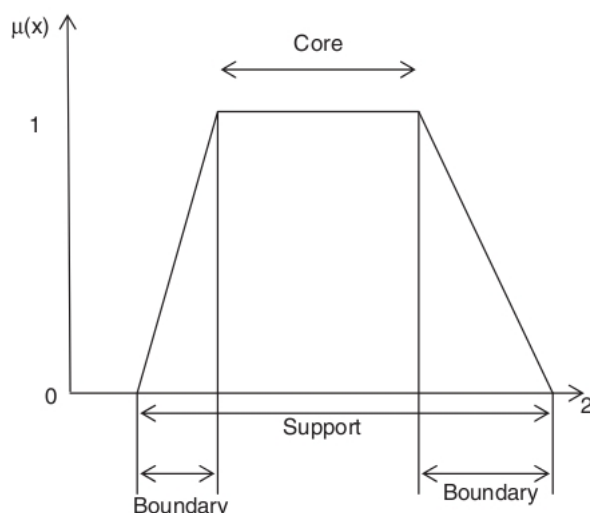
Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που περιγράφηκαν απεικονίζονται στο Σχ. 3.5.

Ακολουθούν δύο ακόμη σημαντικοί όροι.

Σημείο υπέρβασης. Το σημείο υπέρβασης είναι στην πραγματικότητα ένα σύνολο σημείων και αποτελείται από τα στοιχεία του συνόλου των οποίων η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής είναι 0.5. Δηλαδή, $\{x | f_A(x) = 0.5, x \in X\}$.

Ύψος. Το ύψος ενός ασαφούς συνόλου A ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της συνάρτησης συμμετοχής που το χαρακτηρίζει, δηλαδή $\max(f_A(x))$.

Υπάρχει η δυνατότητα μια συνάρτηση συμμετοχής να είναι είτε συμμετρική ή ασύμμετρη. Επίσης υπενθυμίζεται ότι οι δυνατές τιμές για μια συνάρτηση συμμετοχής είναι στο διάστημα $[0, 1]$.



Σχήμα 3.5.: Χαρακτηριστικά στοιχεία συνάρτησης συμμετοχής

Ταξινόμηση Ασαφών Συνόλων

Τα ασαφή σύνολα χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος και τη μορφή της συνάρτησης συμμετοχής που τα χαρακτηρίζει. Αυτές είναι:

Κανονικά. Εάν η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου έχει τουλάχιστον ένα στοιχείο του οποίου η τιμή είναι ίση με τη μονάδα, τότε αυτό καλείται κανονικό ασαφές σύνολο (Σχ. 3.6α').

Υπό-κανονικά. Εάν όλες οι τιμές που παίρνει η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου είναι μικρότερες της μονάδας, τότε αυτό καλείται υπό-κανονικό ασαφές σύνολο (Σχ. 3.6β').

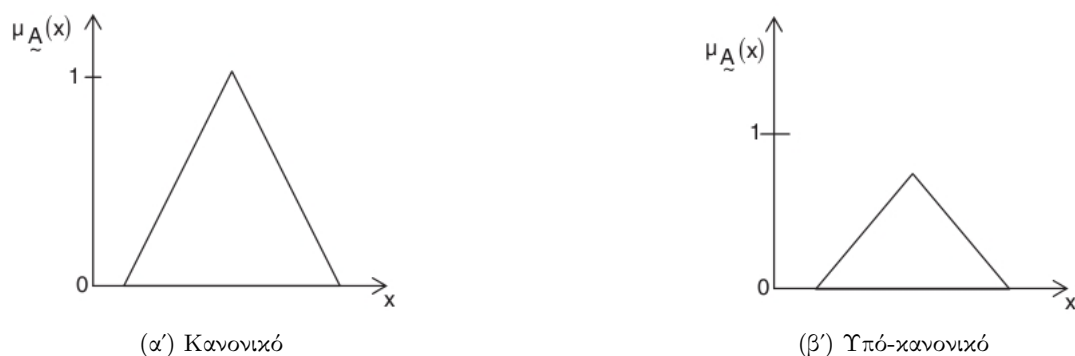
Κυρτά. Εάν η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου είναι είτε γνησίως αύξουσα ή γνησίως φθίνουσα ή ταυτόχρονα γνησίως αύξουσα και γνησίως φθίνουσα αυξανόμενων των τιμών των στοιχείων του πεδίου ορισμού, τότε αυτό καλείται κυρτό ασαφές σύνολο (Σχ. 3.7α').

Μη-κυρτά. Εάν η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου είναι απλώς αύξουσα ή φθίνουσα ή ταυτόχρονα αύξουσα και φθίνουσα αυξανόμενων των τιμών των στοιχείων του πεδίου ορισμού, τότε αυτό καλείται μη-κυρτό ασαφές σύνολο (Σχ. 3.7β').

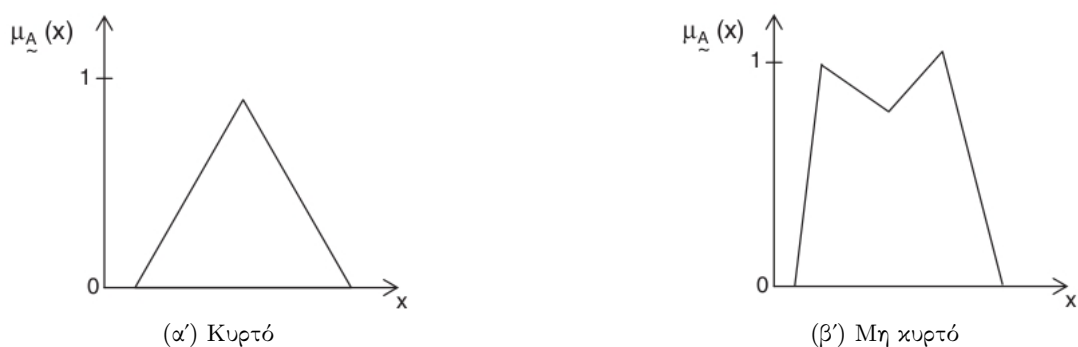
Όταν εφαρμόζεται η πράξη της τομής σε δύο κυρτά ασαφή σύνολα, τότε το προκύπτων σύνολο είναι επίσης κυρτό. Αυτό γίνεται σαφές στο Σχ. 3.8 όπου η σκιαγραφημένη περιοχή ορίζει το προκύπτων από την τομή ασαφές σύνολο.

Διαμόρφωση Συναρτήσεων Συμμετοχής

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάθεση τιμών συμμετοχής στα στοιχεία ενός ασαφούς συνόλου ή γενικότερα για την διαμόρφωση της συνάρτησης συμμετοχής που περιγράφει μια ασαφή μεταβλητή. Αυτές οι μέθοδοι διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, αυτές που βασίζονται στην ανθρώπινη διαίσθηση και αυτές που χρησιμοποιούν αλγόριθμους ή λογικές διαδικασίες. Ακολουθεί μια λίστα με επιγραμματική αναφορά στις σημαντικότερες μεθόδους:



Σχήμα 3.6.: Είδη ασαφούς συνόλου A με κριτήριο την κανονικότητα



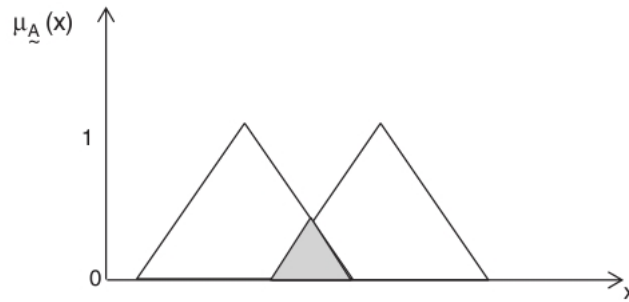
Σχήμα 3.7.: Είδη ασαφούς συνόλου A με κριτήριο την κυρτότητα

- Διαισθητική μέθοδος (Intuition),
- Εξαγωγή συμπερασμάτων (Inference),
- Διάταξη σε βαθμίδες (Rank ordering),
- Γωνιακά ασαφή σύνολα (Angular Fuzzy Sets),
- Νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks),
- Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), και
- Επαγωγή (Inductive Reasoning)

Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί μια σύντομη ενδεικτική περιγραφή για τις δύο πρώτες από τις παραπάνω μεθόδους.

Διαισθητική μέθοδος. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανθρώπινη ευφυΐα και κατανόηση για την ανάπτυξη των συναρτήσεων συμμετοχής. Για την εφαρμογή της είναι απαραίτητη η ενδεδειγμένη γνώση του προβλήματος αλλά και των γλωσσικών μεταβλητών⁴ υπό μελέτη.

⁴ Γλωσσική χαρακτηρίζεται μια μεταβλητή της οποίας οι τιμές δεν είναι αριθμοί αλλά λέξεις ή προτάσεις σε μια φυσική ή τεχνητή γλώσσα. Ένας περισσότερο τυπικός ορισμός είναι ο ακόλουθος: Μια γλωσσική μεταβλητή είναι το σύνολο των στοιχείων $\langle x, T(x), U, G, M \rangle$, όπου x είναι η ονομασία της γλωσσικής μεταβλητής, $T(x)$ είναι το σύνολο τιμών, U είναι το υπερσύνολο αναφοράς στο οποίο δομείται το σύνολο $T(x)$, G είναι ο συντακτικός κανόνας που παράγει τις ονομασίες x , και M είναι ένας σημασιολογικός κανόνας που προσδίδει νόημα στις ονομασίες [73].



Σχήμα 3.8.: Τομή δύο ασαφών συνόλων

Εξαγωγή συμπερασμάτων. Σε αυτή τη μέθοδο εξάγονται συμπεράσματα μέσω παραγωγικών συλλογισμών. Η συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από δεδομένα και παγίωμένη γνώση γύρω από ένα αντικείμενο. Ακολουθεί ένα παράδειγμα που χρησιμοποιεί αυτή τη μέθοδο για την αναγνώριση του είδους ενός τριγώνου.

Παράδειγμα. Έστω U ο χώρος όλων των τριγώνων και έστω A, B , και C οι εσωτερικές γωνίες αυτών. Επίσης υποθέτουμε ότι ισχύει $A \geq B \geq C \geq 0$. Επομένως ο χώρος U ορίζεται από την Εξ. 3.3.1:

$$U = \{(A, B, C), A \geq B \geq C \geq 0, A + B + C = 180^\circ\} \quad (3.3.1)$$

Από τους διάφορους τύπους τριγώνων, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή αναγνωρίζουμε τους εξής τρεις: Προσεγγιστικά Ισοσκελή (I), Προσεγγιστικά Ορθογώνια (R), Διάφορα (O).

Η συνάρτηση συμμετοχής για το προσεγγιστικό ισοσκελές τρίγωνο δίδεται από την Εξ. 3.3.2:

$$f_I(A, B, C) = 1 - \frac{1}{60^\circ} \min(A - B, B - C) \quad (3.3.2)$$

Η συνάρτηση συμμετοχής για το προσεγγιστικό ορθογώνιο τρίγωνο δίδεται από την Εξ. 3.3.3:

$$f_R(A, B, C) = 1 - \frac{1}{90^\circ} (A - 90^\circ) \quad (3.3.3)$$

Η συνάρτηση συμμετοχής για την τρίτη κατηγορία τριγώνων μπορεί να οριστεί ως το συμπλήρωμα της ένωσης των δύο συναρτήσεων συμμετοχής που ορίστηκαν παραπάνω,

$$f_O(A, B, C) = \overline{I \cup R} \quad (3.3.4)$$

Χρησιμοποιώντας το Νόμο του Demorgan συνάρτηση συμμετοχής για τα διάφορα τρίγωνα δίδεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_O(A, B, C) = I \cap R = \min\{1 - f_I(A, B, C), 1 - f_R(A, B, C)\} \quad (3.3.5)$$

3.4. Defuzzification

Ο όρος defuzzification (από-ασαφοποίηση) αναφέρεται στη μετατροπή ασαφών ποσοτήτων σε σαφείς ποσότητες, που μπορεί να είναι αριθμητικές τιμές ή σαφή σύνολα. Αυτή η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ένα είδος «στρογγυλοποίησης» στα πλαίσια της θεωρίας της ασαφούς λογικής. Defuzzification σε ένα ασαφές σύνολο μπορεί να γίνει με σκοπό είτε να προκύψει ένα σαφές (κλασικό) σύνολο ή ένας αριθμός. Παρακάτω αυτές οι μέθοδοι θα αναλυθούν ξεχωριστά.

Μετατροπή σε σύνολο. Τομές -λ για Ασαφή Σύνολα. Έστω ένα ασαφές σύνολο A , τότε το σύνολο που προκύπτει από μια τομή - λ μπορεί να αναπαρασταθεί ως A_λ , όπου $0 \leq \lambda \leq 1$.

Το σύνολο A_λ είναι ένα κλασικό σύνολο, το οποίο καλείται τομή -λ του ασαφούς συνόλου A και εκφράζεται ως

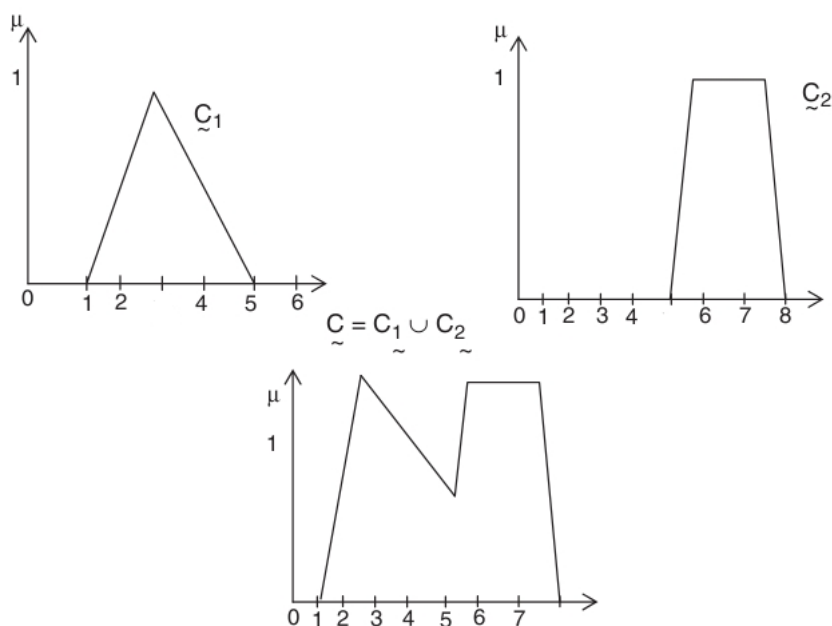
$$A_\lambda = \{x | f_A(x) \geq \lambda\}.$$

Η τομή -λ καλείται επίσης **τομή - α**. Εφόσον η παράμετρος λ ανήκει στο διάστημα $[0,1]$ τότε το ασαφές σύνολο A μπορεί να μετασχηματιστεί σε άπειρο αριθμό τομών -λ.

Τα σύνολα που προκύπτουν από τομές -λ έχουν τις τέσσερις ακόλουθες ιδιότητες:

1. $(A \cup B)_\lambda = A_\lambda \cup B_\lambda$
2. $(A \cap B)_\lambda = A_\lambda \cap B_\lambda$
3. $(A')_\lambda \neq (A'_\lambda)$, εκτός από την περίπτωση όπου $\lambda = 0.5$
4. $\forall \lambda \leq \alpha$, όπου $\alpha \in [0, 1]$, ισχύει ότι $A_\alpha \subseteq A_\lambda$, όπου το σύνολο A_0 θα περιέχει ολόκληρο το χώρο.

Μετατροπή σε αριθμό Το αποτέλεσμα μιας διαδικασίας που βασίζεται στην ασαφή λογική μπορεί να είναι η ένωση δύο ή περισσότερων ασαφών συναρτήσεων συμμετοχής. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ένα ασαφές αποτέλεσμα που αποτελείται από δύο μέρη, ένα τριγωνικό και ένα τραπεζοειδές. Η ένωση αυτών σχηματίζει την εξωτερική περιβάλλουσα των δύο σχημάτων όπως φαίνεται στο Σχ. 3.9.



Σχήμα 3.9.: Τυπικό ασαφές αποτέλεσμα

Υπάρχουν επτά γενικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή μιας ασαφούς ποσότητας σε ένα αριθμό. Αυτές είναι:

1. Αρχή της μέγιστης συμμετοχής (Max-membership),

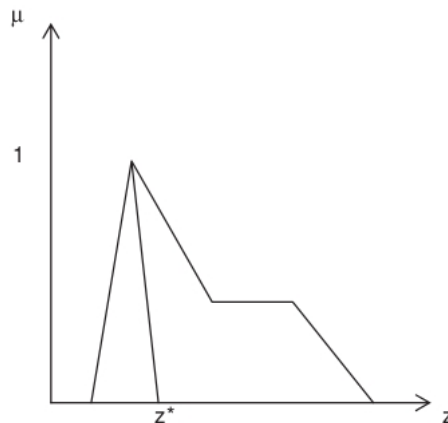
2. Μέθοδος κεντροειδούς,
3. Μέθοδος σταθμικού μέσου,
4. Αρχή του μέσου όρου των μεγίστων (Mean-max membership),
5. Κέντρο των αθροισμάτων,
6. Κέντρο της μέγιστης επιφάνειας, και
7. Αρχή του πρώτου μεγίστου (First of maxima) ή του τελευταίου μεγίστου (Last of maxima).

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για την κάθε μέθοδο.

Αρχή της μέγιστης συμμετοχής. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη σχέση,

$$f_C(Z^*) \geq f_C(Z), \text{ για κάθε } z \in Z.$$

Αυτή η μέθοδος αναφέρεται επίσης ως μέθοδος ύψους. Η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχ. 3.10.



Σχήμα 3.10.: Μέθοδος της μέγιστης συμμετοχής

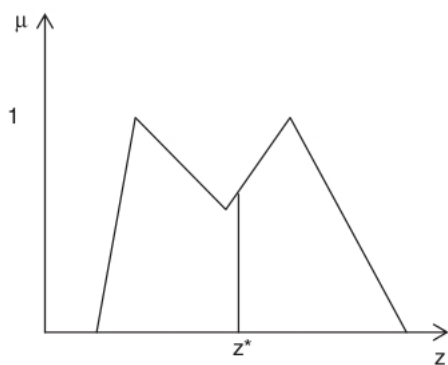
Μέθοδος κεντροειδούς. Αυτή είναι η περισσότερο ευρέως διαδεδομένη μέθοδος. Επίσης αναφέρεται ως μέθοδος κέντρου βάρους ή κέντρου επιφάνειας. Βασίζεται στην Εξ. 3.4.1,

$$z^* = \frac{\int f_C(Z)Zdz}{\int f_C(Z)dz}, \quad (3.4.1)$$

όπου η ολοκλήρωση είναι αλγεβρική. Η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχ. 3.11.

Μέθοδος σταθμικού μέσου. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για συμμετρικές συναρτήσεις συμμετοχής. Κάθε συνάρτηση συμμετοχής στην έξοδο σταθμίζεται από το μέγιστο βαθμό συμμετοχής σε αυτήν. Βασίζεται στην Εξ. 3.4.2,

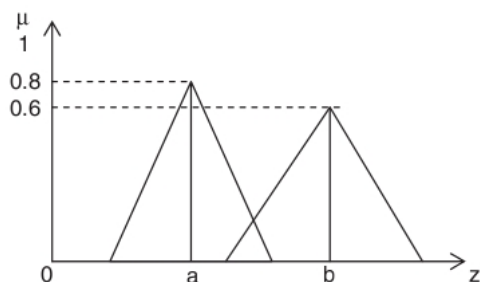
$$z^* = \frac{\sum f_C(\bar{z})\bar{z}}{\sum f_C(\bar{z})}, \quad (3.4.2)$$



Σχήμα 3.11.: Μέθοδος κεντροειδούς

όπου το άθροισμα είναι αλγεβρικό. Η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχ. 3.12, όπου προκύπτει ότι

$$z^* = \frac{a(0.8) + b(0.6)}{0.8 + 0.6}$$



Σχήμα 3.12.: Μέθοδος σταθμικού μέσου

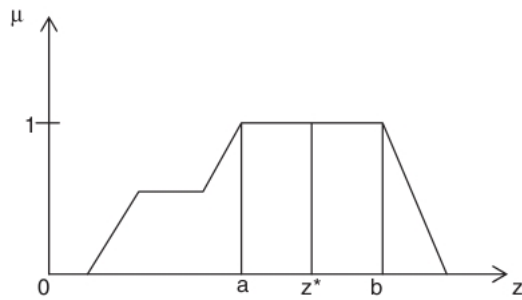
Αρχή του μέσου όρου των μεγίστων. Αυτή η μέθοδος είναι παρόμοια με αυτήν της μέγιστης συμμετοχής, με τη διαφορά ότι στην τελευταία η μέγιστη συμμετοχή δεν χρειάζεται να είναι μοναδική, δηλαδή, η μέγιστη συμμετοχή μπορεί να μην είναι ένα σημείο αλλά ένα διάστημα. Επίσης αναφέρεται ως μέθοδος του διαμέσου των μεγίστων. Βασίζεται στην Εξ. 3.4.3:

$$z^* = \frac{a + b}{2}, \quad (3.4.3)$$

όπου a, b είναι τα άκρα του διαστήματος της μέγιστης συμμετοχής. Η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχ. 3.13.

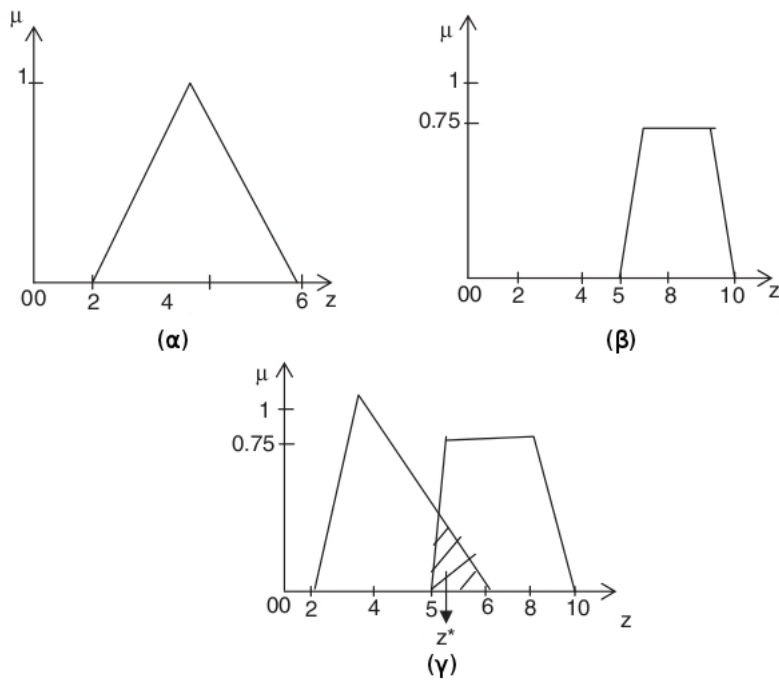
Κέντρο των αθροισμάτων. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί το αλγεβρικό άθροισμα των συναρτήσεων συμμετοχής των ξεχωριστών ασαφών συνόλων της εξόδου, έστω c_1 και c_2 , και όχι την ένωση των συνόλων. Σε αυτή τη μέθοδο οι κοινές περιοχές αθροίζονται δύο φορές. Η μέθοδος είναι παρόμοια με τη μέθοδο του σταθμικού μέσου με τη διαφορά ότι στην τελευταία, τα βάρη είναι τα εμβαδά κάτω από τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής και όχι οι τιμές των συναρτήσεων συμμετοχής. Βασίζεται στην Εξ. 3.4.4:

$$z^* = \frac{\int_2 z \sum_{k=1}^n f_{c_k}(Z) dz}{\int_2 \sum_{k=1}^n f_{c_k}(Z) dz} \quad (3.4.4)$$



Σχήμα 3.13.: Μέθοδος του μέσου όρου των μεγίστων

Η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχ. 3.14.

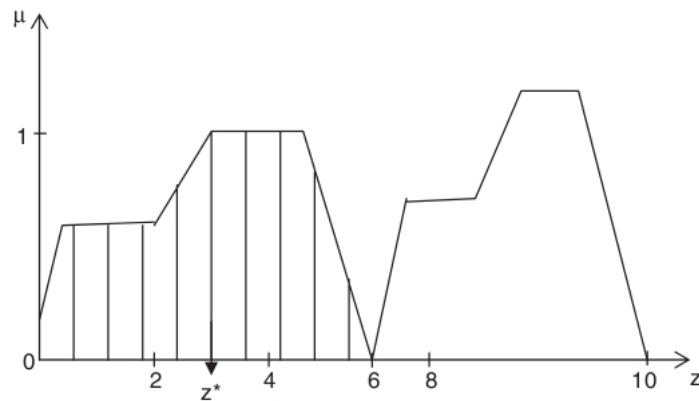


Σχήμα 3.14.: Μέθοδος του κέντρου των αθροισμάτων: (α) Πρώτη συνάρτηση συμμετοχής, (β) δεύτερη συνάρτηση συμμετοχής, και (γ) Defuzzification

Κέντρο της μέγιστης επιφάνειας. Στην περίπτωση που το ασαφές σύνολο της εξόδου αποτελείται από δυο κυρτές υποπεριοχές, τότε το κέντρο βάρους της κυρτής υποπεριοχής με τη μεγαλύτερη επιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην Εξ. 3.4.5:

$$z^* = \frac{\int f_{C_m}(Z) Z dz}{\int f_{C_m}(Z) dz}, \quad (3.4.5)$$

όπου C_m είναι η κυρτή υποπεριοχή με τη μεγαλύτερη επιφάνεια. Η τιμή z^* υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως στη μέθοδο κεντροειδούς. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση όπου οι υποπεριοχές δεν είναι κυρτές. Η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχ. 3.15.



Σχήμα 3.15.: Μέθοδος της μέγιστης επιφάνειας

Αρχή του πρώτου ή του τελευταίου μέγιστου. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται όλα τα ασαφή σύνολα C_k από τα οποία αποτελείται η έξοδος.

Έστω $hgt(C_k)$ η μεγαλύτερη τιμή της ένωσης των ασαφών συνόλων της εξόδου. Άρα,

$$hgt(C_k) = \sup_{z \in Z} f_{C_k}(Z) \quad (3.4.6)$$

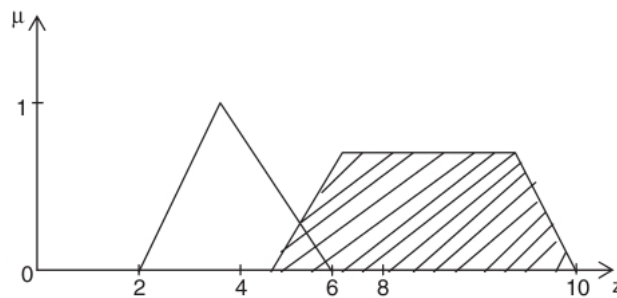
Το πρώτο μέγιστο (μεγαλύτερο κάτω όριο) υπολογίζεται από την σχέση:

$$z^* = \inf_{z \in Z} \{z \in Z | f_{C_k}(Z) = hgt(C_k)\} \quad (3.4.7)$$

Το τελευταίο μέγιστο (μικρότερο άνω όριο) υπολογίζεται από την σχέση:

$$z^* = \sup_{z \in Z} \{z \in Z | f_{C_k}(Z) = hgt(C_k)\} \quad (3.4.8)$$

Η γραφική αναπαράσταση φαίνεται στο Σχ. 3.16.



Σχήμα 3.16.: Μέθοδος του πρώτου μέγιστου ή του τελευταίου μέγιστου

3.5. Ασαφείς Κανόνες

Ο πιο απλός τρόπος να αναπαραστήσουμε την ανθρώπινη γνώση είναι μέσω κανόνων που εκφράζονται σε φυσική γλώσσα και είναι της γενικής μορφής,

ΕΑΝ υπόθεση, ΤΟΤΕ αποτέλεσμα

Το μέρος όπου δηλώνεται η υπόθεση ονομάζεται υποθετικό (antecedent), ενώ αυτό όπου δηλώνεται το συμπέρασμα ονομάζεται συμπερασματικό (consequent).

Ένας κανόνας της μορφής EAN - TOTE εκφράζει το γεγονός ότι αν γνωρίζουμε ότι ισχύει κάτι (υπόθεση), τότε μπορούμε να συμπεράνουμε κάτι άλλο (συμπέρασμα). Αυτή η μορφή αναπαράστασης χαρακτηρίζεται ως ρηχή γνώση (*shallow knowledge*), και είναι χρήσιμη καθώς εκφράζει εμπειρική και ευρετική (heuristic) γνώση στην ίδια γλώσσα που χρησιμοποιούμε για την καθημερινή επικοινωνία. Όμως αυτή η αναπαράσταση έχει κάποιους περιορισμούς καθώς δεν μπορεί να εκφράσει βαθύτερες μορφές γνώσης. Με τον όρο «βαθύτερη» εννοείται γνώση που σχετίζεται με τη δομή, τη λειτουργία και τη συμπεριφορά των αντικειμένων που μας περιβάλλουν. Αυτή η μορφή γνώσης καλείται επαγωγική και δεν μπορεί να αναχθεί σε απλές γλωσσικές φράσεις [63].

Οι κανόνες της μορφής EAN - TOTE είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι κατά τη μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων γιατί χρησιμοποιούν γλωσσικές μεταβλητές για τη διαμόρφωση του υποθετικού και του συμπερασματικού τους μέρους. Οι γλωσσικές μεταβλητές μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη χρήση ασαφών συνόλων και λογικών συνδέσμων μεταξύ αυτών των συνόλων.

Σύνταξη κανόνων. Για οποιαδήποτε γλωσσική μεταβλητή οι κανόνες μπορούν να συναχθούν με τρία διαφορετικά είδη δηλώσεων. Αυτά είναι: Δηλώσεις ανάθεσης, δηλώσεις με συνθήκη και δηλώσεις χωρίς συνθήκη.

Δηλώσεις ανάθεσης. Μέσω αυτών των δηλώσεων ανατίθεται στη μεταβλητή μια συγκεκριμένη τιμή μέσω του τελεστή ισότητας. Η τιμή που θα ανατεθεί στη μεταβλητή μπορεί να είναι και γλωσσικός όρος και όχι αναγκαστικά αριθμητική.

Δηλώσεις με συνθήκη. Σε αυτές τις δηλώσεις ορίζεται μια συνθήκη την οποία πρέπει να ικανοποιεί η μεταβλητή. Για παράδειγμα, «Εάν η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από 50 τότε σταμάτα».

Δηλώσεις χωρίς συνθήκη. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη συνθήκη για να ικανοποιήσει η μεταβλητή.

Απλοποίηση κανόνων. Χρησιμοποιώντας τις βασικές ιδιότητες και τις πράξεις που ορίστηκαν για τα ασαφή σύνολα στο Κεφ. 3.2, οποιοσδήποτε σύνθετος κανόνας μπορεί να αποσυντεθεί σε έναν αριθμό απλών κανονικών κανόνων, της μορφής που φαίνεται στον Πιν. 3.1. Όπως γίνεται κατανοητό, η περιγραφή και κατανόηση ενός πολύπλοκου συστήματος στο επίπεδο της ασαφούς λογικής, γίνεται μέσω ενός συνόλου περιορισμών στην έξοδο του συστήματος και κάποιων συνθηκών στην είσοδο αυτού. Οι περιορισμοί γενικά αναπαριστώνται μέσω ασαφών συνόλων και ασαφών συσχετίσεων. Οι δηλώσεις που εκφράζουν τους περιορισμούς συνήθως συνδέονται με τη χρήση γλωσσικών συνδέσμων όπως «και», «ή», ή «διαφορετικά». Οι περιορισμοί R^1, R^2, \dots, R^r ισχύουν για τα συμπεράσματα των κανόνων. Ακολουθεί μια περιγραφή της τεχνικής που ακολουθείται για την αναγωγή σύνθετων κανόνων, με πολλαπλό υποθετικό μέρος, σε απλούς κανονικής μορφής.

Πίνακας 3.1.: Κανονική μορφή απλών ασαφών κανόνων

Κανόνας 1:	EAN συνθήκη C^1 , TOTE περιορισμός R^1
Κανόνας 2:	EAN συνθήκη C^2 , TOTE περιορισμός R^2
	⋮
Κανόνας r:	EAN συνθήκη C^r , TOTE περιορισμός R^r

Κανόνες με συζευκτικό πολλαπλό υποθετικό μέρος. Έστω ο ακόλουθος κανόνας

$$\text{EAN } x \text{ είναι } A^1 \text{ και } A^2 \dots \text{ και } A^L \text{ TOTE } y \text{ είναι } B^s$$

Έστω ένα καινούριο ασαφές σύνολο A^s το οποίο ορίζεται ως εξής,

$$A^s = A^1 \cap A^2 \cap \dots \cap A^L,$$

του οποίου η συνάρτηση συμμετοχής εκφράζεται ως

$$f_{A^s}(x) = \min [f_{A^1}(x), f_{A^2}(x), \dots, f_{A^L}(x)] \quad (3.5.1)$$

Ο σύνθετος κανόνας μπορεί να γραφεί ξανά ως εξής,

$$\text{EAN } x \text{ είναι } A^s \text{ TOTE } y \text{ είναι } B^s.$$

Κανόνες με διαζευκτικό πολλαπλό υποθετικό μέρος. Έστω ο ακόλουθος κανόνας

$$\text{EAN } x \text{ είναι } A^1 \text{ ή } A^2 \dots \text{ ή } A^L \text{ TOTE } y \text{ είναι } B^s$$

Έστω ένα καινούριο ασαφές σύνολο A^s το οποίο ορίζεται ως εξής,

$$A^s = A^1 \cup A^2 \cup \dots \cup A^L,$$

του οποίου η συνάρτηση συμμετοχής εκφράζεται ως

$$f_{A^s}(x) = \max [f_{A^1}(x), f_{A^2}(x), \dots, f_{A^L}(x)] \quad (3.5.2)$$

Ο σύνθετος κανόνας μπορεί να γραφεί ξανά ως εξής,

$$\text{EAN } x \text{ είναι } A^s \text{ TOTE } y \text{ είναι } B^s.$$

Άθροιση ασαφών κανόνων. Τα περισσότερα συστήματα που βασίζονται σε κανόνες δεν αποτελούνται μόνο από έναν. Η διαδικασία κατά την οποία εξάγουμε το συνολικό συμπέρασμα από το συμπέρασμα του κάθε κανόνα ξεχωριστά είναι γνωστή ως *άθροιση των κανόνων* (rule aggregation). Υπάρχουν δύο απλές ακραίες περιπτώσεις κατά την άθροιση των κανόνων:

Κανόνες με σύζευξη. Όταν σε ένα σύστημα κανόνων πρέπει να ικανοποιούνται όλοι ταυτόχρονα, οι κανόνες συνδέονται με συνδέσμους «ΚΑΙ». Σε αυτή την περίπτωση το αθροιστικό συμπέρασμα, y , υπολογίζεται από την ασαφή τομή των συμπερασμάτων όλων των κανόνων, y^i , όπου $i = 1, 2, \dots, r$. Δηλαδή,

$$y = y^1 \text{ και } y^2 \text{ και } \dots \text{ και } y^r$$

ή

$$y = y^1 \cap y^2 \cap \dots \cap y^r$$

Η συνάρτηση συμμετοχής του αθροιστικού συμπεράσματος y δίνεται από την Εξ. 3.5.3:

$$f_y(y) = \min [f_{y^1}(y), f_{y^2}(y), \dots, f_{y^r}(y)], \text{ για } y \in Y \quad (3.5.3)$$

Κανόνες με διάζευξη. Όταν σε ένα σύστημα κανόνων απαιτείται η ικανοποίηση τουλάχιστον ενός, οι κανόνες συνδέονται με συνδέσμους «H». Σε αυτή την περίπτωση το αθροιστικό συμπέρασμα υπολογίζεται από την ασαφή ένωση των συμπερασμάτων όλων των κανόνων. Δηλαδή,

$$y = y^1 \text{ ή } y^2 \text{ ή } \dots \text{ ή } y^r$$

ή

$$y = y^1 \cup y^2 \cup \dots \cup y^r$$

Η συνάρτηση συμμετοχής του αθροιστικού συμπεράσματος y δίνεται από τη σχέση:

$$f_y(y) = \max [f_{y^1}(y), f_{y^2}(y), \dots, f_{y^r}(y)], \text{ για } y \in Y \quad (3.5.4)$$

Ιδιότητες Βάσης-Κανόνων

Οι ιδιότητες μιας βάσης κανόνων, η οποία αποτελείται από κανόνες της μορφής EAN - TOTE, είναι οι ακόλουθες:

Πληρότητα. Ένα σύνολο κανόνων είναι πλήρες στην περίπτωση που οποιοσδήποτε συνδυασμός τιμών εισόδου καταλήγει σε μια κατάλληλη τιμή εξόδου.

Συνοχή. Ένα σύνολο κανόνων είναι μη συνεκτικό όταν υπάρχουν τουλάχιστον δύο κανόνες με το ίδιο υποθετικό μέρος αλλά διαφορετικό συμπερασματικό μέρος.

Συνέχεια. Ένα σύνολο κανόνων είναι συνεχές στην περίπτωση που ο συνδυασμός δύο οποιονδήποτε γειτονικών κανόνων έχει αποτέλεσμα ένα ασαφές σύνολο που δεν είναι το κενό σύνολο.

Αλληλεπίδραση. Έστω ένας κανόνας, «EAN x είναι A TOTE y είναι B », που αναπαρίσταται από μια ασαφή συσχέτιση R^2 . Η ιδιότητα της αλληλεπίδρασης εκφράζει το γεγονός ότι η σύνθεση των A και R δεν δίνει το B . Δηλαδή,

$$A \circ R \neq B$$

3.6. Ασαφή Συστήματα

Η διαδικασία της ασαφούς εξαγωγής συμπερασμάτων (fuzzy inference) είναι αυτή με την οποία ορίζουμε τον τρόπο αντιστοίχισης δεδομένων εισόδου σε δεδομένα εξόδου χρησιμοποιώντας τις αρχές της ασαφούς λογικής. Όσον αφορά τη δομή ενός τέτοιου συστήματος, υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές που ονομάζονται μέθοδος Mamdani και μέθοδος Takagi-Sugeno.

Τα ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε διάφορα επιστημονικά πεδία όπως ο αυτόματος έλεγχος, η ταξινόμηση δεδομένων, η ανάλυση αποφάσεων, τα συστήματα ειδικών (expert systems⁵), και η μηχανική όραση (computer vision⁶). Επειδή αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται σε διάφορους κλάδους για διαφορετικούς σκοπούς είναι γνωστά με διάφορες ονομασίες ανάλογα με το επιστημονικό πεδίο όπου εφαρμόζονται. Μερικές από αυτές είναι: ασαφή συστήματα κανόνων (fuzzy rule-based systems), ασαφή συστήματα ειδικών, ασαφής μοντελοποίηση, ασαφής συσχετιστική μνήμη

⁵ Ένα σύστημα ειδικών (expert system) χρησιμοποιεί μια συλλογή εμπειρικής γνώσης για την επίλυση προβλημάτων.

⁶ Η μηχανική όραση (computer vision) αναφέρεται στη δυνατότητα μιας μηχανής να εξάγει πληροφορίες από μια εικόνα, τις οποίες κατόπιν χρησιμοποιεί για την ολοκλήρωση κάποιου έργου.

(fuzzy associative memory), και ασαφείς λογικοί ελεγκτές. Η πιο απλή αναφορά σε αυτά όμως είναι ως *ασαφή συστήματα*.

Τα ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων χρησιμοποιούν δηλώσεις της μορφής «EAN...TOTE...» και τους βασικούς τελεστές «AND» ή «OR» για τη διαμόρφωση των κανόνων που ορίζουν τη συμπεριφορά της λήψης αποφάσεων του συστήματος. Ένα βασικό ασαφές σύστημα μπορεί να δεχτεί στην είσοδό του είτε ασαφή ή σαφή δεδομένα, αλλά η έξοδος που παράγεται αποτελείται σχεδόν πάντα από ασαφή σύνολα. Όταν όμως ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιείται για παράδειγμα ως ελεγκτής μιας διαδικασίας τότε πρέπει η έξοδος του να είναι σε μια σαφή αριθμητική μορφή. Σε αυτή και παρόμοιες περιπτώσεις πρέπει να εφαρμοστεί μια μέθοδος defuzzification η οποία αναπαριστά, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ένα ασαφές σύνολο με μια σαφή αριθμητική τιμή.

Δομή και Λειτουργία

Ένα ασαφές σύστημα αποτελείται από ένα fuzzification interface, μια βάση κανόνων, μια βάση δεδομένων, μια μονάδα λήψης αποφάσεων, και από ένα defuzzification interface. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή για τη λειτουργία του κάθε τμήματος:

Βάση κανόνων. Η βάση κανόνων περιέχει ένα σύνολο κανόνων μορφής EAN - TOTE,

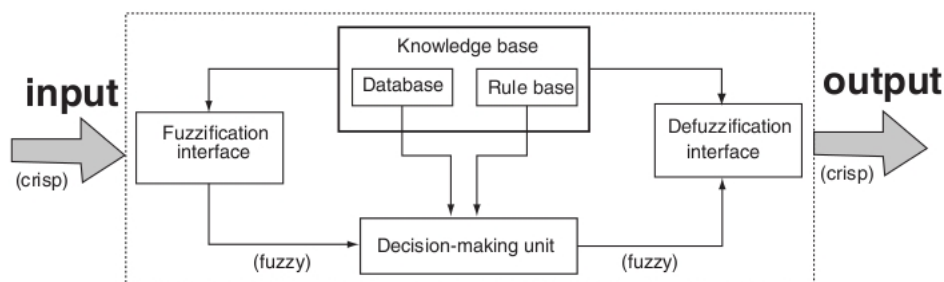
Βάση δεδομένων. Η βάση δεδομένων προσδιορίζει τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων που χρησιμοποιούνται στους κανόνες,

Μονάδα λήψης αποφάσεων. Η μονάδα λήψης αποφάσεων εκτελεί τις λειτουργίες της εξαγωγής των συμπερασμάτων με βάση τους κανόνες,

Fuzzification interface. Αυτή η διασύνδεση μετατρέπει τα αριθμητικά δεδομένα εισόδου σε βαθμούς συμμετοχής στα αντίστοιχα ασαφή σύνολα, και

Defuzzification interface. Αυτή η διασύνδεση μετατρέπει τα ασαφή αποτελέσματα σε αριθμητικές τιμές.

Η λειτουργία ενός ασαφούς συστήματος περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω. Το πρώτο βήμα είναι να μετατραπουν τα αριθμητικά δεδομένα εισόδου χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη μέθοδο fuzzification. Μετά τη μετατροπή εφαρμόζονται οι κανόνες. Η βάση κανόνων και η βάση δεδομένων ονομάζονται συνολικά *βάση γνώσης* (knowledge base). Τελικά χρησιμοποιείται μια συγκεκριμένη μέθοδος defuzzification ώστε να μετατραπεί η ασαφής έξοδος της διαδικασίας σε μια σαφή αριθμητική τιμή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευκολότερα για τις συνήθεις εφαρμογές. Σχηματικά απεικονίζεται αυτή η διαδικασία στο Σχ. 3.17.



Σχήμα 3.17.: Ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπερασμάτων

Τα βήματα που ακολουθούνται σε μια διαδικασία ασαφούς συλλογισμού (λειτουργίες εξαγωγής συμπερασμάτων χρησιμοποιώντας κανόνες της μορφής EAN - TOTE είναι τα εξής:

1. Οι τιμές των μεταβλητών εισόδου συγκρίνονται με τις συναρτήσεις συμμετοχής στο υποθετικό κομμάτι των κανόνων ώστε να προσδιορίσουμε τους βαθμούς συμμετοχής αυτής της τιμής σε κάθε ασαφές σύνολο, από αυτά που αποτελείται η αντίστοιχη γλωσσική μεταβλητή. Αυτό το βήμα είναι η διαδικασία του fuzzification.
2. Οι βαθμοί συμμετοχής, που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα, συνδυάζονται μέσω ενός συγκεκριμένου τελεστή t-norm⁷ ώστε να προσδιοριστεί ο βαθμός ενεργοποίησης (firing strength/weight), η βαρύτητα, για τον κάθε κανόνα.
3. Εφαρμόζοντας τους κανόνες, προκύπτουν για τον καθένα τα αντίστοιχα συμπεράσματα (είτε ασαφή ή αριθμητικά) ανάλογα με το βαθμό ενεργοποίησης που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα.
4. Τα συμπεράσματα από τους κανόνες συνδυάζονται ώστε να παραχθεί ένα αριθμητικό αποτέλεσμα. Αυτό το βήμα είναι η διαδικασία του defuzzification.

Κατηγορίες Ασαφών Συστημάτων

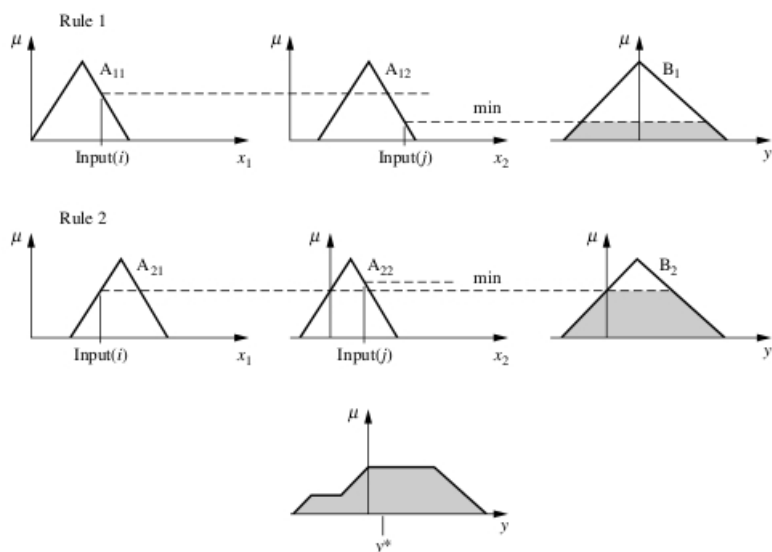
Μέθοδος Mamdani. Η μέθοδος του Mamdani είναι αυτή που χρησιμοποιείται περισσότερο. Ήταν από τις πρώτες εφαρμογές στα συστήματα ελέγχου της θεωρίας των ασαφών συνόλων. Προτάθηκε το 1975 από τον Ebrahim Mamdani [43] ως μια απόπειρα ελέγχου ενός συνδυασμού ατμομηχανής και λέβητα συνθέτοντας ένα σύνολο γλωσσικών κανόνων ελέγχου με τη βοήθεια έμπειρων χειριστών. Η εργασία του Mamdani βασίστηκε σε αυτή του Lotfi Zadeh του 1973.

Η μέθοδος του Mamdani απαιτεί το αποτέλεσμα του υπολογισμού να είναι ασαφές σύνολο με συγκεκριμένη συνάρτηση συμμετοχής. Συγκεκριμένα, μετά το συνδυασμό των συμπερασμάτων των κανόνων προκύπτει ένα ασαφές σύνολο για κάθε μεταβλητή εξόδου. Υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως συνάρτηση συμμετοχής μια τιμή σε αντίθεση με μια κατανομή τιμών. Αυτού του είδους η συνάρτηση συμμετοχής καλείται singleton και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ασαφές σύνολο το οποίο δεν χρειάζεται defuzzification. Σε πολλές περιπτώσεις αυτή η εναλλακτική είναι αποδοτικότερη καθώς απλοποιεί τον υπολογισμό για τη διαδικασία του defuzzification που είναι απαραίτητος για τη γενική μέθοδο του Mamdani, κατά την οποία υπολογίζεται το κεντροειδές μιας δισδιάστατης συνάρτησης. Δηλαδή, υπολογίζεται ο σταθμικός μέσος μερικών σημείων σε αντίθεση με τον υπολογισμό του ολοκληρώματος μιας δισδιάστατης συνάρτησης για την εύρεση του κεντροειδούς αυτής.

Στο Σχ. 3.18 δίνεται ένα παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος που χρησιμοποιεί δύο εισόδους και αποτελείται από δύο κανόνες. Για τον υπολογισμό του αποτελέσματος, δεδομένων των αριθμητικών εισόδων, ακολουθούνται έξι βήματα:

⁷ Ένας τελεστής t-νομμ είναι μια συνάρτηση $T : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ που έχει τις ακόλουθες ιδιότητες:

- $T(a, b) = T(b, a)$,
- $T(a, b) \leq T(c, d)$, εάν ισχύει ότι $a \leq c$ και $b \leq d$,
- $T(a, T(b, c)) = T(T(a, b), c)$,
- $T(a, 1) = a$.



Σχήμα 3.18.: Ασαφές σύστημα Mamdani δύο εισόδων, με δύο κανόνες

1. Προσδιορισμός των ασαφών κανόνων
2. Fuzzification των δεδομένων χρησιμοποιώντας της συναρτήσεις συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου
3. Συνδυασμός των ασαφών πλέον εισόδων χρησιμοποιώντας τους ασαφείς κανόνες για τον προσδιορισμό του βαθμού ενεργοποίησης του κάθε κανόνα
4. Υπολογισμός του συμπεράσματος από τον κάθε κανόνα συνδυάζοντας τον βαθμό ενεργοποίησης, που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα, και τη συνάρτηση συμμετοχής της μεταβλητής εξόδου
5. Συνδυασμός των συμπερασμάτων για τον προσδιορισμό της κατανομής της μεταβλητής εξόδου
6. Defuzzification της κατανομής της μεταβλητής εξόδου.

Ακολουθεί μια λεπτομερέστερη περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού.

Δημιουργία ασαφών κανόνων. Οι ασαφείς κανόνες αποτελούνται από γλωσσικές δηλώσεις που περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο ένα ασαφές σύστημα πρέπει να καταλήξει σε μια απόφαση, όσον αφορά την κατάταξη μιας εισόδου στα ασαφή σύνολα που περιγράφουν μια μεταβλητή εισόδου ή τον έλεγχο του αποτελέσματος. Οι ασαφείς κανόνες γράφονται πάντα στην ακόλουθη μορφή:

EAN (είσοδος 1) είναι (συνάρτηση συμμετοχής 1) **ή/και** (είσοδος 2) είναι (συνάρτηση συμμετοχής 2) **ή/και** ... **TOTE** (έξοδος n) είναι (συνάρτηση συμμετοχής n).

Για παράδειγμα:

EAN (η θερμοκρασία) είναι (υψηλή) **και** (η υγρασία) είναι (υψηλή) **TOTE** (το δωμάτιο) είναι (ζεστό).

Τα απαιτούμενα στοιχεία ώστε να έχει νόημα ένας τέτοιος κανόνας είναι συναρτήσεις συμμετοχής που προσδιορίζουν την υψηλή θερμοκρασία (είσοδος 1), την υψηλή υγρασία (είσοδος 2) και το ζεστό δωμάτιο (έξοδος 1).

Ασαφοποίηση. Ο σκοπός αυτή της ασαφοποίησης (fuzzification) είναι να αντιστοιχίσει αριθμητικές τιμές σε βαθμούς συμμετοχής στο διάστημα $[0,1]$ χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις συμμετοχής που περιγράφουν τις γλωσσικές μεταβλητές εισόδου. Στο παράδειγμα του Σχ. 3.18 φαίνονται οι δύο είσοδοι x_0 και y_0 στο κάτω αριστερό πλαίσιο. Η αντιστοίχιση αυτών σε ασαφείς αριθμούς⁸ γίνεται βρίσκοντας την τιμή της αντίστοιχης συνάρτησης συμμετοχής για αυτή την είσοδο.

Συμπέρασμα. Ο υπολογισμός των συμπερασμάτων για κάθε κανόνα αποτελείται από δύο βήματα:

1. Υπολογισμός του βαθμού ενεργοποίησης συνδυάζοντας τις ασαφείς πλέον εισόδους μέσω ασαφών τελεστών. Στο παράδειγμα του Σχ. 3.18 χρησιμοποιείται ο τελεστής «KAI».
2. Περιορισμός της συνάρτησης συμμετοχής της μεταβλητής εξόδου κατά το βαθμό ενεργοποίησης του κάθε κανόνα.

Συνδυασμός εξόδων σε μια κατανομή εξόδου. Σε αυτό το βήμα πρέπει να συνδυαστούν οι εξόδοι από όλους τους κανόνες σε μια ασαφή κατανομή. Αυτή η διαδικασία γίνεται συνήθως, αλλά όχι πάντα, με τη χρήση του διεζυκτικού τελεστή «OR».

Από-ασαφοποίηση κατανομής εξόδου. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι επιθυμητό να έχουμε ως αποτέλεσμα του υπολογισμού μια μοναδική αριθμητική τιμή. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα ελέγχου της ταχύτητας μιας κλιματιστικής μονάδας που λαμβάνει ως είσοδο την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, το ασαφές σύστημα θα πρέπει να δώσει στην κλιματιστική μονάδα μια συγκεκριμένη τιμή για την ταχύτητα ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη διαδικασία της από-ασαφοποίησης (defuzzification). Δύο από τις σημαντικότερες μεθόδους είναι οι ακόλουθες:

1. Κέντρο μάζας. Σε αυτή την τεχνική βρίσκουμε το κέντρο μάζας της κατανομής εξόδου ώστε να εξάγουμε μια αριθμητική τιμή. Ο υπολογισμός βασίζεται στη σχέση:

$$z = \frac{\sum_{j=1}^q Z_j u_c(Z_j)}{\sum_{j=1}^q u_c(Z_j)}, \quad (3.6.1)$$

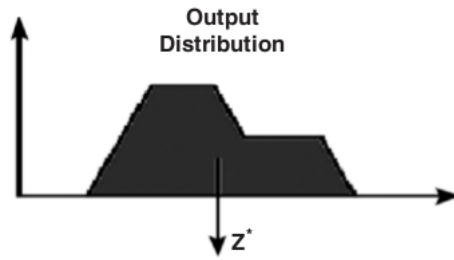
όπου z είναι το κέντρο μάζας και u_c είναι ο βαθμός συμμετοχής στο σύνολο c στην τιμή Z_j . Στο Σχ. 3.19 δίνεται ένα γραφικό παράδειγμα αυτού του υπολογισμού.

2. Μέσος όρος των μεγίστων. Σε αυτή την τεχνική βρίσκουμε το μέσο όρο των μεγίστων της κατανομής εξόδου ώστε να εξάγουμε μια αριθμητική τιμή. Ο υπολογισμός βασίζεται στη σχέση:

$$z = \sum_{j=1}^l \frac{z_j}{l}, \quad (3.6.2)$$

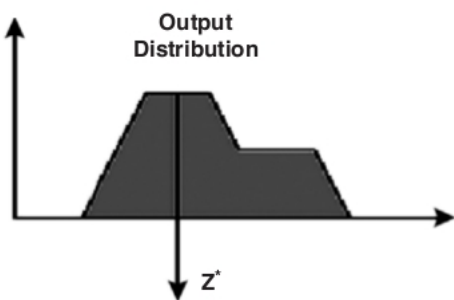
όπου z είναι ο μέσος όρος των μεγίστων, z_j είναι το μέγιστο της συνάρτησης συμμετοχής, και l είναι ο αριθμός των μεγίστων της κατανομής εξόδου. Στο Σχ. 3.13

⁸ Οι ασαφείς αριθμοί είναι μια γενίκευση των πραγματικών αριθμών, με την έννοια ότι δεν αντιστοιχίζονται σε μια μοναδική τιμή αλλά σε ένα σύνολο πιθανών τιμών, όπου σε κάθε πιθανή τιμή ανατίθεται ένα βάρος στο διάστημα $0, 1$. Αυτό το βάρος ονομάζεται *συνάρτηση συμμετοχής*. Επομένως ένας ασαφής αριθμός αποτελεί μια ειδική περίπτωση ενός κυρτού ασαφούς συνόλου.

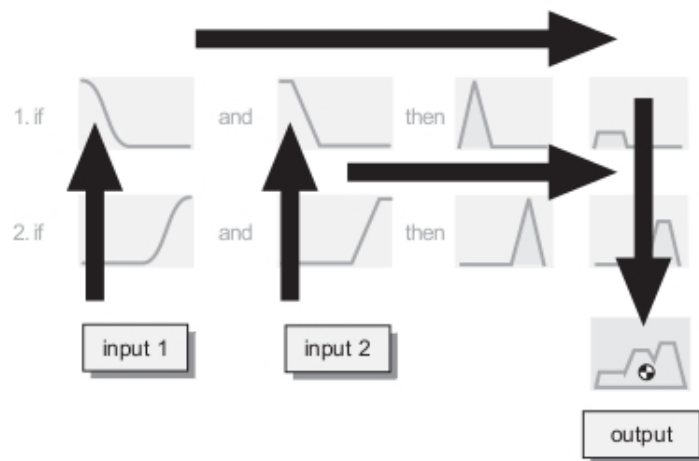


Σχήμα 3.19.: Defuzzification με τη μέθοδο του κέντρου μάζας

δίνεται ένα γραφικό παράδειγμα αυτού του υπολογισμού.



Σχήμα 3.20.: Defuzzification με τη μέθοδο του μέσου όρου των μεγίστων



Σχήμα 3.21.: Διάγραμμα ασαφούς συστήματος

Στο Σχ. 3.21 φαίνεται η ροή της πληροφορίας συνολικά για τη διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων μέσω ενός ασαφούς συστήματος, με δύο εισόδους, δύο κανόνες και μία έξοδο. Η διαδικασία ξεκινά με τις 2 εισόδους στο κάτω αριστερό άκρο, συνεχίζει κατά μήκος κάθε γραμμής (κανόνα) και καταλήγει, μέσω των συμπερασμάτων των κανόνων, στην έξοδο που βρίσκεται στο κάτω δεξί άκρο.

Πλεονεκτήματα. Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Mamdani αναφέρονται παρακάτω:

- Είναι απλή.
- Είναι ευρέως αποδεκτή.
- Είναι κατάλληλη για χρήση σε εφαρμογές όπου βολεύει να υπάρχουν γλωσσικές περιγραφές.

Μέθοδος Takagi-Sugeno. Η μέθοδος Takagi-Sugeno προτάθηκε από τους Takagi, Sugeno και Kang σε μια προσπάθεια να τυποποιήσουν μια συστημική προσέγγιση για την παραγωγή ασαφών κανόνων από ένα σύνολο δεδομένων εισόδου - εξόδου. Ένας τυπικός κανόνας που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο έχει τη μορφή:

$$\text{ΕΑΝ } x \text{ είναι } A \text{ και } y \text{ είναι } B \text{ ΤΟΤΕ } z = f(x, y),$$

όπου A και B είναι ασαφή σύνολα και $z = f(x, y)$ είναι μια τυπική συνάρτηση. Συνήθως η συνάρτηση z είναι ένας πολυωνυμικός συνδυασμός των εισόδων x και y . Υπάρχει η δυνατότητα όμως να είναι μια οποιαδήποτε συνάρτηση αρκεί να περιγράφει καταλλήλως τα δεδομένα εξόδου εντός της ασαφούς περιοχής που ορίζεται από το υποθετικό (antecedent) μέρος του κανόνα.

Όταν η συνάρτηση $z = f(x, y)$ είναι ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού, τότε έχουμε το μοντέλο Sugeno πρώτου βαθμού. Όταν η συνάρτηση $z = f(x, y)$ είναι σταθερή, τότε έχουμε το μοντέλο Sugeno μηδενικού βαθμού. Σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος Sugeno γίνεται μια υποπερίπτωση της μεθόδου Mamdani, όπου το συμπερασματικό κομμάτι κάθε κανόνα ορίζεται από ένα singleton.

Τα δύο πρώτα βήματα της διαδικασίας εξαγωγής συμπερασμάτων, όπως περιγράφηκε προηγουμένως για τη μέθοδο Mamdani, είναι ακριβώς τα ίδια. Η βασική διαφορά μεταξύ των μεθόδων Mamdani και Sugeno είναι ότι στη μέθοδο Sugeno οι συναρτήσεις συμμετοχής των εξόδων είναι είτε σταθερές ή γραμμικές. Το συμπέρασμα του κάθε κανόνα z_i σταθμίζεται με το βαθμό ενεργοποίησης αυτού w_i . Για παράδειγμα, για ένα κανόνα που χρησιμοποιεί τον τελεστή ΚΑΙ με δύο εισόδους x και y , ο βαθμός ενεργοποίησης αυτού δίδεται από τη σχέση

$$w_i = \text{AND}(F_1(x), F_2(x)), \quad (3.6.3)$$

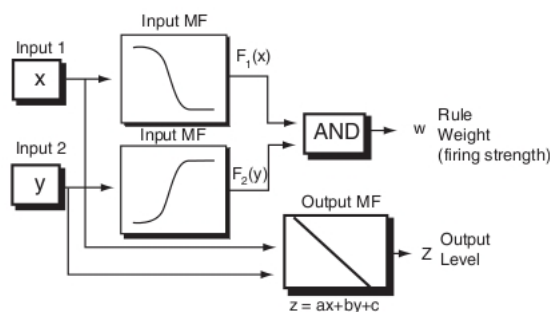
όπου $F_{1,2}(\cdot)$ είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής για τις Εισόδους 1 και 2 αντίστοιχα. Το τελικό αποτέλεσμα του συστήματος είναι ο σταθμικός μέσος των συμπερασμάτων όλων των κανόνων και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\text{Τελικό αποτέλεσμα} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.6.4)$$

Η λειτουργία που περιγράφηκε παραπάνω απεικονίζεται σχηματικά στο Σχ. 3.22.

Πλεονεκτήματα Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα της μεθόδου Sugeno αναφέρονται παρακάτω:

- Έχει καλή υπολογιστική απόδοση.
- Λειτουργεί καλά με γραμμικές τεχνικές (π.χ., εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου).
- Λειτουργεί καλά σε εφαρμογές βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3.22.: Κανόνας Sugeno

- Εξασφαλίζει τη συνέχεια της επιφάνειας εξόδου.
- Είναι κατάλληλη για εφαρμογή με μαθηματική ανάλυση.

Ασαφή Συστήματα Ιεραρχικής Δομής

Τα κλασικά ασαφή συστήματα έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλά επιστημονικά πεδία, όπως ο αυτόματος έλεγχος συστημάτων και η ασαφής ταξινόμηση. Μέσω αυτών των εφαρμογών αποδεικνύονται τα πλεονεκτήματα των ασαφών συστημάτων, όπως η ευελιξία και η ευκολία στο σχηματισμό των κανόνων που τα ελέγχουν. Η ευρύτητα των δυνατών εφαρμογών οφείλεται στην ιδιότητα που έχουν τα ασαφή συστήματα να προσεγγίζουν με αυθαίρετη ακρίβεια μια οποιαδήποτε συνεχή συνάρτηση (universal approximation). Όμως καθώς τα ασαφή συστήματα εφαρμόζονται σε όλο και περισσότερο πολύπλοκα προβλήματα γίνεται εμφανές ένα βασικό τους μειονέκτημα που αποτρέπει την εφαρμογή τους. Αυτό είναι το πρόβλημα της διαστατικότητας (curse of dimensionality), το οποίο συνοψίζεται παρακάτω [77]:

Διαστατικότητα κανόνων: Ο συνολικός αριθμός των κανόνων στην ασαφή βάση κανόνων αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του αριθμού των μεταβλητών εισόδου.

Διαστατικότητα παραμέτρων: Ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων, που χρησιμοποιούνται στις μαθηματικές φόρμουλες των ασαφών συστημάτων, αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του αριθμού των μεταβλητών εισόδου.

Διαστατικότητα δεδομένων ή πληροφοριών: Ο αριθμός των δεδομένων ή το σύνολο των πληροφοριών που απαιτούνται για τον ορισμό των ασαφών συστημάτων αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση του αριθμού των μεταβλητών εισόδου.

Το πρόβλημα της διαστατικότητας επηρεάζει δυσμενώς δύο βασικά πλεονεκτήματα των ασαφών συστημάτων, αυτό της διαφάνειας και αυτό της ερμηνείας, αφού ο αναλυτής δεν μπορεί να κατανοήσει και να αιτιολογήσει κανόνες και παραμέτρους, όταν ο αριθμός τους γίνεται πολύ μεγάλος. Επίσης, καθώς για μια συγκεκριμένη εφαρμογή συνήθως διατίθενται περιορισμένα δεδομένα και πληροφορίες, ένας μεγάλος αριθμός κανόνων και παραμέτρων οδηγεί σε over-fitting⁹ γεγονός που επιδρά αρνητικά στην ικανότητα γενίκευσης των ασαφών συστημάτων.

⁹ Ένα στατιστικό μοντέλο είναι over-fitted όταν περιγράφεται από περισσότερες παραμέτρους από όσες δικαιολογούνται από τα διαθέσιμα δεδομένα [19]. Αυτό συμβαίνει συνήθως όταν ένα μοντέλο είναι πολύ πολύπλοκο σε σχέση με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις. Ένα τέτοιο μοντέλο έχει μειωμένη ικανότητα πρόβλεψης καθώς γίνεται πολύ ευαίσθητο σε μικρές μεταβολές των δεδομένων εισόδου.

Για την υπέρβαση του προβλήματος της διαστατικότητας, η ιεραρχική δομή προτάθηκε από τους Rajou, Zhou και Kisner [58]. Η διαφορά αυτού του είδους ασαφών συστημάτων έγκειται στον τρόπο που συνδέονται οι μεταβλητές εισόδου με τις μεταβλητές εξόδου. Δηλαδή, χρησιμοποιούνται πολλά επίπεδα που συνδέονται μεταξύ τους με κάποια ιεραρχική δομή και αποτελούνται το καθένα από μικρότερα ασαφή συστήματα χαμηλής διαστατικότητας. Τα κλασικά ασαφή συστήματα οργανώνονται σε ένα επίπεδο συνδέοντας τις μεταβλητές εισόδου με τις μεταβλητές εξόδου μέσω μιας μεγάλης βάσης κανόνων. Τα ασαφή συστήματα που αποτελούν τις συνιστώσες του συνολικού συστήματος καλούνται Ασαφείς Λογικές Μονάδες (Fuzzy Logic Unit).

Προβλήματα εκθετικής μεγέθυνσης στα κλασικά ασαφή συστήματα. Σε ένα κλασικό ασαφές σύστημα, συνήθως χρησιμοποιείται μια πινακοποιημένη μορφή για τον ορισμό των ασαφών όρων και των συναρτήσεων συμμετοχής που τους περιγράφουν, ώστε να κατατιμηθεί κατάλληλα ο χώρος που περιέχει τις μεταβλητές εισόδου. Το σύνολο των συνδυασμών των ασαφών όρων και των συναρτήσεων συμμετοχής τους αποτελούν τη βάση των ασαφών κανόνων. Συνεπώς, όταν αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου, αυξάνεται εκθετικά ο αριθμός των κανόνων. Το Σχ. 3.23 δείχνει τους ορισμούς των συναρτήσεων συμμετοχής σε πινακοποιημένη μορφή για ένα σύστημα με δύο μεταβλητές εισόδου, X_1 και X_2 , καθεμία από τις οποίες έχει m δυνατές τιμές ($A_1^1, A_1^2, \dots, A_1^m$ και $A_2^1, A_2^2, \dots, A_2^m$). Ένας ασαφής κανόνας για αυτό το σύστημα μπορεί να οριστεί ως:

ΕΑΝ X_1 είναι A_1^i και X_2 είναι A_2^j , ΤΟΤΕ Y είναι B^{ij} , όπου $i = 1, \dots, m$ και $j = 1, \dots, m$.

A_2^m					
A_2^j					
A_2^3					
A_2^2					
A_2^1					
	A_1^1	A_1^2	A_1^3	A_1^i	A_1^m

Σχήμα 3.23.: Παράδειγμα ορισμού κανόνων και συναρτήσεων συμμετοχής, ασαφούς συστήματος με δύο μεταβλητές εισόδου (πινακοποιημένη μορφή)

Σε αυτή την περίπτωση ο συνολικός αριθμός των κανόνων είναι ίσος με m^2 . Ένα τέτοιο σύνολο κανόνων καλύπτει ολόκληρο το χώρο ορισμού και ονομάζεται πλήρες σύνολο κανόνων (βλ. Παρ. 3.5). Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα ασαφές σύστημα με n μεταβλητές εισόδου, και κάθε μεταβλητή περιγράφεται από m συναρτήσεις συμμετοχής, τότε ένα πλήρες σύνολο κανόνων θα αποτελούταν από m^n διαφορετικούς κανόνες. Αν λοιπόν έχουμε ένα πρόβλημα με 10 μεταβλητές εισόδου, καθεμία από τις οποίες περιγράφεται από 10 συναρτήσεις συμμετοχής, τότε θα υπάρχουν 10^{10} διαφορετικοί κανόνες. Επομένως γίνεται σαφές ότι δεν είναι δυνατό να σχεδιαστεί επιτυχώς ένα τόσο πολύπλοκο σύστημα που έχει τόσες πολλές μεταβλητές εισόδου.

Ο αριθμός των παραμέτρων αυξάνεται επίσης εκθετικά όταν αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου. Αν υποθέσουμε ότι κάθε κανόνας χρειάζεται p παραμέτρους, τότε ένα πρόβλημα με 10 μεταβλητές εισόδου και 10 συναρτήσεις συμμετοχής η καθεμία χρειάζεται $p \times 10^{10}$ παραμέτρους.

Η εκθετική αύξηση του αριθμού των κανόνων, των παραμέτρων και των απαιτούμενων δεδομένων για ένα κλασικό ασαφές σύστημα ονομάζεται «πρόβλημα διαστατικότητας» (curse of dimensionality). Αυτό το πρόβλημα επιφέρει μια σειρά δυσμενών επιπτώσεων, που περιγράφονται ακολούθως:

- Η διαφάνεια και η δυνατότητα ερμηνείας ενός ασαφούς συστήματος μειώνονται ή απαλείφονται εντελώς εξαιτίας της ανικανότητας του ανθρώπινου παράγοντα να κατανοήσει ή να αιτιολογήσει την ύπαρξη εκατοντάδων ή χιλιάδων ασαφών κανόνων και παραμέτρων.
- Συχνά καταλήγουμε σε ένα over-fitted μαθηματικό μοντέλο. Εξαιτίας των περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, ένα μεγάλο σύνολο κανόνων και παραμέτρων οδηγεί σε over-fitting. Αυτό το γεγονός καταστρέφει τη δυνατότητα γενίκευσης ενός ασαφούς συστήματος.
- Οι απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ και υπολογιστική μνήμη αυξάνουν υπερβολικά.

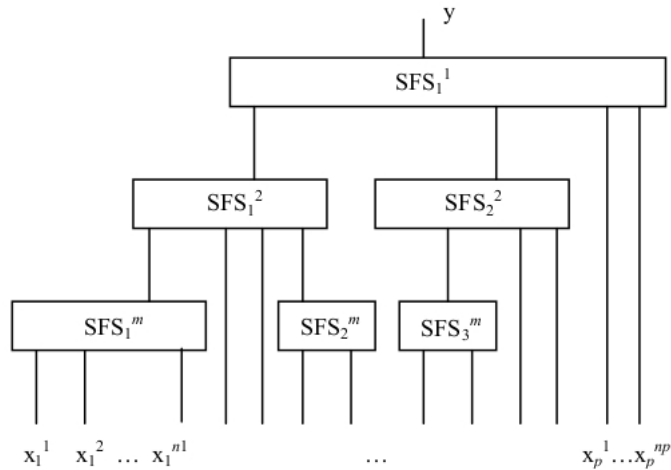
Είναι λοιπόν κατανοητό, ότι υπάρχουν κάποιοι σοβαροί περιορισμοί για την εφαρμογή των ασαφών συστημάτων σε εξαιρετικά πολύπλοκα προβλήματα με υψηλή διαστατικότητα, δηλαδή μεγάλο αριθμό μεταβλητών εισόδου.

Είδη ιεραρχικής δομής. Τα ασαφή συστήματα ιεραρχικής δομής αποτελούνται από έναν αριθμό υποσυστημάτων που συνδέονται μεταξύ τους και συνεισφέρουν στον υπολογισμό της τελικής λύσης. Τα υποσυστήματα που βρίσκονται στη βάση της ιεραρχίας δέχονται ως εισόδους τις αρχικές μεταβλητές και η έξοδος από αυτά χρησιμοποιείται ως είσοδος στα υποσυστήματα ανωτέρου επιπέδου. Γενικά, τα ασαφή συστήματα ιεραρχικής δομής έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Αριθμός επιπέδων ιεραρχίας,
- Αριθμός υποσυστημάτων που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο,
- Αν οι αρχικές μεταβλητές εισόδου χρησιμοποιούνται μόνο από τα υποσυστήματα στο κατώτερο ιεραρχικό επίπεδο ή όχι.

Στο Σχ. 3.24 φαίνεται η γενική μορφή της ιεραρχικής δομής που μπορεί να έχουν τα ασαφή συστήματα, για την περίπτωση συστημάτων πολλών εισόδων - μιας εξόδου (Multiple Inputs Single Output - MISO). Παρότι εξετάζεται μόνο η περίπτωση συστημάτων MISO, τα συμπεράσματα μπορούν εύκολα να γενικευθούν και στην περίπτωση συστημάτων πολλών εισόδων - πολλαπλών εξόδων (Multiple Inputs Multiple Outputs - MIMO). Υπάρχει λοιπόν η δυνατότητα ύπαρξης πολλών επιπέδων και πολλών υποσυστημάτων σε κάθε επίπεδο. Η έξοδος των υποσυστημάτων που βρίσκονται σε κατώτερο επίπεδο χρησιμοποιείται ως είσοδος για τα υποσυστήματα που βρίσκονται σε γειτονικό ανώτερο επίπεδο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι είσοδοι των κατώτερων υποσυστημάτων είναι αρχικές μεταβλητές του συστήματος και μόνο. Οι είσοδοι για το n -οστό επίπεδο μπορεί να είναι οι έξοδοι των κατώτερων από αυτό επιπέδων ή ένας συνδυασμός αυτών με αρχικές μεταβλητές του συστήματος.

Εναλλακτικές μορφές ιεραρχικής δομής μπορεί να είναι, οι αυξητικές (Σχ. 3.25α'), οι συγκεντρωτικές (Σχ. 3.25β') και οι κλιμακωτές. Οι κλιμακωτές δομές αποτελούν συνδυασμό

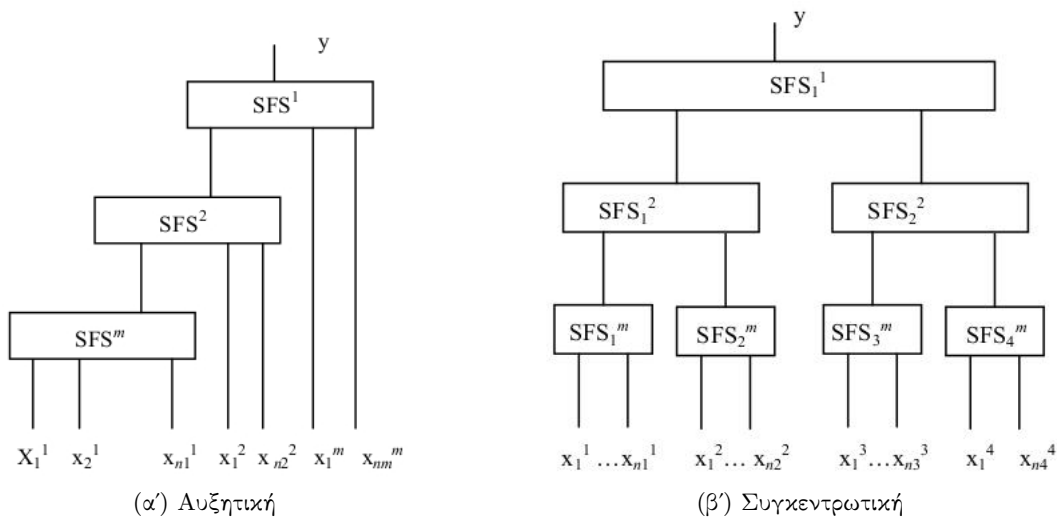


Σχήμα 3.24.: Γενική ιεραρχική δομή ασαφών συστημάτων

των αυξητικών και των συγκεντρωτικών ιεραρχικών δομών. Παράδειγμα αυτού του είδους της δομής φαίνεται στο Σχ. 3.24.

Οι ιεραρχικές δομές ονομάζονται εναλλακτικά δομές συλλογιστικής πολλαπλών σταδίων. Το κάθε στάδιο αποτελεί ένα επίπεδο σε ένα ασαφές σύστημα ιεραρχικής δομής. Επίσης, στις ιεραρχικές δομές κάθε επίπεδο αποτελείται από ένα και μόνο ασαφές υποσύστημα. Το ν -οστό επίπεδο χρησιμοποιεί στην είσοδό του το συνδυασμό της εξόδου του $(\nu - 1)$ -οστού επιπέδου και των αρχικών μεταβλητών εισόδου $(x_\nu^1, \dots, x_\nu^{n\nu})$.

Στις συγκεντρωτικές ιεραρχικές δομές κάθε επίπεδο αποτελείται από πολλά ασαφή υποσυστήματα. Οι αρχικές μεταβλητές χρησιμοποιούνται ως εισόδοι μόνο στο κατώτατο ιεραρχικό επίπεδο, ενώ καμία δεν χρησιμοποιείται ως είσοδος στο ν -οστό επίπεδο. Ένα πρόβλημα που παρουσιάζουν οι συγκεντρωτικές δομές είναι ότι οι συσχετισμένες ή πεπλεγμένες μεταβλητές εισόδου πρέπει να χρησιμοποιηθούν στο ίδιο υποσύστημα στο κατώτατο επίπεδο.



Σχήμα 3.25.: Είδη ιεραρχικής δομής

Οι Zeng και Keane [84] απέδειξαν ότι τα ιεραρχικά συστήματα γενικής μορφής (Σχ. 3.24) είναι universal approximators. Ο αριθμός των κανόνων στα ιεραρχικά συστήματα γενικής

μορφής αυξάνεται πολυωνυμικά με την αύξηση των μεταβλητών εισόδου. Για παράδειγμα, έστω το ασαφές σύστημα ιεραρχικής δομής με δύο επίπεδα όπως φαίνεται στο Σχ. 3.26. Ο αριθμός των κανόνων για αυτό το σύστημα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sum_{j=1}^m \left(\prod_{k=1}^{n_{2j}} N_{k^{2j}} \right) + \prod_{j=1}^m N_{2j} \times \prod_{k=1}^{n_1} N_{k^1}, \quad (3.6.5)$$

όπου m είναι ο αριθμός των υποσυστημάτων στο κατώτατο ιεραρχικό επίπεδο, n_{2j} είναι ο αριθμός των αρχικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται ως είσοδος για το j -οστό υποσύστημα στο κατώτατο επίπεδο, n_1 είναι ο αριθμός των αρχικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στο ανώτατο επίπεδο, $N_{k^{2j}}$ είναι ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής της k -οστής μεταβλητής που χρησιμοποιείται ως είσοδος στο j -οστό υποσύστημα στο κατώτατο επίπεδο, N_{2j} είναι ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής της εξόδου από το j -οστό υποσύστημα στο κατώτατο επίπεδο, N_{k^1} είναι ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής της k -οστής αρχικής μεταβλητής που χρησιμοποιείται ως είσοδος στο ανώτατο επίπεδο.

Το άνω όριο του συνολικού αριθμού των κανόνων και των παραμέτρων για ένα ιεραρχικό ασαφές σύστημα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\left(\sum_{j=1}^m M^{n_{2j}} + M^{n_1+m} \right), \quad (3.6.6)$$

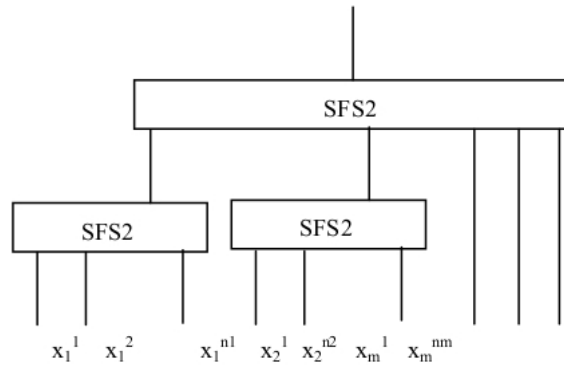
ενώ ο αντίστοιχος αριθμός για ένα κλασικό ασαφές σύστημα είναι ίσος με M^n , όπου $M = \max \left\{ \max_{k=1}^{n_1} (N_{k^1}), \max_{j=1}^m (N_{2j}), \max_{k=1}^{n_{2j}} (N_{k^{2j}}) \right\}$ και $n = \sum_{j=1}^m n_{2j} + n_1$. Παρατηρούμε ότι,

$$\frac{\sum_{j=1}^m M^{n_{2j}} + M^{n_1+m}}{M^n} \rightarrow 0, \quad \text{όταν } M \rightarrow \infty \quad (3.6.7)$$

Επομένως συμπεραίνουμε ότι η ιεραρχική δομή βοηθά στη μείωση των κανόνων ενός δεδομένου ασαφούς συστήματος όταν αυτός είναι μεγάλος ($M \rightarrow \infty$).

Μερικά προβλήματα στη χρήση μιας ιεραρχικής δομής αναφέρονται παρακάτω. Η ανάπτυξη της ίδιας της δομής, δηλαδή ο προσδιορισμός του αριθμού των ιεραρχικών επιπέδων, του αριθμού των ασαφών υποσυστημάτων ανά επίπεδο και ο προσδιορισμός των μεταβλητών εισόδου για κάθε υποσύστημα, δεν είναι εύκολη. Επίσης, για την ανάπτυξη μιας ιεραρχικής δομής, οι έξοδοι του $(\nu - 1)$ -οστού επιπέδου μαζί με τις αρχικές μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι για το ν -οστό επίπεδο, πρέπει να ομαδοποιηθούν κατάλληλα ώστε να τροφοδοτηθούν στο ανώτερο ν -οστό επίπεδο. Ο προσδιορισμός των ενδιάμεσων μεταβλητών και των χαρακτηριστικών τους είναι άλλο ένα πρόβλημα στη διαδικασία αυτή.

Ενδιάμεσες μεταβλητές. Οι ιεραρχικές δομές εισάγουν την έννοια της ενδιάμεσης μεταβλητής. Ενδιάμεσες μεταβλητές ονομάζονται αυτές οι μεταβλητές που λειτουργούν ως έξοδος για τα ασαφή υποσυστήματα που βρίσκονται στα κατώτερα ιεραρχικά επίπεδα και τροφοδοτούνται ως είσοδοι στα υποσυστήματα των ανώτερων ιεραρχικών επιπέδων. Εάν ένα πρόβλημα μπορεί να αποσυντεθεί σε υπό-προβλήματα, τότε η συγκεκριμένη εφαρμογή διαθέτει ήδη μια ιεραρχική δομή. Επομένως η δομή του προκύπτοντος ιεραρχικού συστήματος πρέπει να ακολουθεί την εγγενή δομή του προβλήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι ενδιάμεσες μεταβλητές θα έχουν φυσική σημασία και έτσι διευκολύνεται η κατασκευή της ιεραρχικής δομής του ασαφούς συστήματος. Σε πολλές περιπτώσεις όμως το αρχικό πρόβλημα δεν μπορεί να αποσυντεθεί σε μικρότερα κομμάτια, οπότε οι ενδιάμεσες μεταβλητές δεν θα διαθέτουν πλέον φυσική σημασία. Αυτό δυσχεραίνει αρκετά την ανάπτυξη ενός κατάλληλου ασαφούς συστήματος για την επίλυση του προβλήματος.



Σχήμα 3.26.: Ιεραρχική δομή δύο επιπέδων

Επιπλέον οι ενδιάμεσες μεταβλητές που δεν διαθέτουν φυσική σημασία έχουν δυσμενή επίπτωση στη διαφάνεια του συστήματος. Επομένως το σύστημα θα αρχίσει να συμπεριφέρεται ως μαύρο κουτί, συμπεριφορά που δεν είναι επιθυμητή. Τα ιεραρχικά συστήματα αποτελούνται από κανόνες σε πολλά επίπεδα όπως για παράδειγμα,

EAN X_1 είναι A_1 και ... και X_n είναι A_n , TOTE Y_1 είναι B_1 και ... και Y_m είναι B_m ,

EAN Y_1 είναι B_1 και ... και Y_m είναι B_m , TOTE Z είναι C .

Στην περίπτωση που οι ενδιάμεσες μεταβλητές Y_1, \dots, Y_m δεν έχουν φυσική σημασία τότε η πορεία των συλλογισμών γίνεται λιγότερο κατανοητή. Επιπλέον όταν οι ενδιάμεσες μεταβλητές αποτελούνται από λίγες συναρτήσεις συμμετοχής τότε έχουμε μεγαλύτερη απώλεια πληροφορίας, πρόβλημα που εμφανίζεται εγγενώς στα ιεραρχικά συστήματα και εξαρτάται από τον αριθμό των επιπέδων αλλά και από τον αριθμό των συναρτήσεων συμμετοχής που αποτελούν κάθε ενδιάμεση μεταβλητή.

Σε ένα κλασικό ασαφές σύστημα, η διαδικασία του defuzzification μετατρέπει το ασαφές συμπέρασμα (έξοδος του συστήματος) σε σαφή αριθμητική τιμή. Κατά τη διαδικασία αυτή υπάρχει ένα ποσοστό απώλειας της πληροφορίας. Αντίστοιχα σε ένα ασαφές σύστημα με ιεραρχική δομή το defuzzification στα κατώτερα επίπεδα επιφέρουν απώλεια πληροφορίας, η οποία θα μεταφερθεί στα ανώτερα επίπεδα. Αυτή η απώλεια πληροφορίας ονομάζεται *διασπορά της ασάφειας* ή *έκρηξη ασάφειας* (spread of fuzziness, fuzzy explosion) [39]. Η διασπορά της ασάφειας από τα κατώτερα στα ανώτερα επίπεδα του συστήματος σε μεγάλο βαθμό θα εξαλείψει την ύπαρξη της λύσης του προβλήματος. Αυτό σημαίνει ότι όσο περισσότερα επίπεδα και όσο περισσότερα υποσυστήματα βρίσκονται σε κάθε επίπεδο σε ένα ιεραρχικό ασαφές σύστημα τόσο θα αυξάνεται η αβεβαιότητα που διέπει το σύστημα.

Επιπλέον, όταν αυξάνεται ο αριθμός των κανόνων που ενεργοποιούνται κάθε φορά, τότε αυξάνεται η αβεβαιότητα του αποτελέσματος. Επομένως η διασπορά της ασάφειας επηρεάζει τόσο την ανάθεση των συναρτήσεων συμμετοχής στις διάφορες μεταβλητές αλλά και το συμπερασματικό μέρος των κανόνων. Η επιθυμητή συμπεριφορά για ένα σύστημα είναι να ενεργοποιείται μικρός αριθμός κανόνων κάθε φορά ώστε να μειώνεται η διασπορά της ασάφειας και να διατηρείται η διαφάνεια των κανόνων. Ένας τρόπος να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα είναι να χρησιμοποιούνται συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε μεταβλητή, οι οποίες να έχουν μικρή επιφάνεια αλληλεπικάλυψης. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιήσουμε τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής σε αντίθεση με Γκαουσιανές συναρτήσεις (δύο είδη συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά στην ανάπτυξη των ασαφών συστημάτων) μπορούμε να ρυθμίσουμε καλύτερα τις επιφάνειες αλληλεπικάλυψης και άρα να μειώσουμε

τον αριθμό των κανόνων που ενεργοποιούνται ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα αν η ακμή της μιας τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής δεν φτάνει μέχρι το μέσο σημείο της γειτονικής συνάρτησης, τότε ο αριθμός των κανόνων που ενεργοποιούνται ταυτόχρονα είναι ίσος με 2^n , n είναι ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου. Άλλος ένας παράγοντας είναι η ευαισθησία των συναρτήσεων συμμετοχής και του συμπερασματικού μέρους των κανόνων. Η ευαισθησία των συναρτήσεων συμμετοχής εξαρτάται από τη μορφή αυτών, συγκεκριμένα συναρτήσεις συμμετοχής με μεγαλύτερες κλίσεις δίνουν μεγαλύτερη ευαισθησία στο σύστημα, ενώ το αντίθετο ισχύει για συναρτήσεις συμμετοχής με μικρότερες κλίσεις. Για το συμπερασματικό μέρος των κανόνων ισχύει ότι μικρές τιμές δίνουν μικρότερη ευαισθησία της εξόδου των υποσυστημάτων προς τα ανώτερα υποσυστήματα.

4. Ρίσκο, Αβεβαιότητα, και Ανάλυση

4.1. Ορισμός

Σε ένα μη-τεχνικό πλαίσιο ο όρος «ρίσκο» αναφέρεται σε μια κατάσταση για την οποία υπάρχει μια πιθανότητα, αλλά δεν είναι σίγουρο, ότι θα επιφέρει κάποιο ανεπιθύμητο γεγονός. Σε πολλές περιπτώσεις ο όρος «κίνδυνος» μπορεί να αντικαταστήσει εννοιολογικά τον όρο «ρίσκο». Σε τεχνικό πλαίσιο ο όρος έχει διάφορες αρκετά πιο σαφείς ορισμούς, ανάλογα με το επιστημονικό πεδίο όπου χρησιμοποιείται. Οι δύο βασικές κατηγορίες των ορισμών του όρου είναι, (α) ποιοτικοί, και (β) ορισμοί. Υπάρχουν πέντε διαφορετικοί ορισμοί, οι οποίοι είναι σημαντικοί γιατί είναι ευρέως αποδεκτοί σε διάφορα επιστημονικά πεδία [25]:

1. **Ρίσκο = ένα ανεπιθύμητο γεγονός**, το οποίο είτε μπορεί να συμβεί ή να μην συμβεί.
Ένα παράδειγμα αυτού του ορισμού είναι η έκφραση: «Ο καρκίνος των πνευμόνων είναι από τους μεγαλύτερους κινδύνους (ρίσκο) που απειλούν τους καπνιστές.»
2. **Ρίσκο = η αιτία ενός ανεπιθύμητου γεγονότος**, το οποίο είτε μπορεί να συμβεί ή να μην συμβεί.
Ένα παράδειγμα αυτού του ορισμού είναι η έκφραση: «Το κάπνισμα είναι ο σημαντικότερος κίνδυνος για την υγεία στις βιομηχανοποιημένες χώρες.»
Το ανεπιθύμητο γεγονός που υπονοείται στην προηγούμενη έκφραση είναι οι ασθένειες που προκαλούνται από το κάπνισμα.
3. **Ρίσκο = η πιθανότητα ενός ανεπιθύμητου γεγονότος**, το οποίο είτε μπορεί να συμβεί ή να μην συμβεί.
Ένα παράδειγμα αυτού του ορισμού είναι η έκφραση: «Το ρίσκο της μείωσης του προσδόκιμου ζωής για έναν καπνιστή από ασθένειες που σχετίζονται με το κάπνισμα είναι περίπου 50%.»
4. **Ρίσκο = η αναμενόμενη έκβαση (στατιστικά) ενός ανεπιθύμητου γεγονότος**, το οποίο είτε μπορεί να συμβεί ή να μην συμβεί.
Η αναμενόμενη έκβαση ενός πιθανού γεγονότος με αρνητικές συνέπειες είναι το γινόμενο της πιθανότητας αυτό να συμβεί με κάποιο μέτρο των συνεπειών αυτού. Για παράδειγμα, ένα κοινό μέτρο των συνεπειών ενός ατυχήματος είναι ο αριθμός των ανθρώπινων απωλειών. Χρησιμοποιώντας αυτό το μέτρο, το ρίσκο που σχετίζεται με ένα πιθανό ατύχημα ισούται με τον στατιστικώς αναμενόμενο αριθμό θανάτων. Αν χρησιμοποιήσουμε ένα διαφορετικό μέτρο για την ποσοτικοποίηση των συνεπειών ενός ανεπιθύμητου γεγονότος, τότε προκύπτουν και διαφορετικά μέτρα για το ρίσκο. Η χρήση αυτού του ορισμού για το ρίσκο έχει ξεκινήσει σχετικά πρόσφατα, αν αναλογιστούμε ότι η στατιστική θεωρία των αναμενόμενων τιμών χρησιμοποιείται από τον 17ο αιώνα. Ο όρος εισήχθη για πρώτη φορά, στον τομέα της ανάλυσης ρίσκου, στην Μελέτη για την Ασφάλεια των Πυρηνικών Αντιδραστήρων, WASH-1400 [59]. Σήμερα έχει καθιερωθεί ως ο κύριος ορισμός για το ρίσκο σε πολλά επιστημονικά πεδία. Για το λόγο αυτό ονομάζεται και *κλασικός ορισμός του ρίσκου*.
5. **Ρίσκο = το γεγονός ότι μια απόφαση λαμβάνεται σε περιβάλλον γνωστών πιθανοτήτων**.

Αυτός ο ορισμός διακρίνει την περίπτωση της λήψης αποφάσεων σε περιβάλλον ρίσκου από την περίπτωση της λήψης αποφάσεων σε περιβάλλον αβεβαιότητας.

Οι ορισμοί που δόθηκαν παρουσιάζουν ένα κοινό σημείο, το οποίο είναι ότι το ρίσκο ως έννοια συμπεριλαμβάνει δύο βασικές συνιστώσες [66]: (1) την ύπαρξη μιας πιθανής ανεπιθύμητης συνέπειας ή απώλειας και (2) μια αβεβαιότητα για την πραγματοποίηση αυτής της συνέπειας, η οποία μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια της θεωρίας των πιθανοτήτων.

Ο παραδοσιακός ορισμός του ρίσκου λοιπόν μπορεί να δοθεί από την Εξ. 4.1.3:

$$\text{Ρίσκο} = \text{Πιθανότητα} \times \text{Συνέπειες.} \quad (4.1.1)$$

Έναν παρόμοιο ορισμό έδωσαν και οι Kaplan και Garrick [33] με την εισαγωγή της ιδέας του «συνόλου τριάδων» (set of triplets idea). Σε μια ανάλυση ρίσκου πρέπει να απαντηθούν τα ακόλουθα βασικά ερωτήματα: (1) τι μπορεί να συμβεί, (2) πόσο πιθανό είναι να συμβεί αυτό, και (3) εάν συμβεί, τότε ποιές είναι οι συνέπειες.

Για να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα πρέπει να καταρτιστεί μια λίστα με πιθανές εκβάσεις ή «σενάρια». Το κάθε σενάριο θα συνοδεύεται από την πιθανότητα να συμβεί και τις συνέπειες που το συνοδεύουν. Για αυτό το σκοπό, οι Kaplan και Garrick όρισαν την ακόλουθη τριάδα αριθμών:

$$\langle s_i, p_i, x_i \rangle,$$

όπου s_i είναι η περιγραφή του σεναρίου, p_i είναι η πιθανότητα του να συμβεί αυτό το σενάριο και x_i είναι οι συνέπειες αυτού του σεναρίου. Το ρίσκο είναι λοιπόν το σύνολο αυτών των τριάδων για όλα τα πιθανά σενάρια που ενδιαφέρουν στην ανάλυση. Επομένως το ρίσκο, R , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R = \{ \langle s_i, p_i, x_i \rangle \}, i = 1, 2, \dots, N \quad (4.1.2)$$

Με αυτό τον ορισμό, οι Kaplan και Garrick αποκλίνουν από τον παραδοσιακό ορισμό του ρίσκου, που συμπυκνώνει την έννοια σε ένα νούμερο, και το ορίζουν ως το σύνολο «πιθανοτήτων και συνεπειών». Το πρόβλημα που εντοπίζουν στον παραδοσιακό ορισμό αποτελείται από δύο σκέλη. Το πρώτο αφορά την περίπτωση όπου η ανάλυση περιλαμβάνει ένα μοναδικό σενάριο, οπότε ο παραδοσιακός ορισμός εξισώνει ένα σενάριο χαμηλής πιθανότητας και μεγάλων συνεπειών με ένα άλλο που έχει υψηλή πιθανότητα με μικρές συνέπειες. Το δεύτερο αφορά την περίπτωση όπου η ανάλυση περιλαμβάνει πολλά σενάρια, οπότε ο παραδοσιακός ορισμός συμπυκνώνει το ρίσκο στην αναμενόμενη τιμή του ρίσκου του κάθε σεναρίου. Επομένως, το βασικό πρόβλημα του παραδοσιακού ορισμού είναι η υπονοούμενη υπόθεση ότι η αντιμετώπιση ως προς το ρίσκο είναι ουδέτερη (risk-neutral), ενώ στην πραγματικότητα οι περισσότεροι άνθρωποι επιθυμούν την αποφυγή του ρίσκου (risk-averse) μη λαμβάνοντας μόνο υπόψη την ποσοτικοποίηση των συνεπειών ενός πιθανού σεναρίου. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε τις δύο ακόλουθες καταστάσεις:

- Ένα παιχνίδι με νόμισμα όπου η έκβαση «κεφαλή» αποφέρει κέρδος €20,000 και η έκβαση «γράμματα» αποφέρει κέρδος €10,000.
- Μια σίγουρη πληρωμή €5,000.

Η ουδέτερη ως προς το ρίσκο αντιμετώπιση εξισώνει αυτές τις δύο περιπτώσεις, αφού έχουν την ίδια αναμενόμενη τιμή: $(20,000 \times 0.5) + (-10,000 \times 0.5) = 5,000$.

Ο Chongfu Huang έδωσε έναν εναλλακτικό ορισμό του ρίσκου, ο οποίος δεν ακολουθεί έναν αυστηρό μαθηματικό φορμαλισμό αλλά μια γλωσσική περιγραφή [27]. Με αυτό τον τρόπο ο ορισμός της έννοιας του ρίσκου περιλαμβάνει κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία δεν

μπορούν να αποδοθούν μέσω του παραδοσιακού ορισμού. Συγκεκριμένα, ο Huang θεωρεί ότι υπάρχει ρίσκο σε μια κατάσταση όταν υπάρχει κάποια πιθανή απώλεια και το οικονομικό κόστος αυτής είναι σημαντικό. Προφανώς ο προσδιορισμός του τι είναι σημαντικό δεν είναι αντικειμενικός. Για αυτό το λόγο προτιμάται η γλωσσική περιγραφή, που επιτρέπει ένα επίπεδο ασάφειας και υποκειμενικότητας στον ορισμό, έναντι του αυστηρού μαθηματικού φορμαλισμού. Ο ορισμός που δόθηκε είναι ο ακόλουθος:

Ορισμός. Το ρίσκο είναι μια *σκηνή* στο μέλλον που σχετίζεται με κάποιο *δυσμενές* περιστατικό.

Μια *σκηνή* είναι κάτι που παρατηρείται: μια άποψη ή μια προοπτική. *Δυσμενές* είναι κάτι που είναι αντίθετο με τα συμφέροντα ή την πρόνοια κάποιου: επιβλαβές ή ανεπιθύμητο.

Η περιγραφή μιας σκηνής πρέπει να περιλαμβάνει το χρόνο, τον τόπο και τα αντικείμενα που περιέχονται σε αυτόν. Η συσχέτιση της μελλοντικής σκηνής με το δυσμενές περιστατικό γίνεται μέσω ενός μετρικού χώρου, όπως είναι η πιθανότητα. Η περιγραφή του περιστατικού συνοδεύεται από ένα μέγεθος, όπως είναι η απώλεια.

Ρίσκο - Αβεβαιότητα. Οι όροι «ρίσκο» και «αβεβαιότητα» έχουν σαφώς διαφορετικό εννοιολογικό πλαίσιο, αν και πολλές φορές υπάρχει σύγχυση κατά τη χρήση τους. Η βασική διαφορά μεταξύ αυτών είναι ο αριθμός των διαστάσεών τους. Ο όρος «αβεβαιότητα» είναι μονοδιάστατος, ενώ ο όρος «ρίσκο» είναι διδιάστατος¹. Οι δύο διαστάσεις του ρίσκου, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, είναι η αβεβαιότητα για ένα πιθανό σενάριο/έκβαση κατάστασης και οι συνέπειες που επιφέρει η πραγματοποίηση αυτού του σεναρίου. Γίνεται κατανοητό λοιπόν ότι η αβεβαιότητα εμπεριέχεται στην έννοια του ρίσκου, ενώ το αντίθετο δεν συμβαίνει. Εννοιολογικά, μπορούμε να πούμε ότι μπορεί να υπάρχει αβεβαιότητα χωρίς ρίσκο, αλλά δεν μπορεί να υπάρχει ρίσκο χωρίς αβεβαιότητα. Ο Douglas Hubbard έχει ορίσει σαφώς αυτούς τους δύο όρους και τους διακρίνει επιπρόσθετα σύμφωνα με τον τρόπο ποσοτικοποίησης [28],

Αβεβαιότητα. Είναι η παντελής έλλειψη βεβαιότητας, δηλαδή η ύπαρξη περισσότερων από μια δυνατοτήτες. Υπό συνθήκες αβεβαιότητας το «πραγματικό» αποτέλεσμα/έκβαση/κατάσταση/τιμή δεν είναι γνωστό.

Μέτρηση αβεβαιότητας. Ένα σύνολο πιθανοτήτων αντιστοιχίζεται σε ένα σύνολο δυνατοτήτων. Για παράδειγμα, «Υπάρχει 60% πιθανότητα να βρέξει αύριο, και 40% πιθανότητα να μην βρέξει.»

Ρίσκο. Είναι η κατάσταση υπό συνθήκες αβεβαιότητας, όπου μερικές από τις δυνατότητες περιλαμβάνουν μια απώλεια, τραυματισμό, καταστροφή, ή κάποια άλλη ανεπιθύμητη έκβαση.

Μέτρηση ρίσκου. Ένα σύνολο δυνατοτήτων καθένα με ποσοτικοποιημένες πιθανότητες και ποσοτικοποιημένες συνέπειες (αρνητικές). Για παράδειγμα, «Πιστεύεται ότι υπάρχει 40% πιθανότητα μια πετρελαιοπηγή να μην έχει αποθέματα, με απώλεια €12 εκ. για εξερευνητικές γεωτρήσεις.»

Επομένως, αβεβαιότητα υπάρχει όταν δεν γνωρίζουμε την έκβαση μιας συγκεκριμένης κατάστασης, και μπορεί να οφείλεται είτε σε έλλειψη πληροφοριών ή σε άγνοια για τη λειτουργία ενός συστήματος. Ρίσκο υπάρχει σε μια αβέβαιη κατάσταση όταν η πραγματοποίησή της συνοδεύεται από ανεπιθύμητες απώλειες. Αυτό μπορεί να οριστεί συμβολικά μέσω της Εξ. 4.1.3.

$$\text{Ρίσκο} = \text{αβεβαιότητα} + \text{απώλεια}. \quad (4.1.3)$$

¹ Θα μπορούσαμε να ορίσουμε το ρίσκο ως ένα διανυσματικό μέγεθος.

4.2. Είδη Αβεβαιότητας

Η αβεβαιότητα εκφράζει την ανικανότητα της ακριβούς πρόβλεψης για την έκβαση μιας κατάστασης. Ο όρος «αβεβαιότητα» διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους. Ο ένας είναι η μεταβλητότητα (aleatory uncertainty) και ο άλλος είναι η γνωσιολογική αβεβαιότητα (epistemic uncertainty). Η ακόλουθη περιγραφή βασίζεται στην ανάλυση που έχει γίνει στα [76, 8].

Η μεταβλητότητα είναι εγγενές χαρακτηριστικό των διάφορων φυσικών συστημάτων και οφείλεται στην επίδραση της τυχαιότητας. Η τυχαιότητα που υπάρχει στο φυσικό κόσμο είναι καταρχήν ένα φιλοσοφικό ζήτημα, αλλά έχει επίσης αποδειχτεί επιστημονικά από τον Heisenberg, με την «Αρχή της Αβεβαιότητας», για το κβαντικό επίπεδο. Η μεταβλητότητα, για ένα συγκεκριμένο σύστημα, δεν μπορεί να μειωθεί με την απόκτηση πρόσθετης γνώσης ή πρόσθετων δεδομένων. Ένας εναλλακτικός όρος για τη μεταβλητότητα είναι «στοχαστική μεταβλητότητα». Η επίδραση της μεταβλητότητας γίνεται κατανοητή αν αναλογιστούμε το γνωστό, από τη θεωρία των πιθανοτήτων, παράδειγμα του νομίσματος. Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα αμερόληπτο νόμισμα, τότε αν το πετάξουμε μια φορά υπάρχουν δύο πιθανές εκβάσεις (κορόνα, Κ, ή γράμματα, Γ), καθεμία με 50% πιθανότητα. Εάν το πετάξουμε τέσσερις συνεχόμενες φορές, τότε υπάρχουν τέσσερις πιθανές εκβάσεις (ΚΚ, ΚΓ, ΓΚ, ΓΓ), καθεμία με 25% πιθανότητα. Επειδή η διαδικασία είναι εγγενώς τυχαία, και άρα υπάρχει μεταβλητότητα στα αποτελέσματα, δεν μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα ποια θα είναι η έκβαση σε κάθε πέταγμα του νομίσματος.

Η γνωσιολογική αβεβαιότητα σχετίζεται με την έλλειψη της γνώσης γύρω από τη λειτουργία ενός συστήματος. Είναι το επίπεδο της άγνοιας που έχουμε για τις παραμέτρους που περιγράφουν ένα φυσικό σύστημα. Αυτό το είδος της αβεβαιότητας μπορεί να μειωθεί αν βελτιώσουμε το επίπεδο της γνώσης που κατέχουμε. Για παράδειγμα, στις επιστήμες των μηχανικών η συνήθης μέθοδος για να μειωθεί η γνωσιολογική αβεβαιότητα είναι να εξάγονται δεδομένα μέσα από πειράματα και να αναλύονται ώστε να βελτιωθεί η κατανόηση του φυσικού συστήματος που προσπαθούμε να μοντελοποιήσουμε. Η γνωσιολογική αβεβαιότητα εξαρτάται έντονα από τον εκάστοτε αναλυτή, καθώς το επίπεδο γνώσεων μπορεί να ποικίλει. Επομένως, εξ ορισμού η γνωσιολογική αβεβαιότητα δεν είναι ένα αντικειμενικό μέτρο.

Η διάκριση ανάμεσα στους δύο τύπους αβεβαιότητας δεν είναι πάντοτε σαφής. Σε αυτό συμβάλλει και το γεγονός ότι και οι δύο τύποι εκφράζονται μέσω του ίδιου μεγέθους, την πιθανότητα. Η διάκριση γίνεται όμως χρήσιμη στα πλαίσια της μοντελοποίησης ενός συγκεκριμένου συστήματος. Η διάκριση της αβεβαιότητας στις δύο αυτές κατηγορίες μπορεί να χρησιμεύσει ώστε:

- να αποσαφηνιστούν κάποιες επιλογές που αφορούν τη διαδικασία της μοντελοποίησης,
- να προσφέρει τη βάση για την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας,
- να καταστήσει σαφείς τις επιδράσεις των διαφόρων τύπων αβεβαιότητας στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Το τελευταίο σημείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό γιατί με τον τρόπο αυτό μπορούμε να ποσοτικοποιήσουμε τον βαθμό, στον οποίο η μείωση των αβεβαιοτήτων, π.χ. μέσω της απόκτησης περισσότερων δεδομένων, θα επηρεάσει το αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια της σχεδίασης ενός συστήματος, η διάκριση και η ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων δίνει τη δυνατότητα να επικεντρωθεί ο σχεδιασμός στους παράγοντες αυτούς που το επηρεάζουν εντονότερα.

4.3. Ανάλυση Ρίσκου

Μια πλήρης εκτίμηση του ρίσκου αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα [76]:

1. Αναγνώριση του κινδύνου προς ανάλυση και που πιθανότατα επιθυμούμε να ελέγξουμε.
2. Μια ποιοτική περιγραφή του κινδύνου: για ποιο λόγο μπορεί να πραγματοποιηθεί, οι παράγοντες που είτε θα αύξαναν ή θα μείωναν την πιθανότητα αυτού να πραγματοποιηθεί, με ποιο τρόπο μπορεί να μειωθεί αποδοτικά η επίδραση του κινδύνου, κλπ.
3. Μια ποσοτική ανάλυση του κινδύνου και των σχετικών επιλογών διαχείρισης που έχουμε στη διάθεσή μας, ώστε να επιλέξουμε την καλύτερη στρατηγική ελέγχου για αυτό τον κίνδυνο.
4. Εφαρμογή της στρατηγικής διαχείρισης του ρίσκου που έχουμε επιλέξει.
5. Επικοινωνία της απόφασης, και της βάσης στην οποία στηρίζεται, στους εμπλεκόμενους φορείς. Αυτή η φάση μπορεί να συμπεριλαμβάνει ενημέρωση των εμπλεκόμενων φορέων σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη αποδοχή της τελικής απόφασης από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς.

Η ποσοτική ανάλυση του ρίσκου αποτελείται από δύο τμήματα, σύμφωνα με το γενικό ορισμό του ρίσκου, την εκτίμηση της πιθανότητας να πραγματοποιηθεί η ανεπιθύμητη έκβαση στο μέλλον και την ποσοτικοποίηση των συνεπειών από αυτή την πραγματοποίηση.

Η ποσοτικοποίηση της πιθανότητας μπορεί να γίνει με δύο τρόπους [66]: (1) ποιοτικές τεχνικές όπως ερωτηματολόγια (γνώση ειδικών), και (2) ποσοτικές τεχνικές όπως ανάλυση σπάνιων γεγονότων (rare event analysis), προσομοίωση (simulation), και παρεκβολή (scientific extrapolation).

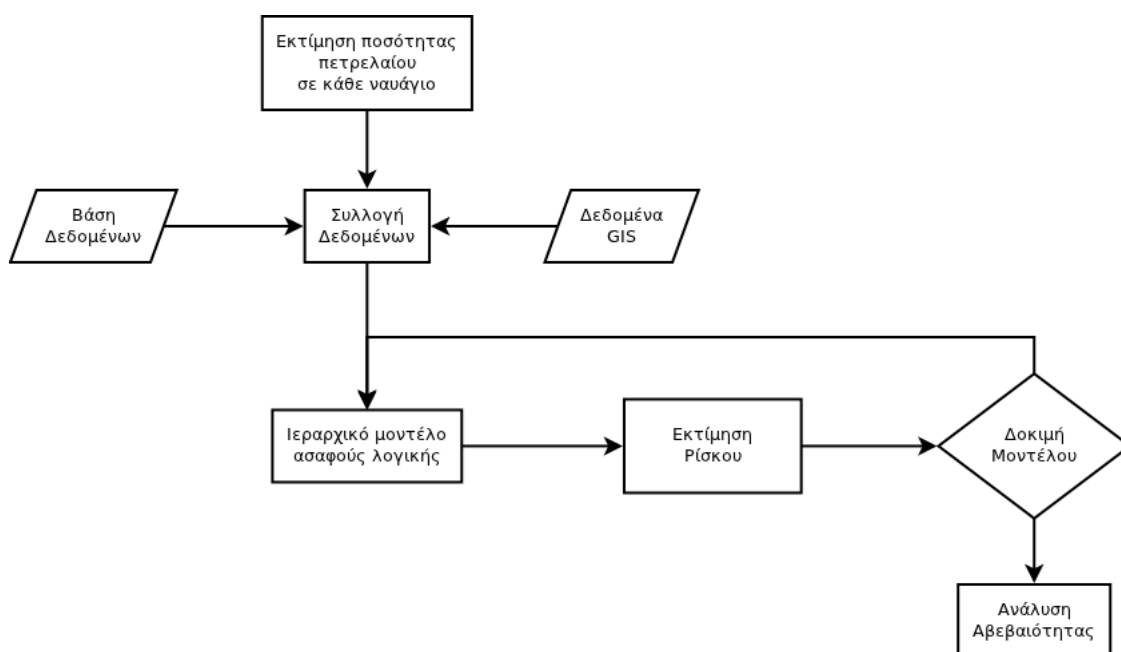
Η ποσοτικοποίηση των συνεπειών του κινδύνου περιλαμβάνει τις ακόλουθες μεθόδους:

- Ανάλυση κόστους - οφέλους (Cost-benefit analysis),
- Ανάλυση ρίσκου - οφέλους (Risk-benefit analysis),
- Προγραμματισμός πολλαπλών κριτηρίων, για αντικρουόμενους στόχους (Multi-objective programming),
- Στοχαστικός προγραμματισμός (Stochastic programming),
- Θεωρία αποφάσεων-παιγνίων (Decision-game theory),
- Θεωρία επιλογών (Theory of choice).

5. Περιγραφή Μεθοδολογίας

5.1. Πορεία Υπολογισμών

Η μεθοδολογία, για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου από την πιθανή διαρροή πετρελαίου από πλήρως βυθισμένα ναυάγια, αποτελείται από τα βήματα ακόλουθα βήματα (Σχ. 5.1): (1) Συλλογή Δεδομένων, (2) Ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου, (3) Εκτίμηση περιβαλλοντικού ρίσκου, (4) Δοκιμή μοντέλου και αξιολόγηση αποτελεσμάτων, και (5) Ανάλυση αβεβαιότητας.



Σχήμα 5.1.: Πορεία μεθοδολογίας

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν περιλαμβάνουν καταγραφές και πληροφορίες για ναυάγια που βρίσκονται βυθισμένα στην Ελλάδα, γεωγραφικά δεδομένα όπως βαθυμετρία, επιφανειακή θαλάσσια κυκλοφορία κ.α., και τις ποσότητες πετρελαιοειδών που πιθανόν βρίσκονται εγκλωβισμένα σε κάθε ναυάγιο. Οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν για τα βυθισμένα ναυάγια στην Ελλάδα οργανώθηκαν σε μια ενιαία βάση δεδομένων. Ο πρωταρχικός στόχος της βάσης δεδομένων είναι η ολοκληρωμένη απεικόνιση της κατάστασης των πλήρως βυθισμένων ναυαγίων στην Ελλάδα. Η ανάλυση των δεδομένων αποσκοπεί στην αναγνώριση της περιβαλλοντικής απειλής που προκύπτει από τις εγκλωβισμένες ποσότητες πετρελαίου στα ναυάγια και στην σχετική κατάταξη των ναυαγίων σύμφωνα με το εκτιμώμενο περιβαλλοντικό ρίσκο. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατάστρωση κατάλληλης στρατηγικής ώστε να αντιμετωπιστεί η περιβαλλοντική απειλή από τα ναυάγια. Επιπλέον, η βάση δεδομένων μπορεί να αξιοποιηθεί για την επιλογή και αξιολόγηση πληροφοριών για καινούρια ναυάγια που δεν έχουν ακόμη καταγραφεί.

Οι πληροφορίες που περιέχονται στη βάση δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο που αναπτύχθηκε. Το μοντέλο, που εκτιμά το περιβαλλοντικό ρίσκο

του κάθε ναυαγίου, είναι ένα ασαφές σύστημα με ιεραρχική δομή, η οποία χρησιμοποιήθηκε για την κατάτμηση του συνολικού προβλήματος σε μικρότερα και καλύτερα διαχειρίσιμα υπό-προβλήματα.

Η εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναυάγιο έγινε με την τροφοδότηση των δεδομένων στο μοντέλο. Ακολούθησε η στατιστική και γεωγραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του υπολογιστικού μοντέλου έγινε με την εφαρμογή αυτού σε επιλεγμένες περιπτώσεις, οι οποίες δεν έχουν συμπεριληφθεί στη βάση δεδομένων. Οι περιπτώσεις επιλέχθηκαν από πηγές της διεθνούς βιβλιογραφίας.

Τέλος, εφαρμόστηκε ανάλυση αβεβαιότητας, αφού πρώτα προσδιορίστηκαν οι πηγές αβεβαιότητας για τη συνολική διαδικασία, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση της αβεβαιότητας των μεταβλητών εισόδου στην αβεβαιότητα του τελικού αποτελέσματος.

5.2. Βάση Δεδομένων

Το πρώτο βήμα στον προσδιορισμό του προβλήματος είναι η αναγνώριση της θέσης και του αριθμού των πιθανώς ρυπογόνων ναυαγίων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Για αυτό το σκοπό, πρέπει να κατασκευαστεί μια ειδική βάση δεδομένων. Το πεδίο ενδιαφέροντος της βάσης δεδομένων είναι πλοία που ναυάγησαν και βυθίστηκαν εντός των Ελληνικών χωρικών υδάτων¹, δεν έχουν ανελκυσθεί μέχρι σήμερα, και που περιέχουν εγκλωβισμένες ποσότητες πετρελαίου και πετρελαιοειδών. Τα βασικά κριτήρια για την εισαγωγή των ναυαγίων στη βάση δεδομένων είναι το μέγεθος, το υλικό κατασκευής της γάστρας, και το είδος της προωστήριας εγκατάστασης.

Ειδικότερα, τα πλοία πρέπει να έχουν σημαντικό μέγεθος, μεταλλική γάστρα, και να χρησιμοποιούν υγρό πετρέλαιο ως καύσιμο. Ο όρος «σημαντικό μέγεθος» ορίστηκε σύμφωνα με τα όρια που τέθηκαν στο [46], βάσει της ολικής χωρητικότητας (Gross Tonnage). Σκοπός αυτού του περιορισμού είναι να εξεταστούν μόνο εκείνα τα ναυάγια που παρουσιάζουν σημαντικό ρίσκο πετρελαϊκής ρύπανσης. Επομένως, στη βάση δεδομένων συμπεριλήφθηκαν πετρελαιοφόρα πλοία με ολική χωρητικότητα άνω των 150 ΚΟΧ, και λοιπά πλοία άνω των 400 ΚΟΧ.

Για τις ανάγκες της ανάλυσης, τα ναυάγια κατατάχθηκαν σε δύο κύριες ομάδες. Η πρώτη ομάδα χρησιμοποιεί ως κριτήριο τη λειτουργία/αποστολή του πλοίου και η δεύτερη χρησιμοποιεί ως κριτήριο το είδος του μεταφερόμενου φορτίου. Σύμφωνα λοιπόν με αυτά τα κριτήρια διακρίνουμε τα ναυάγια σε εμπορικά/πολεμικά και πετρελαιοφόρα/μη-πετρελαιοφόρα. Ακολουθούν οι αντίστοιχοι ορισμοί:

Εμπορικά. Είναι τα πλοία αυτά που χρησιμοποιούνται για μεταφορά εμπορευμάτων, πρώτων υλών ή επιβατών.

Πολεμικά. Είναι τα πλοία που έχουν ως κύριο επιχειρησιακό στόχο τους τη διεξαγωγή πολεμικών επιχειρήσεων – σε αυτά δεν περιλαμβάνονται εμπορικά πλοία που επιτάσσονται εν καιρώ πολέμου για μεταφορές προσωπικού ή άλλες αποστολές υποστήριξης.

Πετρελαιοφόρα. Είναι τα πλοία που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά πετρελαίου. Η ομάδα περιλαμβάνει πλοία μεταφοράς αργού πετρελαίου (Crude oil carriers), υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG tankers), υγροποιημένου πετρελαίου (LPG tankers), χημικών (Chemical tankers), ή παραγώγων πετρελαίου (Product carriers).

¹ Τα όρια των Ελληνικών χωρικών υδάτων ορίζονται από τις σχετικές διεθνείς συμβάσεις

Μη-Πετρελαιοφόρα. Είναι τα πλοία που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά οποιουδήποτε άλλου φορτίου εκτός από πετρέλαιο. Για παράδειγμα, πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην (Bulk carriers) ή εμπορευματοκιβωτίων (Container ships).

Για τη συλλογή των χαρακτηριστικών των βυθισμένων ναυαγίων χρησιμοποιήθηκαν διάφορες υπάρχουσες βάσεις δεδομένων. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στον κατάλογο που ακολουθεί:

- (πρώην) Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας,
- Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού,
- The International Registry of Sunken Ships [9],
- οι τίτλοι «Τα Ναυάγια στις Ελληνικές Θάλασσες» [52],
- The Regional Marine Pollution Emergency Response Centre,
- Βάση δεδομένων IHS Fairplay SeaWeb [20],
- Διάφορες πηγές στο διαδίκτυο (βλ. Πιν. 5.1),
- Πληροφορίες για πολεμικά πλοία από το βιβλίο «All the World's Fighting Ships 1947-1995» [23].

Πίνακας 5.1.: Πηγές στο διαδίκτυο

Όνομασία	Ηλεκτρονική διεύθυνση
World War 1 Naval Combat	www.worldwar1.co.uk
World War Two, aviation history, and related topics	www.acepilots.com
Κατάλογος Ανελκυσθέντων Ναυαγίων	www.shipfriends.gr
Τα μεγάλα ναυάγια των Ελληνικών θαλασσών	www.world.gr/forum
Σύλλογος Ερασιτεχνών Αυτοδυτών ΤΗΘΥΣ	www.scubadive.gr/forum
Μεγάλα και άλλα ναυάγια στην Ελλάδα	www.koutouzis.gr/navagia-megala.htm
ΣΚΑΙ: Ιστορικά Ναυάγια	www.skai.gr
The Abyss (Καταδυτικός Σύλλογος)	www.theabyss.gr
Wreck Site	www.wrecksite.eu
Wikipedia	www.wikipedia.org
Comando Supremo - Italy At War	www.comandosupremo.com
Schiffswrackliste	www.schiffswrackliste.de
U-Boat.net	www.uboa.net

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των πηγών δεδομένων σχετική με το είδος των πλοίων που καταγράφονται σε αυτές, τη χρονική περίοδο που καλύπτουν, τις πληροφορίες που καταγράφουν καθώς και το σκοπό για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί.

The International Registry of Sunken Ships. Αυτή η βάση δεδομένων καταγράφει 115,684 ναυάγια και στόχος της είναι η ευρεία χρήση από ιστορικούς και ερευνητικούς έως και γενεαλογικούς σκοπούς,

«Τα Ναυάγια στις Ελληνικές Θάλασσες». Οι τίτλοι περιλαμβάνουν ελληνικά και ξένα πλοία που για οποιοδήποτε λόγο χάθηκαν στις ελληνικές θάλασσες κατά τη χρονική περίοδο 1900 - 2000. Σε αυτή τη βάση δεδομένων καταγράφονται τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε πλοίου όσο και οι λεπτομέρειες του ατυχήματος,

REMPEC. Αυτή η βάση δεδομένων καταρτίστηκε ως συνεισφορά στην εφαρμογή του “Πρωτοκόλλου που σχετίζεται με την Συνεργασία στην Πρόληψη της ρύπανσης από Πλοία και, σε Έκτακτες Περιπτώσεις, την Καταπολέμηση της Ρύπανσης στη Μεσόγειο Θάλασσα” (Protocol concerning Cooperation in Prevention pollution from Ships and, in Case of Emergency, Combating Pollution of the Mediterranean Sea). Στόχος της βάσης δεδομένων είναι η ακριβέστερη αναγνώριση του ρίσκου ατυχηματικής ρύπανσης και επομένως την διευκόλυνση της λήψης κατάλληλων μέτρων για την ετοιμότητα και αντιμετώπιση τόσο σε εθνικό όσο και σε τοπικό επίπεδο. Μερικά από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τη βάση δεδομένων για τη συμμετοχή ενός ατυχήματος σε αυτήν: το ατύχημα να έχει γίνει στη Μεσόγειο Θάλασσα όπως αυτή ορίζεται από τη σύμβαση της Βαρκελώνης, να έχει προκύψει από το ατύχημα διαρροή πετρελαίου, επικίνδυνων και τοξικών ουσιών (hazardous and noxious substance) ή απώλεια ή βλάβη σε εμπορευματοκιβώτιο που περιέχει επικίνδυνες και τοξικές ουσίες, περιλαμβάνει όλα τα ατυχήματα από τα οποία προέκυψε βύθιση πλοίου που έφερε οποιαδήποτε ποσότητα πετρελαίου ως καύσιμο κ.α.,

IHS Fairplay SeaWeb. Περιέχει πληροφορίες για περισσότερα από 179,000 πλοία με χωρητικότητα μεγαλύτερη των 100 GT και καταγράφονται απώλειες πλοίων για τα τελευταία 30 χρόνια.

Η κατάρτιση μιας βάσης δεδομένων από ένα μεγάλο αριθμό πηγών είναι απαραίτητη για την εκπλήρωση των στόχων που έχουν τεθεί, όμως παρουσιάζει κάποια προβλήματα.

Η διασταύρωση των δεδομένων μεταξύ των διάφορων πηγών είναι πολύ σημαντική για την ανάπτυξη της βάσης δεδομένων και επιδρά άμεσα στην ποιότητα της οποιασδήποτε ανάλυσης που βασίζεται σε αυτήν. Η έλλειψη τυποποίησης στην καταγραφή των ναυτικών ατυχημάτων δυσχεραίνει αυτή τη διαδικασία. Επομένως είναι δυνατό να παρατηρούνται ασυμφωνίες ανάμεσα στις πηγές, π.χ., στην καταγραφή του μεγέθους του πλοίου (μήκος, μεταφορική ικανότητα, ολική ή καθαρή χωρητικότητα), της θέσης βύθισης ή ακόμα και στην ονομασία του πλοίου². Σε πολλές περιπτώσεις εντοπίστηκαν μεγάλες διαφορές στην καταγραφή του στίγματος της βύθισης του πλοίου, το οποίο ανάλογα με την πηγή μπορεί να έχει καταγραφεί είτε ως ολόκληρη περιοχή χωρίς ακριβές στίγμα, ή ως περιγραφή της θέσης με αναφορά κοντινά τοπωνύμια, ή ως στίγμα στο κέντρο της περιοχής όπου το πλοίο βυθίστηκε ή τέλος με ακριβείς γεωγραφικές συντεταγμένες. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος για τον οποίο σε πολλές περιπτώσεις το στίγμα του ναυαγίου δεν καταγράφεται με ακρίβεια είναι να αποτραπούν οι προσπάθειες ανεύρεσης αυτού³. Επιπλέον των ασυμφω-

² Στην περίπτωση που αυτό έχει αλλάξει ονομασία κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του.

³ Σε περιπτώσεις ναυαγίων πολεμικών πλοίων για λόγους ασφαλείας ή ιστορικών ναυαγίων για αποτροπή της αρχαιοκαπηλίας.

νιών ανάμεσα στις διάφορες πηγές, πρόβλημα συνιστά και το γεγονός ότι βάσεις δεδομένων που έχουν αναπτυχθεί για την εκπλήρωση διαφορετικών στόχων ακολουθούν διαφορετικές τυποποιήσεις στην καταγραφή των πληροφοριών ή δίνουν έμφαση σε συγκεκριμένες πληροφορίες εις βάρος κάποιων άλλων. Για παράδειγμα, μια βάση δεδομένων των ναυαγίων του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου με στόχο την ιστορική καταγραφή πιθανότατα δίνει μεγαλύτερη έμφαση στις λεπτομέρειες της βύθισης και αγνοεί π.χ., τις ποσότητες πετρελαίου που έφερε το πλοίο κατά τη βύθισή του.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αυτά τα προβλήματα αντιμετωπίστηκαν μέσω της εφαρμογής κατάλληλων κανόνων για την εισαγωγή των δεδομένων. Οι διάφορες πηγές αξιολογήθηκαν βάσει της εμπιστοσύνης που υπήρχε για τα δεδομένα που περιέχουν σε σχέση με το σκοπό για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί. Επομένως στις περιπτώσεις όπου υπήρχαν ασυμφωνίες μεταξύ των διαφορετικών βάσεων δεδομένων, προτιμήθηκαν τα δεδομένα της πηγής στην οποία υπήρχε μεγαλύτερη εμπιστοσύνη για τη συγκεκριμένη ομάδα πληροφοριών. Στον Πιν. 5.2 αναγράφονται οι ομάδες πληροφοριών που προτιμήθηκαν από κάθε πηγή.

Για περιπτώσεις όπου υπήρχαν μικρές αποκλίσεις, ιδιαίτερα για αριθμητικές τιμές, μεταξύ των διαφορετικών πηγών τότε η πληροφορία που εισήχθη στη βάση δεδομένων ήταν αυτή που εμφανιζόταν στις περισσότερες πηγές (κανόνας της πλειοψηφίας).

Για τις συντεταγμένες της θέσης βύθισης του κάθε πλοίου χρησιμοποιήθηκαν τα ακριβή στίγματα, όπου αυτά ήταν διαθέσιμα, ενώ στις περιπτώσεις όπου υπήρχαν περιγραφές της θέσης βύθισης οι συντεταγμένες προσδιορίστηκαν βάσει αυτών, προσεγγιστικά από χάρτη. Για τις περιπτώσεις όπου καταγραφόταν μόνο η ευρύτερη περιοχή όπου θεωρείται ότι βυθίστηκε το πλοίο, εισήχθησαν στη βάση δεδομένων οι συντεταγμένες του κέντρου αυτής της περιοχής.

Για τα δεδομένα που εξαρτώνται άμεσα από το στίγμα του ναυαγίου ακολουθήθηκε η ακόλουθη στρατηγική. Για όποιες περιπτώσεις δεν υπήρχε καταγραφή του βάθους, προσδιορίστηκε προσεγγιστικά από χάρτη βάσει του καταγεγραμμένου στίγματος. Για όποιες περιπτώσεις δεν υπήρχε καταγραφή της απόστασης του ναυαγίου από την ακτή, αλλά ήταν διαθέσιμη η πληροφορία του στίγματος, προσδιορίστηκε προσεγγιστικά από χάρτη.

Πίνακας 5.2.: Προτιμώμενες ομάδες πληροφοριών ανάλογα με την πηγή

Βάση Δεδομένων	Ομάδα πληροφοριών
SeaWeb	χαρακτηριστικά πλοίων
Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού, (πρώην) Υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας	στίγμα ναυαγίου
«Τα ναυάγια στις Ελληνικές θάλασσες»	είδος πλοίου, μεταφερόμενο φορτίο
REMPEC	ποσότητες πετρελαίου κατά τη βύθιση

Άλλος ένας παράγοντας που επιδρά στην ποιότητα της τελικής βάσης δεδομένων είναι ο βαθμός της αβεβαιότητας που συνοδεύει τις καταγεγραμμένες πληροφορίες. Η αβεβαιότητα των πληροφοριών εξαρτάται από την αξιοπιστία και την πληρότητά τους. Οι πληροφορίες που προκύπτουν από μαρτυρίες που ακολουθούν το ατύχημα είναι πολύ συχνά αναξιόπιστες. Σε πολλές περιπτώσεις ναυτικών ατυχημάτων που καταλήγουν σε βύθιση του πλοίου, τα

έγγραφα του πλοίου⁴ συνήθως καταστρέφονται, οπότε οι πληροφορίες δεν είναι πλήρεις.

Ένα πρόσθετο κριτήριο εισαγωγής, που χρησιμοποιήθηκε κατά τη φάση της συλλογής των πληροφοριών, ήταν ο ελάχιστος αριθμός καταγεγραμμένων πληροφοριών. Οι ελάχιστες πληροφορίες που απαιτούνταν είναι οι ακόλουθες: (1) ονομασία πλοίου, (2) χρονολογία βύθισης, (3) γεωγραφικός χώρος ή στίγμα σημείου βύθισης και (4) κάποιο μέτρο του μεγέθους του πλοίου⁵. Οι περιπτώσεις που δεν πληρούσαν αυτό το κριτήριο αποκλείστηκαν από τη βάση δεδομένων και σημάνθηκαν ως «άγνωστα ναυάγια».

Τέλος είναι σημαντικό να αναφερθούν δύο ακόμη παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της τελικής βάσης δεδομένων. Ο πρώτος είναι η επιβεβαίωση της ύπαρξης των ναυαγίων στη θέση που καταγράφεται. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης, η επιβεβαίωση των στοιχείων έγινε στο μέτρο του δυνατού χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες πηγές. Ο δεύτερος παράγοντας αφορά το ακόλουθο χαρακτηριστικό των πηγών βάσεων δεδομένων: από το σύνολο των ατυχημάτων που συμβαίνουν στην πραγματικότητα καταγράφεται στις βάσεις δεδομένων μόνο ένα ποσοστό αυτού (under-reporting of accidents). Στην εργασία [57] έχουν γίνει εκτιμήσεις της απόδοσης αναφοράς (reporting performance) για τις βάσεις δεδομένων Lloyd's Register Fairplay (LRFP) και Norwegian Maritime Directorate (NMD), σύμφωνα με τις οποίες τα άνω όρια της απόδοσης για την LRFP είναι 41% και για την NMD 30%. Αυτό σημαίνει ότι από το σύνολο των ατυχημάτων που συμβαίνουν στην πραγματικότητα, στην καλύτερη των περιπτώσεων, στην NMD καταγράφεται το 1 από τα 3 και στην LRFP τα 2 από τα 5. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την ποιότητα των δεδομένων που συλλέγονται στο πλαίσιο των ναυτικών ατυχημάτων.

Οι ακόλουθες κατηγορίες πλοίων αποκλείστηκαν από τη βάση δεδομένων:

1. Πλοία που έχουν βυθιστεί πριν το 1940⁶.
2. Πετρελαιοφόρα πλοία με ολική χωρητικότητα μικρότερη των 150 KOX.
3. Μη πετρελαιοφόρα πλοία με ολική χωρητικότητα μικρότερη των 400 KOX.
4. Πλοία με μη μεταλλική γάστρα.
5. Ναυάγια για τα οποία υπάρχει η πληροφορία ότι έχουν ανελκυσθεί ή βρίσκονται στον βυθό αλλά έχουν γίνει ικανές εργασίες απορρύπανσης, απομάκρυνσης των επικίνδυνων υλικών.
6. Ναυάγια για τα οποία δεν είναι διαθέσιμος ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός πληροφοριών.
7. Προσαραγμένα ή ήμι-βυθισμένα ναυάγια.
8. Ναυάγια σε προβλήτες λιμανιών.
9. Πλωτοί γερανοί/εκσκαφείς.
10. Φορτηγίδες.

⁴ Τα έγγραφα που φέρει ένα πλοίο περιέχουν σημαντικές πληροφορίες όπως το είδος και η ποσότητα του μεταφερόμενου φορτίου και των καυσίμων κατά τη στιγμή της βύθισης.

⁵ Τα μέτρα του μεγέθους του πλοίου που χρησιμοποιήθηκαν είναι το μήκος, η μεταφορική ικανότητα (DWT), η ολική ή καθαρή χωρητικότητα, και το βάρος τους εκτοπίσματος.

⁶ Στα ναυάγια που βυθίστηκαν πριν το 1940 και καταγράφονται στις πηγές περιλαμβάνονται: αρχαία ιστορικά ναυάγια, πλοία που βυθίστηκαν τη χρονική περίοδο από το 17ο μέχρι τον 20ο αιώνα και περιλαμβάνουν κυρίως ξύλινα ιστιοφόρα σκάφη, απώλειες κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου και περιλαμβάνουν κυρίως ατμόπλοια που χρησιμοποιούσαν κάρβουνο ως καύσιμο, και τέλος ιστιοπλοϊκά και αλιευτικά σκάφη.

Οι προωσθήριες εγκαταστάσεις με DIESEL μηχανές χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά σε πλοία το 1903 [80]. Στη διάρκεια όμως του πρώτου μισού του 20ου αιώνα η χρήση τους δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη στη ναυτιλία. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε το έτος 1940, που επίσης σηματοδοτεί την έναρξη του Β' Παγκοσμίου Πολέμου⁷ για την χρονική έναρξη των καταγραφών στη βάση δεδομένων. Μέχρι εκείνη την περίοδο τα περισσότερα εμπορικά πλοία που βρίσκονταν σε λειτουργία χρησιμοποιούσαν παλινδρομικές ατμομηχανές με καύσιμο κάρβουνο, ξύλο ή σε μερικές περιπτώσεις υγρό πετρέλαιο. Επομένως η υπόθεση που γίνεται εδώ είναι ότι αυτά τα πλοία είτε δεν έφεραν καθόλου ή έφεραν σχετικά μικρές ποσότητες πετρελαίου. Στη βάση δεδομένων έχουν συμπεριληφθεί πλοία που χρησιμοποιούσαν παλινδρομικές ατμομηχανές με καύσιμο υγρό πετρέλαιο στην προωσθήρια εγκατάστασή τους.

Τα πλοία που χρησιμοποιούν το ξύλο ως κύριο υλικό κατασκευής της γάστρας είναι είτε ιστορικά ναυάγια, τα οποία παρουσιάζουν αρχαιολογικό και άλλο ενδιαφέρον, ή μικρότερα επαγγελματικά σκάφη, ή σκάφη αναψυχής. Αντίστοιχη είναι και η προσέγγιση για σκάφη που χρησιμοποιούν συνθετικά υλικά ως κύριο δομικό υλικό τους. Αυτές οι κατηγορίες πλοίων δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης για αυτή την εργασία.

Στις πηγαίες βάσεις δεδομένων υπήρχαν πολλές καταγραφές ναυαγίων κοντά σε προβλήτες λιμανιών, οι περισσότερες από τις οποίες αφορούν απώλειες κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Η υπόθεση που γίνεται για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης είναι ότι αυτά τα ναυάγια θα έχουν πλέον απομακρυνθεί καθότι αποτελούν στις περισσότερες των περιπτώσεων εμπόδια στη ναυσιπλοία.

Τέλος οι καταγραφές που αφορούν πλωτούς γεραμούς ή εκσκαφείς και φορτηγίδες δεν συμπεριλήφθηκαν στη βάση δεδομένων καθότι δεν αποτελούν αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας.

Δομή

Η βάση δεδομένων δομήθηκε με γνώμονα τη συλλογή, όσο το δυνατόν, περισσότερων πληροφοριών ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η κατάσταση του ναυαγίου. Τα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν από τη βάση δεδομένων είναι τα ακόλουθα: πότε έγινε το ναυάγιο, πού έγινε το ναυάγιο, ποιο ήταν το όνομα του πλοίου της στιγμή της βύθισης, ποια είναι τα χαρακτηριστικά του πλοίου, πού οφείλεται το ατύχημα που κατέληξε στη βύθιση του πλοίου, ποιες ενέργειες έγιναν μετά το ατύχημα, και σε τι κατάσταση βρίσκεται το πλοίο στο βυθό.

Οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν ταξινομούνται επομένως στις ακόλουθες κύριες κατηγορίες: (1) *ημερομηνία βύθισης*, (2) *χαρακτηριστικά πλοίου* (π.χ. τύπος, μέγεθος πλοίου, διαστάσεις, είδος και ποσότητα μεταφερόμενου φορτίου), (3) *τοποθεσία ναυαγίου* (γεωγραφικές συντεταγμένες, περιοχή, βάθος), (4) *στοιχεία για το ατύχημα* (είδος, βασική αιτία βύθισης, καιρικές συνθήκες κλπ.), (5) *κατάσταση ναυαγίου στον βυθό* (ακέραια ή σπασμένη σε τμήματα γάστρα, πλευρά έδρασης στον βυθό κλπ.), και (6) *λεπτομέρειες για επιχειρήσεις απορρύπανσης ή εξουδετέρωσης του ναυαγίου*⁸ και πληροφορίες για διαρροές που έχουν ήδη παρατηρηθεί στο εκάστοτε ναυάγιο.

⁷ Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου βυθίστηκε μεγάλος αριθμός πλοίων παγκοσμίως.

⁸ Η διαδικασία της εξουδετέρωσης ενός ναυαγίου αναφέρεται στην απομάκρυνση από αυτό των επικίνδυνων ουσιών, όπως είναι τα πετρελαιοειδή που απαντώνται με συνδυασμό διαφόρων τεχνικών και μεθόδων.

Πίνακας 5.3.: Πεδία πληροφοριών βάσης δεδομένων

Όνομα πεδίου	Μονάδα μέτρησης	Περιγραφή
Έτος	-	Το έτος κατά το οποίο βυθίστηκε το πλοίο.
Ημέρα	-	Ημέρα του μήνα κατά την οποία βυθίστηκε το πλοίο.
Μήνας	-	Μήνας κατά τον οποίο βυθίστηκε το πλοίο.
Όνομα πλοίου	-	Ονομασία πλοίου κατά τη στιγμή της βύθισης.
Τύπος πλοίου	-	Ταξινόμηση των πλοίων με κριτήριο την εμπορική ή επιχειρησιακή λειτουργία.
Τύπος προωστήριας εγκατάστασης	-	Είδος της κατασκευής της κύριας μηχανής.
Αριθμός κύριων μηχανών	-	Αριθμός των κύριων μηχανών. Σημειώνονται οι περιπτώσεις προωστηρίων εγκαταστάσεων με περισσότερες από μία κύρια μηχανή.
Ισχύς προωστήριας εγκατάστασης	[HP]	Συνολική ισχύς της προωστήριας εγκατάστασης.
Κατηγορία πλοίου	-	Ταξινόμηση των πλοίων με κριτήριο το είδος του μεταφερόμενου φορτίου.
Λειτουργία πλοίου	-	Ταξινόμηση των πλοίων με κριτήριο τη λειτουργία.
Τύπος γάστρας	-	Δείκτης για τη χρήση απλών ή διπλών τοιχωμάτων στη γάστρα.
Κλάση πλοίου	-	Ο νηογνώμονας στον οποίο ήταν καταχωρημένο το πλοίο κατά τη στιγμή της βύθισης.
Έτος κατασκευής	-	Έτος κατασκευής του πλοίου.
Ποσότητα καυσίμων	[tons]	Ποσότητα καυσίμων που έφερε το πλοίο κατά τη στιγμή της βύθισης.
Χωρητικότητα καυσίμων	[tons]	Μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα καυσίμων που μπορεί να φέρει το πλοίο.
Χωρητικότητα φορτίου	m^3	Συνολική χωρητικότητα χώρων φορτίου. Αφορά μόνο τα πετρελαιοφόρα πλοία.
Ολική χωρητικότητα	GRT	Ολική χωρητικότητα όπως προκύπτει από τους κανονισμούς καταμέτρησης.
Καθαρή χωρητικότητα	NRT	Καθαρή χωρητικότητα όπως προκύπτει από τους κανονισμούς καταμέτρησης.
Μεταφορική ικανότητα	[tons]	Νεκρό βάρος πλοίου (DWT).
Εκτόπισμα	[tons]	Χρησιμοποιείται κυρίως για τα πολεμικά πλοία ως το συνηθέστερο μέτρο του μεγέθους των πλοίων αυτών.
SOLAS	-	Δείκτης για το εάν το πλοίο πληρεί τις απαιτήσεις SOLAS σε σχέση με το μέγεθος.
Πλάτος	[m]	Καταγεγραμμένο πλάτος πλοίου.

Όνομα πεδίου	Μονάδα μέτρησης	Περιγραφή
Μήκος	[m]	Καταγεγραμμένο μήκος πλοίου.
Σημαία πλοίου	-	Κράτος - σημαία στο οποίο ήταν καταγεγραμμένο το πλοίο κατά τη στιγμή της βύθισης.
Τοποθεσία	-	Τοπωνύμιο της θέσης βύθισης του πλοίου.
Θαλάσσιος χώρος	-	Όνομασία θαλάσσιου χώρου στον οποίο βρίσκεται η θέση βύθισης του πλοίου.
Γεωγραφικό πλάτος	[DMS]	Συντεταγμένες της θέσης βύθισης του πλοίου.
Γεωγραφικό μήκος	[DMS]	Συντεταγμένες της θέσης βύθισης του πλοίου.
Κατάσταση φόρτωσης	-	Δείκτης για την κατάσταση φόρτωσης κατά τη στιγμή της βύθισης.
Φορτίο	-	Είδος μεταφερόμενου φορτίου κατά τη στιγμή της βύθισης.
Ποσότητα φορτίου	-	Ποσότητα μεταφερόμενου φορτίου κατά τη στιγμή της βύθισης.
Μονάδα μέτρησης φορτίου	-	Μονάδα μέτρησης μεταφερόμενου φορτίου κατά τη στιγμή της βύθισης. Η μονάδα μέτρησης εξαρτάται από το μεταφερόμενο φορτίο.
Είδος ατυχήματος	-	Ταξινόμηση πλοίου με κριτήριο το είδος του ατυχήματος
Αιτία βύθισης	-	Βασική αιτία (αναφερόμενη) για τη βύθιση του πλοίου.
Λεπτομέρειες βύθισης	-	Περιγραφή των συνθηκών υπό τις οποίες βυθίστηκε το πλοίο.
Βάθος	[m]	Βάθος (αναφερόμενο) στο οποίο βρίσκεται το ναυάγιο.
Απόσταση από την ακτή	[nm]	Οριζόντια απόσταση από την ακτή από το σημείο όπου βρίσκεται το ναυάγιο.
Κατάσταση ναυαγίου	-	Περιγραφή της κατάστασης του ναυαγίου (προσανατολισμός, κατασκευαστική ακεραιότητα).

Στη βάση δεδομένων καταγράφονται τα ακόλουθα είδη ατυχημάτων: Απώλεια πολέμου, σύγκρουση, πυρκαγιά/έκρηξη, λόγω καιρικών συνθηκών, προσάραξη, μηχανική βλάβη, κατασκευαστική αστοχία.

Οι τύποι των πλοίων που καταγράφονται είναι: μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier), μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ship), απόθεσης καλωδίων (cable layer), μεταφοράς γενικού φορτίου (general cargo carrier), επιβατηγό (passenger ship), πετρελαιοφόρο (tanker). Τα πολεμικά πλοία ταξινομούνται στις κατηγορίες: θωρηκτό (battleship), καταδρομικό (cruiser), αντιτορπιλικό (destroyer), κανονιοφόρος (gun boat), αποβατικό (landing craft), ναρχοθετικό (minelayer), ναρχαλιευτικό (minesweeper), σκάφος περιπολίας (patrol vessel), και υποβρύχιο (submarine).

Οι τύποι των προωστήριων εγκαταστάσεων που καταγράφονται είναι: παλινδρομική ατμομηχανή, ατμοστρόβιλος, Diesel, και Diesel-electric.

5.3. Πιθανή ποσότητα πετρελαίου

Για την εκτίμηση της επικινδυνότητας για το περιβάλλον από μια πιθανή διαρροή πετρελαίου από ένα ναυάγιο, είναι σημαντικός ο προσδιορισμός της ποσότητας του πετρελαίου που έχει εγκλωβιστεί μέσα σε κάθε ένα από αυτά. Η ποσότητα του εγκλωβισμένου πετρελαίου μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας τις ποσότητες που διέρρευσαν από αυτό⁹ και τις ποσότητες που απαντήθηκαν κατόπιν, στα πλαίσια επιχειρήσεων απορρύπανσης και εξουδετέρωσης του ναυαγίου, από τις ποσότητες πετρελαίου που έφερε το πλοίο κατά τη βύθισή του.

Πολλές φορές όμως, η πληροφορία για τις ποσότητες πετρελαίου που έφερε το πλοίο δεν είναι διαθέσιμη οπότε πρέπει να γίνει μια σχετική εκτίμηση – αυτή η εκτίμηση προσδιορίζει το «δυναμικό» της ρύπανσης από μια πιθανή διαρροή πετρελαίου.

Η διαδικασία της εκτίμησης της πιθανής ποσότητας του εγκλωβισμένου πετρελαίου, όπου είναι απαραίτητη, διαθέτει ένα ισχυρό παράγοντα αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα των εκτιμήσεων μοντελοποιείται με τον υπολογισμό ενός διαστήματος εκτίμησης. Τα όρια αυτού του διαστήματος βασίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία¹⁰. Οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ορίων, λαμβάνουν υπόψη την αβεβαιότητα που υπάρχει για την κατάσταση της φόρτωσης, τη φάση του ταξιδιού στην οποία βρισκόταν το πλοίο όταν βυθίστηκε και τις πιθανές διαρροές πετρελαίου κατά τη διάρκεια του ατυχήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τις περιπτώσεις όπου υπήρχαν διαθέσιμα πραγματικά στοιχεία, χρησιμοποιήθηκαν αυτά για τον υπολογισμό της ποσότητας πετρελαίου που πιθανώς βρίσκεται εγκλωβισμένη στο ναυάγιο.

Η εκτίμηση της ποσότητας πετρελαίου που μετέφερε το πλοίο βασίζεται στην εκτίμηση του μέγιστου επιτρεπόμενου βάρους των καυσίμων και στην εκτίμηση του ωφέλιμου φορτίου, για πετρελαιοφόρα πλοία. Η χρήση του μέγιστου βάρους των καυσίμων και του φορτίου οδηγεί σε υπερεκτίμηση των πραγματικών ποσοτήτων. Επειδή υπάρχει έλλειψη επαρκών στοιχείων, τα οποία θα επέτρεπαν μια ακριβέστερη εκτίμηση, η υπερεκτίμηση δεν μπορεί να αποφευχθεί. Με αυτό τον τρόπο όμως εισάγεται ένας συντελεστής ασφαλείας εφόσον γίνεται εκτίμηση της χειρότερης κατάστασης, η οποία είναι το πλοίο να βρισκόταν στην αρχή του κύκλου ταξιδιού του, οπότε θα είχε γεμάτες δεξαμενές καυσίμων, και να είχε γεμάτους τους χώρους φορτίου. Επομένως, η ακόλουθη σχέση ισχύει για την ποσότητα του μεταφερόμενου πετρελαίου κατά τη στιγμή της βύθισης:

$$\text{Μεταφερόμενο πετρέλαιο} = \begin{cases} \text{Καύσιμα,} & \text{μη πετρελαιοφόρα} \\ \text{Καύσιμα} + \text{Φορτίο,} & \text{πετρελαιοφόρα} \end{cases} \quad (5.3.1)$$

Στον Πιν. 5.4 φαίνονται τα ποσοστά της πληρότητας για τα αντίστοιχα πεδία πληροφοριών στη βάση δεδομένων. Έτσι γίνεται σαφής η ανάγκη εκτίμησης για την ποσότητα πετρελαίου που έχει μείνει εγκλωβισμένη στα ναυάγια.

Εκτίμηση βάρους μεταφερόμενου πετρελαίου

Βάρος καυσίμου

Το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος των καυσίμων υπολογίστηκε με τη χρήση ενός λόγου καύσιμα προς DWT. Η τιμή του λόγου προσδιορίστηκε, για κάθε κατηγορία πλοίου ξεχωριστά, μέσω στατιστικής ανάλυσης δεδομένων που αφορούν το βάρος των καυσίμων και τη μεταφορική ικανότητα (DWT). Για τον υπολογισμό των καυσίμων της κάθε περίπτωσης

⁹ Οι ποσότητες που διέρρευσαν από το ναυάγιο αναφέρονται σε αυτές που οφείλονται στις βλάβες που υπέστη το πλοίο κατά το ατύχημα στο οποίο ενεπλάκη.

¹⁰ Συγκεκριμένα, τα όρια του διαστήματος εκτίμησης βασίζονται στην ερευνητική εργασία [46], στην οποία γίνεται στατιστική ανάλυση ναυτικών ατυχημάτων κατά τα οποία υπήρχε διαρροή πετρελαίου.

Πίνακας 5.4.: Ποσοστά πληρότητας

Πεδίο	Πληρότητα [%]
Καύσιμα κατά τη βύθιση	2.7
Μέγιστο βάρος καυσίμων	10.5
Ωφέλιμο φορτίο	0.5
Ολική χωρητικότητα	85.0
Μεταφορική ικανότητα	33.0
Εκτόπισμα	15.0
Μήκος μεταξύ καθέτων	87.0
Φορτίο κατά τη βύθιση	32.0
Ποσότητα πετρελαίου που έχει διαρρεύσει	3.5

πολλαπλασιάστηκε αυτός ο λόγος με το DWT του κάθε πλοίου. Σε μερικές περιπτώσεις η πληροφορία αυτή δεν ήταν διαθέσιμη, οπότε έγινε εκτίμηση του DWT μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, στην οποία συσχετίστηκε είτε με την ολική χωρητικότητα (GRT) ή το μήκος μεταξύ καθέτων (LBP)¹¹.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τις στατιστικές αναλύσεις προήλθαν από τη βάση δεδομένων IHS Fairplay SeaWeb. Από το σύνολο των περιπτώσεων της βάσης δεδομένων καταρτίστηκε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα, ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα στατιστικά μεγέθη θα είναι αντιπροσωπευτικά του πληθυσμού. Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν για τη συλλογή των δειγμάτων είναι: η περίοδος κατασκευής, και το μέγεθος¹². Για την περίοδο κατασκευής επιλέχθηκαν ευρείες χρονικές περίοδοι για λόγους απλούστευσης.

Ακολουθεί η στατιστική ανάλυση, κατά κατηγορία πλοίου, για την εξαγωγή του λόγου καυσίμων προς μεταφορική ικανότητα.

Μεταφοράς φορτίου χύδην. Το δείγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από περίπου 2,500 πλοία που έχουν κατασκευαστεί την περίοδο 1950 - 2009. Οι κατηγορίες πλοίων που συμπεριλήφθηκαν είναι οι ακόλουθες: (1) μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier), (2) μεταφοράς φορτίου χύδην, με ίδια μέσα εκφόρτωσης (bulk carrier, self-discharging), (3) μεταφοράς τσιμέντου (cement carrier), (4) μεταφοράς μεταλλευμάτων (ore carrier).

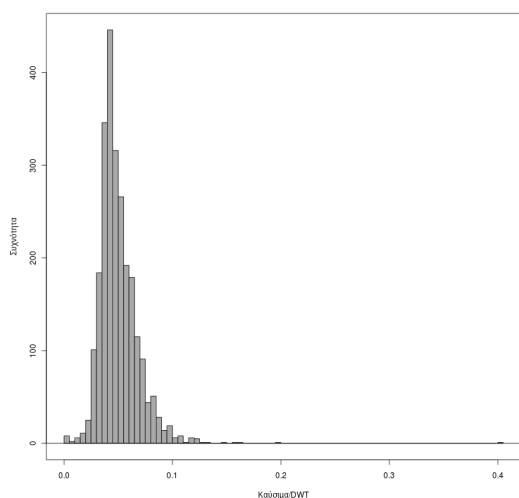
Η ποσοστιαία κατανομή των κατηγοριών στο δείγμα φαίνεται στον Πιν. 5.5. Το εύρος της μεταφορικής ικανότητας και της ολικής χωρητικότητας των πλοίων του δείγματος είναι αντίστοιχα [736, 76, 600] tons και [400, 40, 000] GRT.

Πίνακας 5.5.: Ποσοστιαία κατανομή των πλοίων του δείγματος σε κατηγορίες

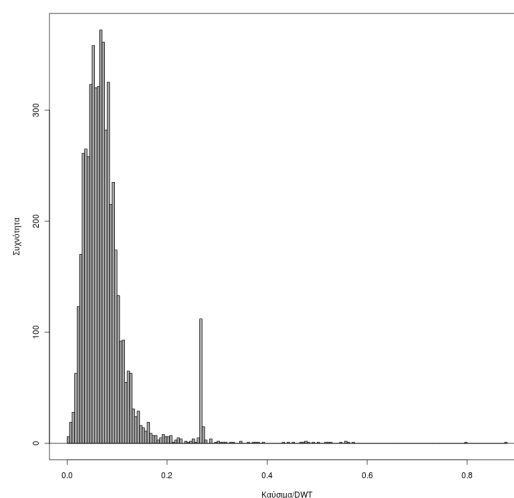
Κατηγορία	Ποσοστό [%]
Μεταφοράς φορτίου χύδην	90
Μεταφοράς φορτίου χύδην, με ίδια μέσα εκφόρτωσης	2
Μεταφοράς τσιμέντου	7
Μεταφοράς μεταλλευμάτων	0.5

¹¹ Η επιλογή της κατάλληλης σχέσης παλινδρόμησης έγινε ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων για την κάθε περίπτωση ναυαγίου.

¹² Το μέγεθος σε αυτή την περίπτωση δίνεται από την ολική χωρητικότητα.



Σχήμα 5.2.: Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην



Σχήμα 5.3.: Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου

Γενικού φορτίου. Το δείγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από περίπου 5,300 πλοία που έχουν κατασκευαστεί την περίοδο 1870 - 2009. Το εύρος της μεταφορικής ικανότητας και της ολικής χωρητικότητας των πλοίων του δείγματος είναι αντίστοιχα [160, 30, 000] tons και [400, 20, 000] GRT.

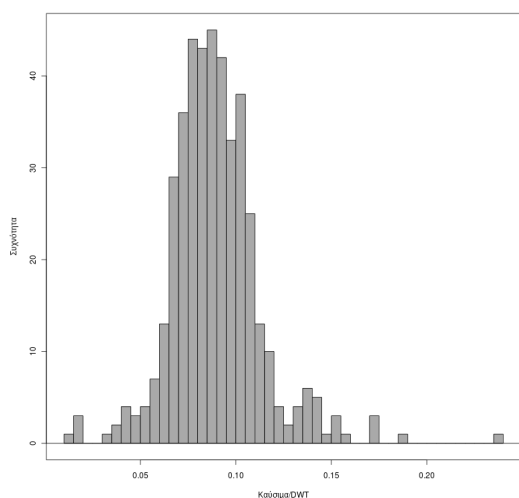
Εμπορευματοκιβωτίων. Το δείγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από περίπου 430 πλοία που έχουν κατασκευαστεί την περίοδο 1970 - 2009. Το εύρος της μεταφορικής ικανότητας και της ολικής χωρητικότητας των πλοίων του δείγματος είναι αντίστοιχα [1, 100, 22, 000] tons και [800, 20, 000] GRT.

Επιβατηγά. Για την κατηγορία των επιβατηγών πλοίων δημιουργήθηκαν δύο δείγματα - το ένα αποτελείται μόνο από επιβατηγά κρουαζιερόπλοια και το δεύτερο από άλλα επιβατηγά. Αυτός ο διαχωρισμός έγινε γιατί τα επιβατηγά κρουαζιερόπλοια, λειτουργώντας σε διαφορετικές επιχειρησιακές συνθήκες από τα συνήθη επιβατηγά, μεταφέρουν συνήθως μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμων.

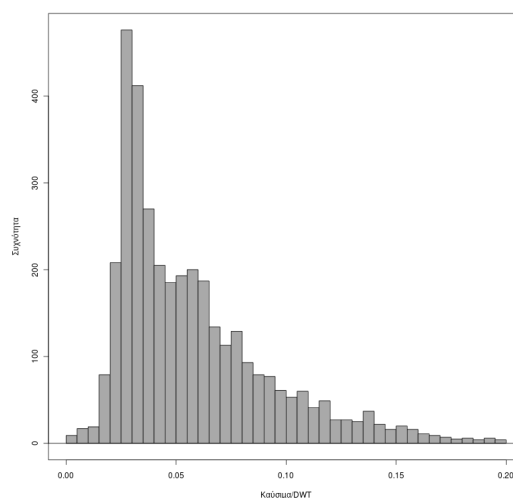
Το δείγμα για τα επιβατηγά κρουαζιερόπλοια αποτελείται από περίπου 120 πλοία που έχουν κατασκευαστεί την περίοδο 1920 - 2009. Το εύρος της μεταφορικής ικανότητας και της ολικής χωρητικότητας των πλοίων του δείγματος είναι αντίστοιχα [100, 16, 000] tons και [400, 40, 000] GRT.

Το δείγμα για τα υπόλοιπα επιβατηγά αποτελείται από περίπου 1,000 πλοία που έχουν κατασκευαστεί την περίοδο 1920 - 2009. Οι κατηγορίες που επιλέχθηκαν είναι: (1) επιβατηγά, (2) γενικού φορτίου/επιβατηγά, (3) επιβατηγά/οχηματαγωγά. Η ποσοστιαία κατανομή τους στο δείγμα φαίνεται στον Πιν. 5.6. Το εύρος της μεταφορικής ικανότητας και της ολικής χωρητικότητας των πλοίων του δείγματος είναι αντίστοιχα [100, 16, 000] tons και [400, 40, 000] GRT.

Απόθεσης καλωδίων. Το δείγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από περίπου 60 πλοία που έχουν κατασκευαστεί την περίοδο 1950 - 2009. Το εύρος της μεταφορικής ικανότητας και



Σχήμα 5.4.: Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων



Σχήμα 5.5.: Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πετρελαιοφόρα

Πίνακας 5.6.: Ποσοστιαία κατανομή των πλοίων του δείγματος σε κατηγορίες

Κατηγορία	Ποσοστό [%]
Επιβατηγά	12.5
Γενικού φορτίου/επιβατηγά	10.5
Επιβατηγά/οχηματαγωγά	77

της ολικής χωρητικότητας των πλοίων του δείγματος είναι αντίστοιχα [150, 10, 000] tons και [190, 15, 000] GRT.

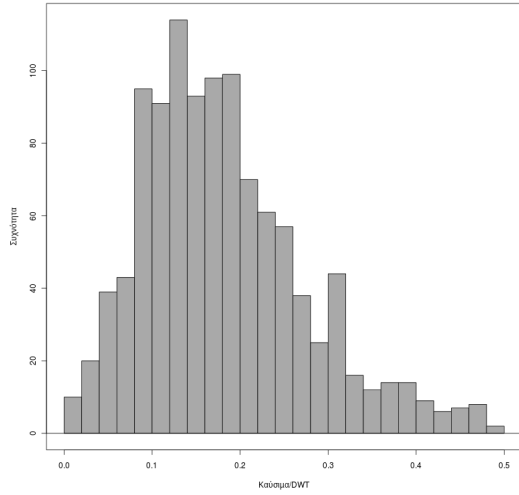
Πετρελαιοφόρα. Το δείγμα που επιλέχθηκε αποτελείται από περίπου 3,600 πλοία που έχουν κατασκευαστεί την περίοδο 1940 - 2009. Οι κατηγορίες που επιλέχθηκαν είναι: (1) Πετρελαιοφόρα, (2) Chemical Tanker, (3) Crude Oil Tanker, (4) LNG Tanker, (5) LPG Tanker, (6) Products Tanker, (7) Shuttle Tanker.

Η ποσοστιαία κατανομή τους στο δείγμα φαίνεται στον Πιν. 5.7. Το εύρος της μεταφορικής ικανότητας και της ολικής χωρητικότητας των πλοίων του δείγματος είναι αντίστοιχα [100, 168, 000] tons και [150, 92, 000] GRT.

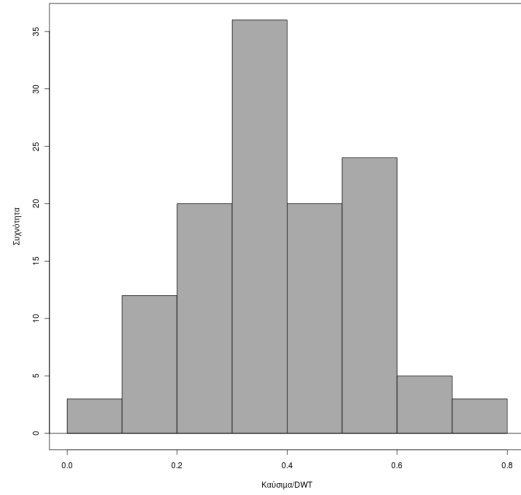
Πολεμικά πλοία. Η βάση δεδομένων IHS Fairplay SeaWeb περιέχει περίπου 600 πολεμικά πλοία τα οποία όμως έχουν κατασκευαστεί σχετικά πρόσφατα - τα περισσότερα μετά το 1980. Επομένως δεν ήταν δυνατή η κατάρτιση αντιπροσωπευτικού δείγματος για αυτή την κατηγορία πλοίων από τη συγκεκριμένη βάση δεδομένων.

Επιπλέον η εκτίμηση της ποσότητας των μεταφερόμενων καυσίμων για τα πολεμικά πλοία είναι δύσκολη γιατί εξαρτάται τόσο από τον τύπο του πλοίου και την ακτίνα ενέργειας του πλοίου, όσο και από τις λεπτομέρειες της αποστολής στην οποία βρισκόταν τη στιγμή που βυθίστηκε καθώς και από τις ακριβείς συνθήκες κάτω από τις οποίες βυθίστηκε.

Για τους λόγους που αναφέρθηκαν, η εκτίμηση του μέγιστου επιτρεπόμενου βάρους καυσίμων βασίστηκε στην υπόθεση ότι μια αντιπροσωπευτική τιμή αυτού του μεγέθους ως

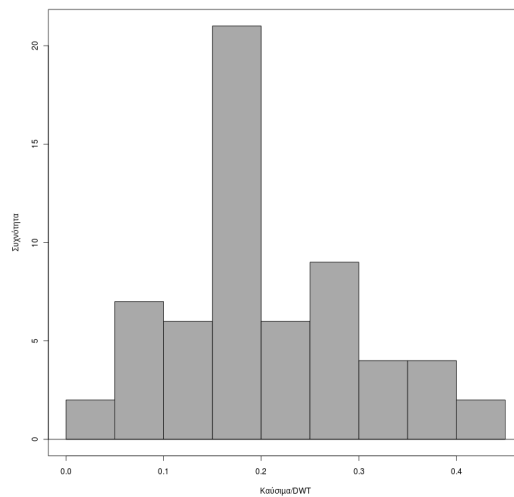


(α') Υπόλοιπα επιβατηγά



(β') Κρουαζιερόπλοια

Σχήμα 5.6.: Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα επιβατηγά πλοία



Σχήμα 5.7.: Ιστόγραμμα συχνοτήτων για τα πλοία απόθεσης καλωδίων

Πίνακας 5.7.: Ποσοστιαία κατανομή των πλοίων του δείγματος σε κατηγορίες

Κατηγορία	Ποσοστό [%]
Πετρελαιοφόρα	11.4
Chemical Tanker	12.2
Crude Oil Tanker	20.5
LNG Tanker	0.06
LPG Tanker	19.4
Products Tanker	35.0
Shuttle Tanker	1.4

ποσοστού του εκτόπισματος του πλοίου είναι 10%. Το εκτόπισμα επιλέχθηκε σε αυτή την περίπτωση ως χαρακτηριστικό του μεγέθους, καθότι χρησιμοποιείται συνηθέστερα ως τέτοιο για τα πολεμικά πλοία.

Στον Πιν. 5.8 δίνονται τα στατιστικά μεγέθη που περιγράφουν το κάθε δείγμα, ενώ στα Σχ. 5.2-5.5 φαίνονται τα ιστογράμματα συχνότητας για το λόγο καύσιμα προς DWT για κάθε δείγμα.

Πίνακας 5.8.: Στατιστικά μεγέθη δειγμάτων

Δείγμα	Μέσος όρος	Τυπική απόκλιση	Διάμεσος	Min.	Max.
Πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην	0.050	0.019	0.046	0.001	0.400
Πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου	0.077	0.056	0.067	0.002	0.880
Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	0.089	0.024	0.087	0.014	0.238
Επιβατηγά κρουαζιερόπλοια	0.384	0.155	0.365	0.019	0.729
Υπόλοιπα επιβατηγά	0.181	0.093	0.167	0.006	0.492
Πλοία απόθεσης καλωδίων	0.205	0.097	0.189	0.013	0.438
Πετρελαιοφόρα	0.055	0.030	0.047	0.001	0.150

Στον Πιν. 5.9 δίνονται τα τελικά ποσοστά για το λόγο καύσιμα προς το μέγεθος του πλοίου που επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας ανάλυσης.

Ο υπολογισμός του βάρους των μεταφερόμενων καυσίμων για κάθε εγγραφή της βάσης δεδομένων έγινε πολλαπλασιάζοντας το λόγο καύσιμα προς το μέγεθος του πλοίου με κάποιο μέτρο του μεγέθους. Τα μέτρα του μεγέθους που χρησιμοποιήθηκαν είναι: (1) για τα εμπορικά πλοία η μεταφορική ικανότητα (DWT), (2) για τα πολεμικά πλοία το εκτόπισμα (Δ).

Ωφέλιμο φορτίο

Το ωφέλιμο φορτίο (Payload) για τα πετρελαιοφόρα πλοία μπορεί να υπολογιστεί αφαιρώντας την εκτιμώμενη ποσότητα καυσίμων και άλλα βάρη από το πρόσθετο βάρος (Deadweight) του κάθε πλοίου. Το πρόσθετο βάρος ενός πλοίου χωρίζεται σε διάφορες ομάδες

Πίνακας 5.9.: Τυπικές τιμές του λόγου καύσιμα προς μέγεθος πλοίου, κατά κατηγορία πλοίου

Κατηγορία πλοίου	Τυπικές τιμές [% DWT]
Πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην	5
Πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου	7
Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	9
Επιβατηγά κρουαζιερόπλοια	38
Υπόλοιπα επιβατηγά	18
Πλοία απόθεσης καλωδίων	20
Πετρελαιοφόρα	5
	Τυπικές τιμές [% Δ]
Πολεμικά πλοία	10

βαρών, σύμφωνα με την Εξ. 5.3.2.

$$DWT = Payload + Fuel + Provisions + Passengers + Crew \quad (5.3.2)$$

Επομένως, το ωφέλιμο φορτίο υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ. 5.3.3.

$$Payload = DWT - (Fuel + Provisions + Passengers + Crew) \quad (5.3.3)$$

Η υπόθεση που γίνεται εδώ είναι ότι το άθροισμα των προμηθειών, των επιβατών, και του πληρώματος ισούται περίπου με το 3% DWT. Η υπόθεση στηρίχθηκε στην εξέταση πραγματικών στοιχείων από έναν αριθμό πλοίων. Επομένως, το ωφέλιμο φορτίο εκτιμάται σύμφωνα με την Εξ. 5.3.4.

$$Payload \simeq 97\% DWT - Fuel \quad (5.3.4)$$

Εκτίμηση πρόσθετου βάρους

Στους Πιν. 5.10 και 5.11 αναγράφονται τα μοντέλα παλινδρόμησης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτίμηση του DWT, όπου αυτό ήταν αναγκαίο, ανάλογα με την κατηγορία του πλοίου. Επιπλέον αναγράφεται το στατιστικό μέγεθος R^2 που είναι ένδειξη της ποιότητας της παλινδρόμησης¹³.

Διάστημα εκτίμησης

Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν στοιχεία για τις ποσότητες πετρελαίου που έφερε το κάθε πλοίο κατά τη στιγμή της βύθισης, οπότε είναι αναγκαίος ο υπολογισμός

¹³ Η ποιότητα της παλινδρόμησης (goodness of fit) είναι τόσο καλύτερη όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι το μέγεθος R^2 .

Πίνακας 5.10.: Σχέσεις παλινδρόμησης κατά κατηγορία πλοίου συναρτήσει ολικής χωρητικότητας

Κατηγορία πλοίου	Μοντέλο παλινδρόμησης	R^2
Bulk Carriers	$DWT = GRT \times 1.617 - 52.575$	0.983
Container	$DWT = GRT \times 1.174 + 1133.624$	0.938
General Cargo	$DWT = GRT \times 1.329 + 258.688$	0.952
Cable Layers	$DWT = 1.045 \times e^{2.197 \times \log_{10} GRT}$	0.858
Passenger	$DWT = GRT^{0.744} + 2.3878$	0.778
Tankers ($\leq 10,000 GRT$)	$DWT = GRT \times 1.508 + 167.759$	0.938
Tankers ($> 10,000 GRT$)	$DWT = GRT \times 1.898 - 3672.513$	0.976

Πίνακας 5.11.: Σχέσεις παλινδρόμησης κατά κατηγορία πλοίου συναρτήσει μήκους μεταξύ καθέτων

Κατηγορία πλοίου	Μοντέλο παλινδρόμησης	R^2
Bulk Carriers	$DWT = 278.789 \times e^{0.028 \times L_{BP}}$	0.944
Container	$DWT = 0.033 \times L_{BP}^{2.623}$	0.942
General Cargo	$DWT = 163.642 \times e^{0.034 \times L_{BP}}$	0.855
Passenger Cruise	$DWT = 0.094 \times L_{BP}^{2.623}$	0.861
Passenger Ro-Ro	$DWT = 74.604 \times e^{0.027 \times L_{BP}}$	0.845
Tankers	$DWT = 0.005 \times L_{BP}^{3.081}$	0.989

εκτιμήσεων. Το πρώτο βήμα της εκτίμησης είναι ο υπολογισμός των μέγιστων ποσοτήτων φορτίου και καυσίμων που έχει τη δυνατότητα να φέρει το κάθε πλοίο. Αυτές οι εκτιμήσεις πρέπει να διορθωθούν για τις ποσότητες καυσίμων που είχαν καταναλωθεί από την αρχή του ταξιδιού έως και τη στιγμή της βύθισης καθώς και για την κατάσταση της φόρτωσης τη στιγμή της βύθισης. Επίσης οι εκτιμήσεις πρέπει να διορθωθούν για τις ποσότητες πετρελαίου που μπορεί να έχουν διαρρεύσει κατά το ατύχημα ή και κατόπιν του ατυχήματος από το ναυάγιο. Οι διορθώσεις βασίζονται σε ορισμένες υποθέσεις που έχουν προκύψει από στατιστική ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο καταλήγουμε στον υπολογισμό ενός διαστήματος εκτίμησης.

Ο υπολογισμός του κάτω ορίου του διαστήματος εκτίμησης βασίζεται στην υπόθεση ότι τα μισά πλοία της βάσης δεδομένων θα είχαν πληρότητα 80%, δηλαδή σχεδόν γεμάτα, και τα υπόλοιπα μισά πλοία 20%, δηλαδή σχεδόν άδεια. Για όλα τα πλοία, είτε κατά τη διάρκεια του ατυχήματος ή κατόπιν αυτού, γίνεται η υπόθεση ότι διέρρευσε ποσότητα πετρελαίου ίση με το 80% της πληρότητας¹⁴. Επομένως στα μισά πλοία θα παραμένει το 16% και στα υπόλοιπα μισά το 4% της αρχικά μεταφερόμενης ποσότητας πετρελαίου. Ο μέσος όρος για όλα τα πλοία είναι το 10% της αρχικά μεταφερόμενης ποσότητας πετρελαίου (Εξ. 5.3.5).

Από την ίδια ανάλυση προκύπτει ότι η περίπτωση να διαρρεύσει το 100% της ποσότητας πετρελαίου είναι απίθανη. Κάποια παραδείγματα πρόσφατων ατυχημάτων πλοίων που οδήγησαν σε διαρροή πετρελαίου επαληθεύει την υπόθεση. Το Erika έχασε το 64% του φορτίου του, το Prestige το 83%, το Yu II No.2 το 78% και το Osung No.3 το 99%. Ο μέσος όρος αυτών είναι διαρροή περίπου 80%.

Ο υπολογισμός του άνω ορίου του διαστήματος εκτίμησης βασίζεται στην υπόθεση ότι τα πλοία έφεραν το 70% του μέγιστου βάρους των καυσίμων και τα πετρελαιοφόρα πλοία θα είχαν πληρότητα στους χώρους φορτίου 80%. Η υπόθεση ισχύει για όλα τα πλοία της

¹⁴ Το ποσοστό διαρροής (80%) προκύπτει από στατιστική ανάλυση που έγινε στην εργασία [46].

βάσης δεδομένων (Σχέση 5.3.6).

$$\text{Κάτω όριο} = \begin{cases} 10\%, & \text{καύσιμα} \\ 10\%, & \text{φορτίο} \end{cases} \quad (5.3.5)$$

$$\text{Άνω όριο} = \begin{cases} 70\%, & \text{καύσιμα} \\ 80\%, & \text{φορτίο} \end{cases} \quad (5.3.6)$$

5.4. Ανάλυση Ρίσκου

Για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής επικινδυνότητας που παρουσιάζει ξεχωριστά κάθε εγγραφή ναυαγίου χρησιμοποιήθηκε μια σειρά κριτηρίων, τα οποία γενικά ομαδοποιούνται σε αυτά που επηρεάζουν την πιθανότητα διαρροής εγκλωβισμένου πετρελαίου από ένα ναυάγιο, και σε αυτά που επηρεάζουν την ένταση των συνεπειών από την προαναφερόμενη διαρροή για τις πιθανά πληττόμενες περιοχές. Ο συνδυασμός των κριτηρίων βασίστηκε στη λογική του παραδοσιακού ρίσκου, σύμφωνα με την οποία το ρίσκο μιας πιθανής ανεπιθύμητης κατάστασης σχετίζεται με την πιθανότητα πραγματοποίησης της κατάστασης και την ένταση των αρνητικών συνεπειών που θα την ακολουθήσουν. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η έννοια της επικινδυνότητας της διαρροής του πετρελαίου σε αντικατάσταση της πιθανότητας διαρροής, καθότι δεν υπήρχαν επαρκή στατιστικά στοιχεία ώστε να υπολογιστούν οι αντίστοιχες πιθανότητες. Η εκτίμηση/υπολογισμός έγινε μέσα από ένα ιεραρχικό σύστημα ασαφούς λογικής που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της ακαδημαϊκής και ερευνητικής προσπάθειας. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε ένα σύνολο κανόνων για τη διασύνδεση των κριτηρίων και την εξαγωγή κατάλληλων συμπερασμάτων. Αυτού του είδους η δομή προτιμήθηκε επειδή μπορεί αφενός να αντιμετωπίσει ασαφή δεδομένα και αφετέρου να συνδυάσει ποιοτικά με ποσοτικά δεδομένα.

Μερικά ενδεικτικά κριτήρια που δύνανται να επηρεάσουν την πιθανότητα της διαρροής πετρελαίου από ναυάγια είναι τα ακόλουθα: ηλικία ναυαγίου, βάθος, έκταση βλαβών από το ατύχημα, είδος θαλάσσιου πυθμένα στο σημείο της βύθισης, πιθανή τοποθεσία του εγκλωβισμένου πετρελαίου μέσα στο ναυάγιο.

Ενδεικτικά, με την ίδια λογική μερικά κριτήρια που θεωρήθηκε ότι επηρεάζουν την ένταση των συνεπειών μετά από πιθανή διαρροή πετρελαίου από ένα ναυάγιο είναι τα ακόλουθα: είδος του φορτίου πετρελαίου, όπου αυτό υπάρχει, πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου, τύπος της κοντινότερης ακτής (π.χ., αμμώδης, βραχώδης κλπ), απόσταση από την κοντινότερη ακτή, απόσταση από την κοντινότερη προστατευόμενη περιοχή NATURA 2000 (αν υπάρχει), κατεύθυνση επιφανειακών ρευμάτων και τοπικά επικρατούντων ανέμων.

Σύμφωνα με τη συστηματική προσέγγιση που ακολουθήθηκε, η πιθανότητα της διαρροής πετρελαίου συνδέεται άμεσα με την ικανότητα της γάστρας του ναυαγίου να συγκρατήσει το εγκλωβισμένο σε αυτήν πετρέλαιο. Η ένταση των συνεπειών σχετίζεται με τη σειρά της με παράγοντες όπως το είδος του εγκλωβισμένου πετρελαίου και η ευπάθεια (ευαισθησία) των πόρων που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή. Οι πόροι κατηγοριοποιούνται σε φυσικούς πόρους όπως είναι οι ακτές, και πόρους οικονομικής σημασίας όπως είναι τα ιχθυοτροφεία ή τουριστικές μονάδες κλπ.

Εφαρμόζοντας το ασαφές σύστημα ιεραρχικής δομής που αναπτύχθηκε, υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση ένας δείκτης, ενδεικτικός του μεγέθους του περιβαλλοντικού ρίσκου. Χρησιμοποιώντας αυτά τα αποτελέσματα υπολογίστηκε η γεωγραφική κατανομή του ρίσκου από τα ναυάγια για την Ελλάδα, ώστε να προσδιοριστούν οι περιοχές αυτές όπου εντοπίζεται ο μεγαλύτερος κίνδυνος για το περιβάλλον από μια πιθανή διαρροή εγκλωβισμένου πετρελαίου.

Κριτήρια Ρίσκου

Τα κριτήρια για την εκτίμηση του ρίσκου που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την εργασία βασίστηκαν στα κριτήρια που θέτει ο IMO στο Άρθρο 6 του Wreck Removal Convention [29] για τον προσδιορισμό ενός ναυαγίου ως επικίνδυνο.

Η εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου για το κάθε ναυάγιο βασίστηκε στον παραδοσιακό ορισμό του ρίσκου. Επομένως ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\text{Περιβαλλοντικό Ρίσκο} = \text{Επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου} \times \text{Ένταση συνεπειών}$$

Η επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου εξαρτάται από την ικανότητα της κατασκευής του ναυαγίου να συγκρατήσει το εγκλωβισμένο πετρέλαιο, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από την κατασκευαστική ακεραιότητα του ναυαγίου. Η κατασκευαστική ακεραιότητα είναι συνάρτηση της αντοχής της γάστρας του ναυαγίου καθώς και των ζημιών που υπέστη κατά το ατύχημα.

Η ένταση των συνεπειών από μια πιθανή διαρροή πετρελαίου από ένα ναυάγιο εξαρτάται από δύο κύριους παράγοντες: (1) το δυναμικό για ρύπανση που εμφανίζει το εγκλωβισμένο πετρέλαιο, και (2) την ευαισθησία των στόχων (οικονομικών, περιβαλλοντικών) που βρίσκονται κοντά στο ναυάγιο.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου κατατάχθηκαν σε αυτές τις βασικές κατηγορίες. Η επιλογή των κριτηρίων έλαβε υπόψη και την διαθεσιμότητα των πληροφοριών στη βάση δεδομένων. Ωστόσο έχουν προστεθεί και άλλα κριτήρια, για τα οποία δεν υπάρχουν κατ' ανάγκη διαθέσιμα στοιχεία, ώστε το μοντέλο να έχει μια ολοκληρωμένη δομή που απεικονίζει με ακρίβεια το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Τα κριτήρια ανάλογα με την παράμετρο που επηρεάζουν αναγράφονται στον Πιν. 5.12.

Τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου μπορούν να καταταχθούν σε ποσοτικά και ποιοτικά. Τα ποσοτικά κριτήρια είναι αυτά που περιγράφονται από μεταβλητές που παίρνουν συνεχείς αριθμητικές τιμές. Τα ποιοτικά κριτήρια είναι αυτά που περιγράφονται από κατηγορικές μεταβλητές. Στον Πιν. 5.13 δίνεται ο κατάλογος των κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση του ρίσκου κατηγοριοποιημένα σε ποσοτικά και ποιοτικά.

Ορισμοί

Η ηλικία του ναυαγίου ορίζεται ως η χρονική διάρκεια από τη βύθιση έως και τη στιγμή οπότε γίνεται η μελέτη.

Η περίοδος λειτουργίας του πλοίου πριν τη βύθιση ορίζεται ως η χρονική διάρκεια από την κατασκευή έως και τη στιγμή της βύθισης αυτού.

Το μέγεθος του πλοίου, για τις ανάγκες της ανάπτυξης του υπολογιστικού μοντέλου, χαρακτηρίζεται από το μήκος του. Αυτό επιλέχθηκε ώστε να υπάρχει ένα ενιαίο μέτρο του μεγέθους για τα διάφορα είδη πλοίων¹⁵ και επειδή η πληρότητα των στοιχείων για το μήκος των εγγραφών της βάσης δεδομένων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα υπόλοιπα μέτρα του μεγέθους που καταγράφονται.

Για την κατάσταση της φόρτωσης του πλοίου κατά τη στιγμή της βύθισης χρησιμοποιούνται δύο καταστάσεις: έμφορτο, και άφορτο. Για τα πετρελαιοφόρα πλοία που έχει καταγραφεί στη βάση δεδομένων ότι έπλεαν σε κατάσταση ερματισμού θεωρούνται έμφορτα.

Η μεταβλητή που περιγράφει τον τύπο του θαλάσσιου πυθμένα στην περιοχή της βύθισης παίρνει τις τιμές: άμμος, λάσπη, βότσαλο, βράχος.

¹⁵ Τα συνήθη μέτρα του μεγέθους ανάλογα με το είδος του πλοίου είναι: η μεταφορική ικανότητα (DWT) για τα φορτηγά, ο ολική χωρητικότητα (GRT) για τα επιβατηγά και το εκτόπισμα (Δ) για τα πολεμικά πλοία.

Πίνακας 5.12.: Κατάταξη κριτηρίων ρίσκου σύμφωνα με την παράμετρο που επηρεάζουν

Επικινδυνότητα Διαρροής Πετρελαίου	Ένταση Συνεπειών
Ηλικία ναυαγίου	Τύπος φορτίου πετρελαίου (μόνο για πετρελαιοφόρα)
Βάθος	Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου φορτίου (μόνο για πετρελαιοφόρα)
Περίοδος λειτουργίας πλοίου πριν τη βύθιση	Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένων καυσίμων
Κατασκευαστικές ενισχύσεις γάστρας	Γαλακτωματοποίηση εγκλωβισμένου πετρελαίου
Τύπος ατυχήματος	Τύπος κοντινότερης ακτής
Κατάσταση φόρτωσης τη στιγμή της βύθισης	Απόσταση από την κοντινότερη ακτή
Μέγεθος πλοίου	Απόσταση από την κοντινότερη προστατευόμενη περιοχή NATURA 2000
Τύπος θαλάσσιου πυθμένα στην περιοχή της βύθισης	Απόσταση από τον κοντινότερο στόχο οικονομικού ενδιαφέροντος
Τύπος γάστρας	Επίδραση τοπικής θαλάσσιας κυκλοφορίας στην κίνηση πετρελαιοκηλίδας
Πιθανή τοποθεσία εγκλωβισμένου πετρελαίου στο ναυάγιο	

Το κριτήριο για την πιθανή τοποθεσία του εγκλωβισμένου πετρελαίου μέσα στο ναυάγιο υποδεικνύει εάν το πετρέλαιο βρίσκεται σε δεξαμενές εντός του ναυαγίου ή κινείται ελεύθερα μέσα σε αυτό (εφόσον αυτή η πληροφορία είναι διαθέσιμη).

Το πετρέλαιο που μεταφέρεται ως φορτίο από πετρελαιοφόρα πλοία διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: «μαύρο», και «άσπρο». Το «μαύρο πετρέλαιο» είναι ένας γενικός όρος που χρησιμοποιείται για να διακρίνει το βαρύ πετρέλαιο από ελαφρότερα κλάσματα («άσπρο πετρέλαιο»). Επίσης το «μαύρο πετρέλαιο» δεν απορροφάται εύκολα από το περιβάλλον, οπότε η αντιμετώπισή του είναι δυσκολότερη [3].

Η κατάταξη των τύπων των ακτών βασίστηκε στην 10-βάθμια κατάταξη του IMO και αποτελείται από τις ακόλουθες κατηγορίες (η ορολογία προήλθε από την αντίστοιχη κατάταξη του Ευρωπαϊκού προγράμματος CORINE): (1) βραχώδης ακτή (rocky coast), (2) αμμώδης ακτή (beach), (3) ανθρωπογενείς κατασκευές (fictitious coast), (4) λασπώδης ακτή (muddy coast), και (5) ακτές με βλάστηση, εχβολές ποταμών, υγράτοποι, βάλτοι (narrow vegetated beaches).

Το κριτήριο για τις κατασκευαστικές ενισχύσεις της γάστρας διαχωρίζει τις περιπτώσεις όπου εκ κατασκευής το πλοίο εξοπλίζεται με πρόσθετες ενισχύσεις της γάστρας για τη λειτουργία σε ιδιαίτερες επιχειρησιακές συνθήκες. Διακρίνονται επομένως οι ακόλουθες κατηγορίες: (1) καμία πρόσθετη ενίσχυση, (2) πολεμικά πλοία, (3) ενισχύσεις για πλεύση σε περιοχές με πάγο, και (4) ενισχύσεις για τη μεταφορά φορτίων μεγάλων βάρους (αφορά συνήθως πλοία μεταφοράς φορτίων χύδην).

Πίνακας 5.13.: Κατάταξη κριτηρίων ρίσκου σε ποσοτικά και ποιοτικά

Ποσοτικά	Ποιοτικά
Ηλικία ναυαγίου	Κατασκευαστικές ενισχύσεις της γάστρας
Βάθος	Τύπος του ατυχήματος
Περίοδος λειτουργίας του πλοίου πριν τη βύθιση	Κατάσταση φόρτωσης τη στιγμή της βύθισης
Μέγεθος πλοίου	Τύπος θαλάσσιου πυθμένα στην περιοχή της βύθισης
Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου	Τύπος της γάστρας
Απόσταση από τους κοντινότερους στόχους (προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000, ακτές, οικονομικοί στόχοι)	Πιθανή τοποθεσία του εγκλωβισμένου πετρελαίου μέσα στο ναυάγιο
	Τύπος φορτίου πετρελαίου (μόνο για πετρελαιοφόρα)
	Εάν το εγκλωβισμένο πετρέλαιο έχει υποστεί γαλακτωματοποίηση
	Τύπος κοντινότερης ακτής
	Επίδραση τοπικής θαλάσσιας κυκλοφορίας στην κατεύθυνση κίνησης μιας πιθανής πετρελαιοκηλίδας από το ναυάγιο

Αρχιτεκτονική Υπολογιστικού Μοντέλου

Τα κριτήρια του ρίσκου που επιλέχθηκαν, συνδυάστηκαν στη δομή ενός μοντέλου ασαφούς λογικής με ιεραρχική δομή. Τα υπολογιστικά μοντέλα αυτού του τύπου βασίζονται σε μια μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων (fuzzy inference engine) καθώς και σε μια βάση κανόνων (fuzzy rule base), η οποία συνδέει τις μεταβλητές εισόδου με τις μεταβλητές εξόδου του συστήματος. Η βάση των κανόνων, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, περιγράφει εμπειρικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και των μεταβλητών εξόδου.

Τα πλεονεκτήματα για τη χρήση ενός συστήματος ασαφούς λογικής είναι ο συνδυασμός μεγάλου αριθμού παραγόντων με μη γραμμικό τρόπο, ο συνδυασμός ποιοτικών και ποσοτικών δεδομένων, και η αντιμετώπιση της ασάφειας και της έλλειψης δεδομένων στη λήψη αποφάσεων.

Το μοντέλο ασαφούς λογικής με ιεραρχική δομή αναπτύχθηκε με το λογισμικό XFUZZY¹⁶, το οποίο αναπτύχθηκε από το Instituto de Microelectronica de Sevilla (Centro Nacional de Microelectronica) και διανέμεται ελεύθερα στο διαδίκτυο υπό την άδεια GNU General Public Licence.

¹⁶ <http://www2.imse-cnm.csic.es/Xfuzzy/>

Χαρακτηριστικά μοντέλου

Η μέθοδος εξαγωγής συμπερασμάτων που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου Mamdani. Οι τελεστές που χρησιμοποιήθηκαν για τις διάφορες πράξεις επεξηγούνται παρακάτω.

Βαθμός ενεργοποίησης κανόνων. Για τη λογική πράξη AND χρησιμοποιήθηκε ο τελεστής γινόμενο (product), ενώ για τη λογική πράξη OR χρησιμοποιήθηκε ο τελεστής μεγιστοποίησης (maximum). Ο τελεστής γινόμενο προτιμήθηκε γιατί βελτιώνει την ευαισθησία του συστήματος, αφού με αυτό τον τρόπο λαμβάνονται υπόψη οι τιμές όλων των μεταβλητών εισόδου, οι οποίες πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους, ώστε να προκύψει ο βαθμός ενεργοποίησης του αντίστοιχου κανόνα στον οποίο αυτές συμμετέχουν.

Συμπέρασμα κανόνα. Για την εξαγωγή του συμπεράσματος κάθε κανόνα (rule implication), σύμφωνα με το βαθμό ενεργοποίησής του και τις ασαφείς εισόδους του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε ο τελεστής ελαχιστοποίησης (minimum).

Συνδυασμός συμπερασμάτων κανόνων. Για το συνδυασμό των συμπερασμάτων όλων των κανόνων (rule aggregation) ώστε να εξαχθεί η τελική ασαφής έξοδος χρησιμοποιήθηκε η λογική πράξη OR οπότε και ο τελεστής μεγιστοποίησης (maximum).

Defuzzification. Για την εξαγωγή μιας αριθμητικής τιμής από την ασαφή έξοδο χρησιμοποιήθηκε ο τελεστής MaxLabel, ο οποίος επιλέχθηκε επειδή λειτουργεί ικανοποιητικά στην περίπτωση που οι ενδιάμεσες μεταβλητές του συστήματος περιγράφονται από συναρτήσεις συμμετοχής singletons. Η εφαρμογή του τελεστή MaxLabel επιλέγει το κοντινότερο ασαφές σύνολο, από αυτά που αποτελούν την ασαφή μεταβλητή εξόδου.

Μεταβλητές

Τα κριτήρια του ρίσκου που επιλέχθηκαν χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές εισόδου στο υπολογιστικό μοντέλο. Για να αξιοποιηθούν οι μεταβλητές εισόδου σε ένα μοντέλο ασαφούς λογικής πρέπει πρώτα να μετατραπούν σε ασαφείς γλωσσικές μεταβλητές (fuzzy linguistic variables). Για να επιτευχθεί αυτό, το διάστημα τιμών της κάθε μεταβλητής χωρίστηκε σε κατάλληλες ομάδες τιμών ανάλογα με το είδος και τη λειτουργία της κάθε μεταβλητής.

Κατηγορικές μεταβλητές εισόδου. Οι ποιτικές μεταβλητές εισόδου μετατράπηκαν σε ασαφείς μεταβλητές που αποτελούνται από ασαφή σύνολα που περιγράφονται από συναρτήσεις συμμετοχής με μορφή singleton.

Μεταβλητές με συνεχείς αριθμητικές τιμές. Το διάστημα τιμών των ποσοτικών μεταβλητών χωρίστηκε σε κατάλληλες, κατά περίπτωση, κατηγορίες που εξυπηρετούν τις ανάγκες της ανάλυσης.

Ενδιάμεσες μεταβλητές. Αυτές αποτελούνται από ασαφή σύνολα με συναρτήσεις συμμετοχής με μορφή singleton και σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να έχουν φυσική σημασία.

Τα όρια των τιμών των μεταβλητών επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να καλυφθούν τόσο αυτές οι περιπτώσεις που περιέχονται όσο και αυτές που δεν περιέχονται στη βάση δεδομένων με ναυάγια που καταρτίστηκε.

Στον Πιν. 5.14 δίνεται ο κατάλογος με τις μεταβλητές εισόδου, το διάστημα τιμών και οι κατηγορίες που ορίστηκαν για την κάθε μια.

Η μεταβλητή «βάθος» εμφανίζεται τρεις φορές. Για την κάθε θέση της μεταβλητής στο υπολογιστικό μοντέλο ορίστηκαν διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής, όπως φαίνεται στα Σχ. 5.9 - 5.11. Ο λόγος για τον οποίο ορίστηκαν διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε περίπτωση είναι ότι από κάθε υποσύστημα, στο οποίο αποτελεί μεταβλητή εισόδου το βάθος, ορίστηκαν διαφορετικοί κανόνες ώστε να εξάγεται διαφορετικό συμπέρασμα. Για παράδειγμα, στην πρώτη περίπτωση που εμφανίζεται η μεταβλητή «βάθος», χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπεράσματος σε σχέση με το ρυθμό της διάβρωσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της έντασης των θαλάσσιων ρευμάτων.

Πίνακας 5.14.: Ορισμός μεταβλητών εισόδου

α/α	Μεταβλητή	Είδος	Διάστημα τιμών	Μον.	Κατηγορίες
1	Βάθος	Αριθμητική	[-1, 6,000]	[m]	Low, Average, High
2	Ηλικία ναυαγίου	Αριθμητική	[-1, 200]	έτη	Recent, Intermediate, Old
3	Βάθος	Αριθμητική	[-1, 6,000]	[m]	Low, High
4	Λειτουργική ζωή πλοίου	Αριθμητική	[-1, 200]	έτη	Short, Intermediate, Extensive
5	Κατασκευαστικές ενισχύσεις γάστρας	Κατηγορική	[-1, 3]	-	None, Heavy Cargoes, Ice, Warship
7	Μέγεθος πλοίου	Αριθμητική	[-1, 300]	[m]	Small, Medium, Large
8	Είδος πυθμένα	Κατηγορική	[-1, 4]	-	Sand, Mud, Gravel, Rock
9	Κατάσταση φόρτωσης	Κατηγορική	[-1, 1]	-	Loaded, Empty
10	Υδροστατική πίεση	Αριθμητική	[-1, 70]	[MPa]	Low, Medium, High
11	Βλάβες από το ατύχημα	Κατηγορική	[-1, 1]	-	Negligible, Minor, Significant, Major, Severe

α/α	Μεταβλητή	Είδος	Διάστημα τιμών	Μον.	Κατηγορίες
6	Βάθος	Αριθμητική	[-1, 6,000]	[m]	Critical, Non-Critical
12	Τύπος γάστρας	Κατηγορική	[-1, 4]	-	Single Hull, Double Bottom, Double Sides, Double Hull
13	Πιθανή τοποθεσία πετρελαίου στο ναυάγιο	Κατηγορική	[-1, 1]	-	Tanks, Dispersed and Tanks
14	Τύπος φορτίου πετρελαίου	Κατηγορική	[-1, 1]	-	White, Black
15	Πιθανή εγκλωβισμένη ποσότητα φορτίου	Αριθμητική	[-1, 100,000]	[tons]	None, Small, Intermediate, Large
16	Πιθανή εγκλωβισμένη ποσότητα καυσίμων	Αριθμητική	[-1, 100,000]	[tons]	None, Small, Intermediate, Large
17	Γαλακτωματοποίηση πετρελαίου	Κατηγορική	[-1, 1]	-	YES, NO
18	Απόσταση από την κοντινότερη ακτή	Αριθμητική	[-1, 150]	[nm]	Shore, Nearshore, Offshore
19	Τοπική θαλάσσια κυκλοφορία (Ακτή)	Κατηγορική	[-1, 1]	-	Toward, Away
20	Είδος ακτής	Κατηγορική	[-1, 5]	-	Rocky Coast, Beach, Fictitious Coast, Muddy Coast, Narrow Vegetated Beach
21	Απόσταση από την κοντινότερη περιοχή Natura 2000	Αριθμητική	[-1, 120]	[nm]	Within, Small, Intermediate, Large
22	Τοπική θαλάσσια κυκλοφορία (Natura 2000)	Κατηγορική	[-1, 1]	-	Toward, Away
23	Απόσταση από τον κοντινότερο στόχο οικονομικού ενδιαφέροντος	Αριθμητική	[-1, 150]	[nm]	Small, Intermediate, Large

α/α	Μεταβλητή	Είδος	Διάστημα τιμών	Μον.	Κατηγορίες
6	Βάθος	Αριθμητική	[-1, 6,000]	[m]	Critical, Non-Critical
24	Τοπική θαλάσσια κυκλοφορία (Οικονομικός στόχος)	Κατηγορική	[-1, 1]	-	Toward, Away

Συναρτήσεις συμμετοχής

Οι συναρτήσεις συμμετοχής αποτελούνται από τα ακόλουθα δομικά στοιχεία: σχήμα, φορέας, πυρήνας, όριο, μέγιστη τιμή και υπερκάλυψη μεταξύ γειτονικών κατηγοριών (βλ. Ενότητα 3.3). Ο σχεδιασμός των συναρτήσεων συμμετοχής για τις μεταβλητές του υπολογιστικού μοντέλου ακολούθησε μια διαισθητική προσέγγιση - λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε μεταβλητής, τη γνώση του πεδίου και προσαρμόζοντάς τα χαρακτηριστικά τους με τρόπο ώστε να αντιστοιχούν στα διαθέσιμα δεδομένα. Γενικότερα, ο σχεδιασμός συναρτήσεων συμμετοχής είναι μια διαδικασία με έντονο υποκειμενικό χαρακτήρα.

Οι μορφές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των συναρτήσεων συμμετοχής είναι singletons, τριγωνικές, και τραπεζοειδείς, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως στα συστήματα ασαφούς λογικής. Οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής χρησιμοποιήθηκαν σε περιπτώσεις όπου ο μέγιστος βαθμός συμμετοχής εμφανίζεται σε μια μοναδική τιμή, επομένως όταν ένα ασαφές σύνολο έχει μια χαρακτηριστική τιμή. Αντίθετα οι τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής χρησιμοποιήθηκαν σε περιπτώσεις όπου ο μέγιστος βαθμός συμμετοχής εμφανίζεται σε ένα εύρος τιμών¹⁷, επομένως όταν ένα ασαφές σύνολο έχει πολλές χαρακτηριστικές τιμές.

Ο φορέας των συναρτήσεων συμμετοχής προκύπτει από το αντίστοιχο διάστημα τιμών. Επομένως, τα όρια του φορέα ορίστηκαν με βάση τις ακραίες τιμές των μεταβλητών, όπως αυτές εμφανίζονται στη βάση δεδομένων, καθώς και στην απαίτηση ότι θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα διαχείρισης περιπτώσεων που δεν έχουν καταγραφεί σε αυτή.

Ο προσδιορισμός της υπερκάλυψης μεταξύ των διαφορετικών ασαφών συνόλων (κατηγορίες μεταβλητής) έγινε με την ικανοποίηση της απαίτησης για την ανάλυση της μονάδας σε κάθε σημείο του διαστήματος τιμών της μεταβλητής. Αυτό σημαίνει ότι για παράδειγμα, ένα πλοίο 75 m είναι κατά 50% μικρό και κατά 50% μεσαίου μεγέθους ή μια ποσότητα 180 ton πετρελαίου είναι κατά 20% μικρή και κατά 80% μεσαία. Η υπόθεση που υπάρχει πίσω από αυτή την απαίτηση είναι ότι οι κατηγορίες που έχουν επιλεγεί για τις μεταβλητές του μοντέλου καταλαμβάνουν ολόκληρο το πεδίο ορισμού αυτών.

Στα Σχ. 5.8 - 5.18 φαίνονται οι συναρτήσεις συμμετοχής για τις ποσοτικές μεταβλητές εισόδου. Οι κατηγορικές μεταβλητές εισόδου που περιγράφονται από συναρτήσεις συμμετοχής singletons δεν απεικονίζονται σε αντίστοιχα σχήματα.

Η μεταβλητή «Βάθος», όπως χρησιμοποιείται στο τμήμα του μοντέλου που αφορά την έκταση της διάβρωσης, έχει χωριστεί σε τρεις κατηγορίες (Σχ. 5.11): low, average, high, ώστε να αντανακλάται η μεταβολή των ιδιοτήτων του θαλασσινού νερού σε συνάρτηση με το βάθος και η επίδραση που έχει στον ρυθμό της διάβρωσης. Διαφορετικές συναρτήσεις ορίστηκαν για τη μεταβλητή «Βάθος» όταν αυτή χρησιμοποιείται είτε στο τμήμα του μοντέλου που αφορά τα θαλάσσια ρεύματα (Σχ. 5.10) ή σε αυτό για την κατάρρευση των δεξαμενών (Σχ. 5.9). Επίσης, η μεταβλητή «Υδροστατική πίεση» έχει χωριστεί σε τρεις

¹⁷ Αυτό σημαίνει ότι ο πυρήνας της συνάρτησης συμμετοχής είναι μη μηδενικός

κατηγορίες (Σχ. 5.15) που αντιστοιχούν στις κατηγορίες της μεταβλητής «Βάθος», όπως αυτή χρησιμοποιείται για την έκταση της διάβρωσης.

Η διαμόρφωση της συνάρτησης συμμετοχής των μεταβλητών «Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένων καυσίμων» και «Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου φορτίου» βασίστηκε στην κατηγοριοποίηση που ακολουθείται στο [46], σύμφωνα με το οποίο η ποσότητα πετρελαίου που βρίσκεται σε ένα ναυάγιο χωρίζεται σε τρεις κλάσεις (Σχ. 5.17):

- Μικρή: ποσότητα πετρελαίου κάτω από 100 tons,
- Μεσαία: ποσότητα πετρελαίου μεταξύ 100 και 1,000 tons,
- Μεγάλη: ποσότητα πετρελαίου πάνω από 1,000 tons.

Αυτή η κατηγοριοποίηση προτιμήθηκε σε σχέση με αυτή που ακολουθεί ο ΙΤΟΡΡ¹⁸ επειδή ταιριάζει καλύτερα στην κατανομή συχνότητας των εκτιμήσεων που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Η μεταβλητή «Ηλικία ναυαγίου» έχει επίσης χωριστεί σε τρεις κατηγορίες (Σχ. 5.8): κάτω από 20 έτη (recent), μεταξύ 20 και 40 έτη (intermediate), και πάνω από 40 έτη (old). Η κατηγοριοποίηση βασίστηκε στη μέση αναμενόμενη διάρκεια λειτουργικής ζωής για ένα πλοίο που κυμαίνεται από 25 έως 30 έτη. Με παρόμοιο τρόπο χωρίστηκε η μεταβλητή «Λειτουργική ζωή πλοίου» στις ακόλουθες κατηγορίες (Σχ. 5.16: κάτω από 25 έτη (short), μεταξύ 25 και 50 έτη (intermediate), και πάνω από 50 έτη (extensive).

Το μέγεθος του κάθε πλοίου θεωρείται μικρό (small) για μήκη μέχρι 50 m, μεσαίο (medium) για μήκη από 50 έως 150 m, και μεγάλο (large) για μήκη μεγαλύτερα των 150 m.

Η κατηγοριοποίηση της μεταβλητής «Απόσταση από την κοντινότερη ακτή» έχει δανειστεί όρους από την ορολογία της ακτομηχανικής (coastal engineering) και οι κατηγορίες που προκύπτουν (Σχ. 5.14) είναι: μικρότερη από 2 nm (shore), μεταξύ 2 και 4 nm (near shore), και μεγαλύτερη από 6 nm (offshore). Οι συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές «Απόσταση από την κοντινότερη περιοχή NATURA 2000» και «Απόσταση από τον κοντινότερο οικονομικό στόχο» ορίστηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως φαίνεται στα Σχ. 5.13 και 5.12 αντίστοιχα, με τη διαφορά ότι για τις προστατευόμενες περιοχές προστέθηκε η περίπτωση το ναυάγιο να βρίσκεται μέσα στα όρια της περιοχής οπότε η ένταση των επιπτώσεων αυξάνεται. Οι υπόλοιπες κατηγορίες είναι, απόσταση μικρότερη 1 nm (small), μεταξύ 1 και 10 nm (intermediate), και μεγαλύτερη από 10 nm (large).

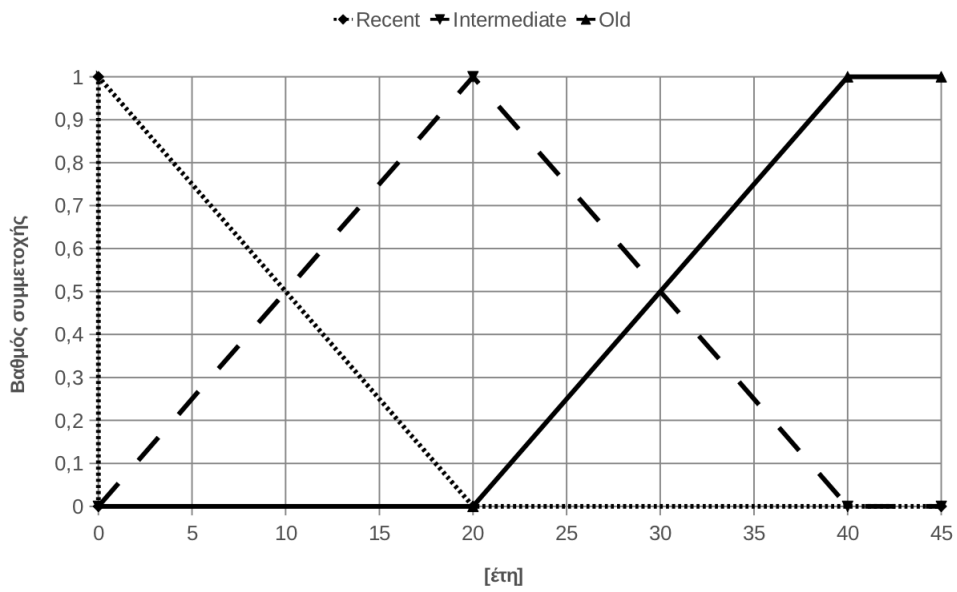
Ιεραρχική δομή

Η ιεραρχική δομή για την ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου προτιμήθηκε γιατί προσφέρει τη δυνατότητα της κατάτμησης του συνολικού προβλήματος σε μικρότερα λογικά κομμάτια. Επίσης, η ιεραρχική δομή σε πολλαπλά στάδια έχει το πλεονέκτημα της απλοποίησης της βάσης των κανόνων, καθώς και την μείωση του αριθμού κανόνων σε αυτή, εφόσον τα διάφορα κομμάτια εντάσσονται σε ένα λογικό πλαίσιο. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου σε ένα και μόνο στάδιο, καταλήγει σε μια βάση κανόνων με πολύ μεγαλύτερο αριθμό κανόνων όταν οι μεταβλητές εισόδου αυξάνουν σε αριθμό¹⁹.

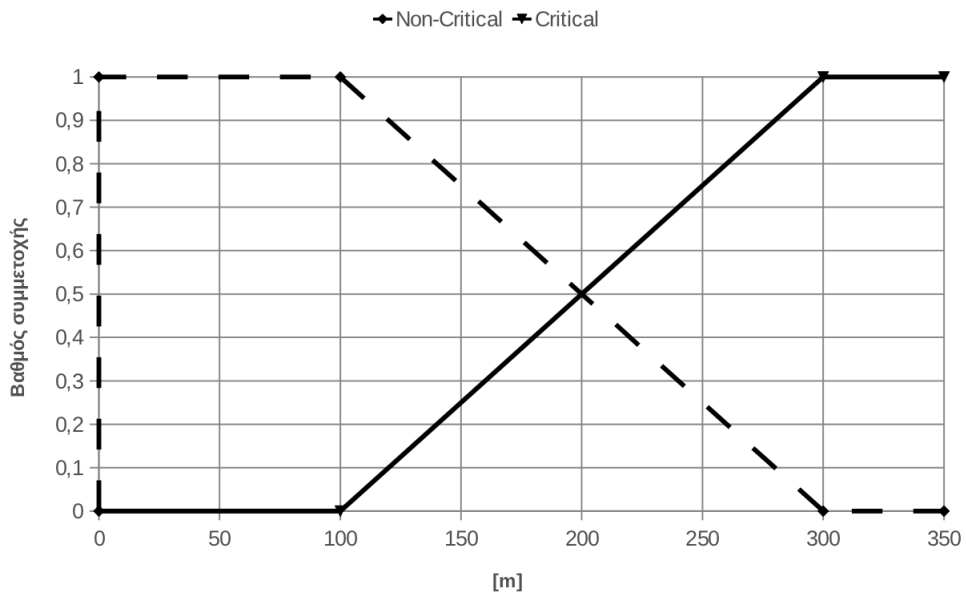
Η δομή που αναπτύχθηκε αποτελεί μια πλήρη περιγραφή του προβλήματος, δηλαδή του χαρακτηρισμού του επιπέδου του περιβαλλοντικού ρίσκου που προκύπτει από την πιθανότητα της διαρροής πετρελαιοειδών από ένα πλήρως βυθισμένο ναυάγιο.

¹⁸ Η κατηγοριοποίηση κατά ΙΤΟΡΡ είναι η ακόλουθη: μικρή ποσότητα είναι η ποσότητα πετρελαίου κάτω από 7 tons, μεσαία ποσότητα είναι η ποσότητα πετρελαίου μεταξύ 7 και 700 tons, και μεγάλη ποσότητα είναι η ποσότητα πετρελαίου πάνω από 700 tons.

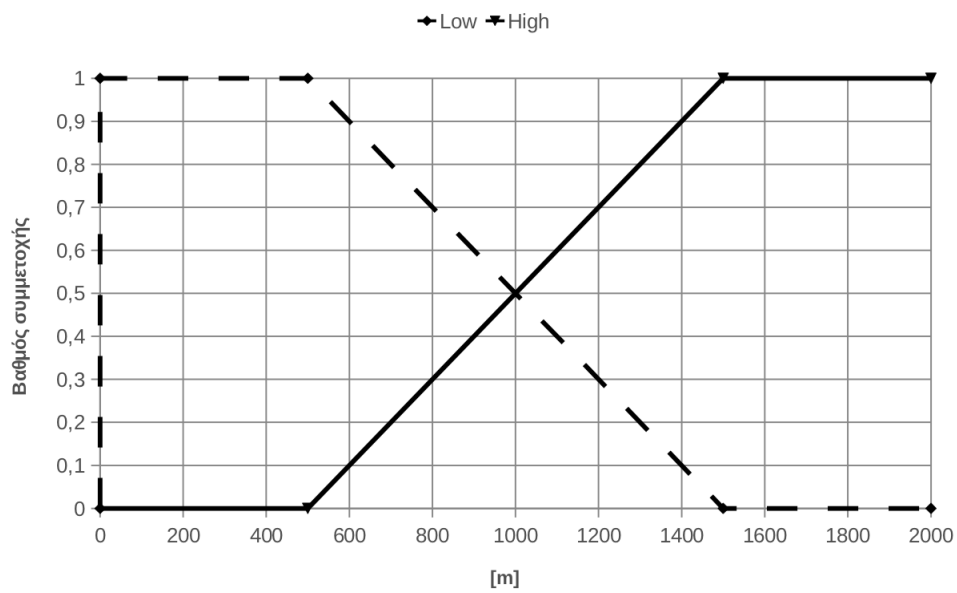
¹⁹ Το πρόβλημα της έκρηξης των κανόνων αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.6



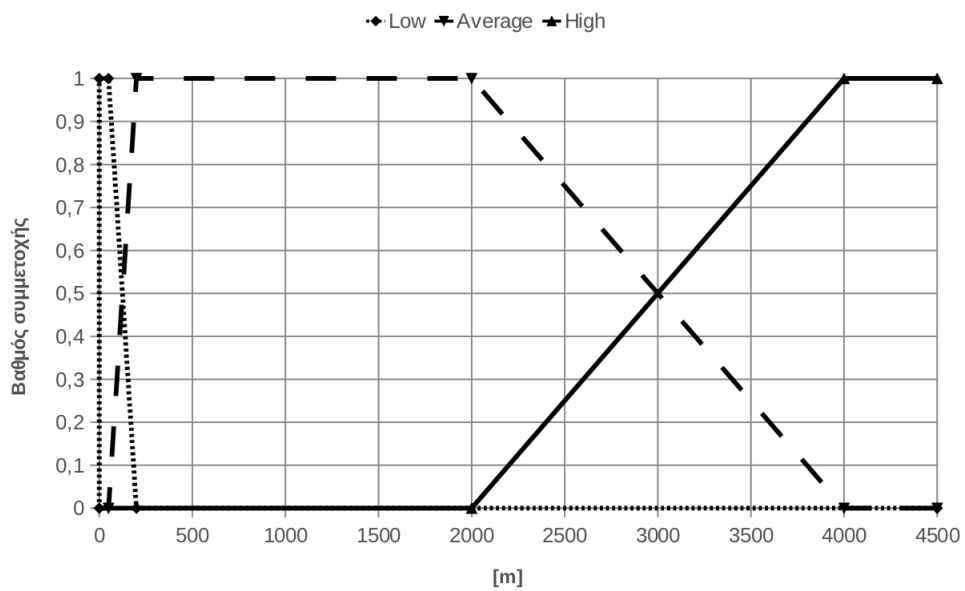
Σχήμα 5.8.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Ηλικία ναυαγίου»



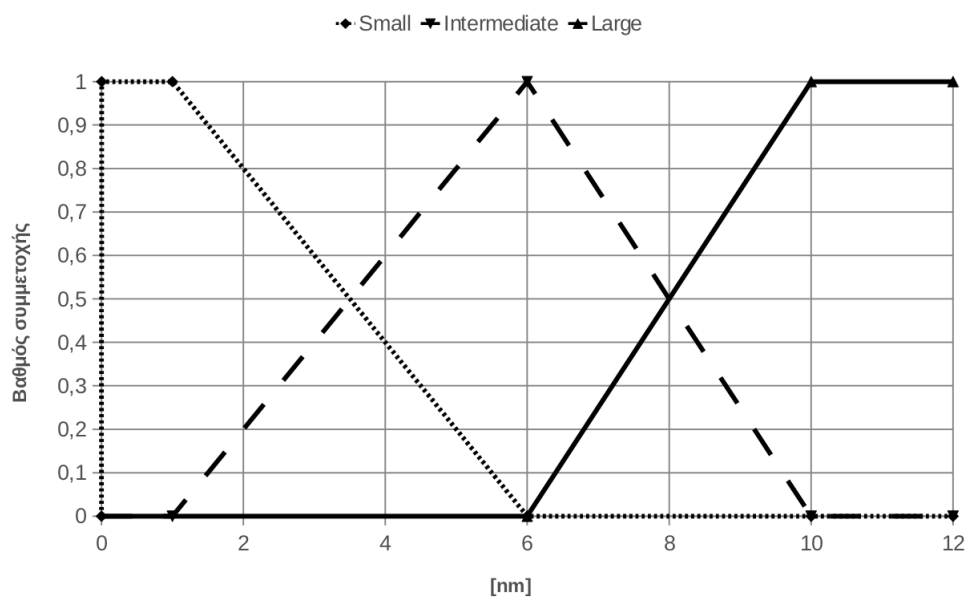
Σχήμα 5.9.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Κρίσιμο Βάθος»



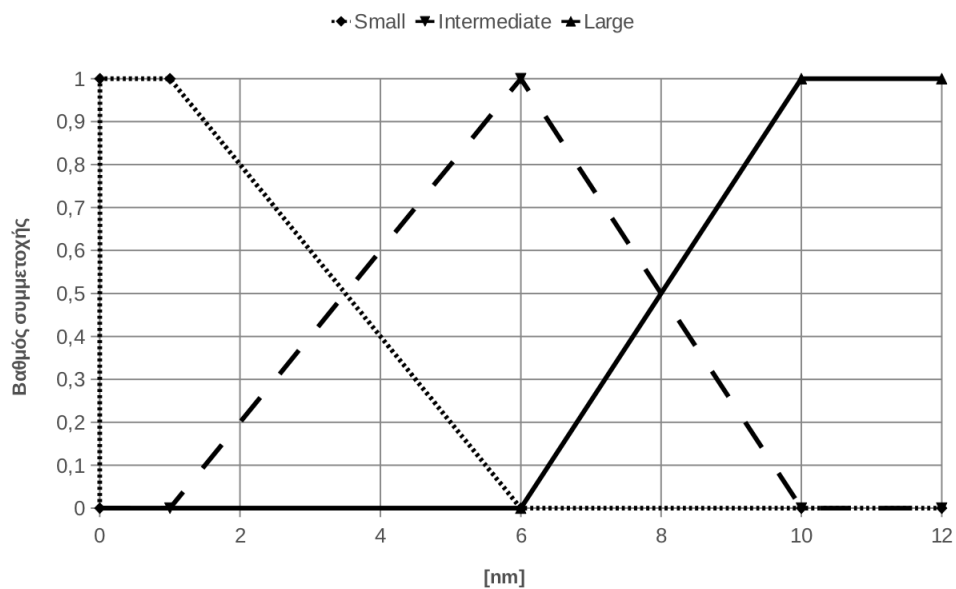
Σχήμα 5.10.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Βάθος» στο υποσύστημα των βλαβών από την κατάρρευση των δεξαμενών



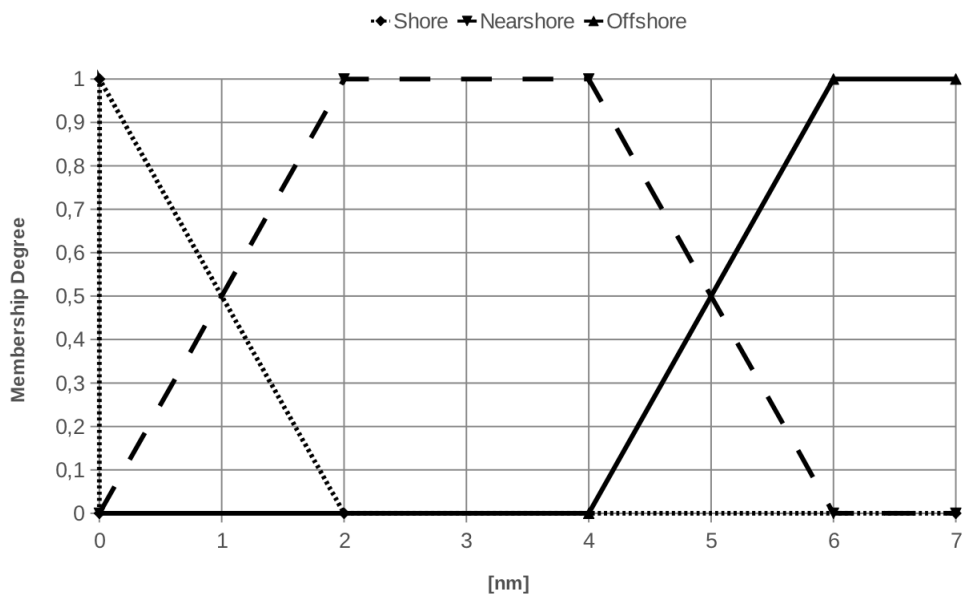
Σχήμα 5.11.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Βάθος» στο υποσύστημα της διάβρωσης



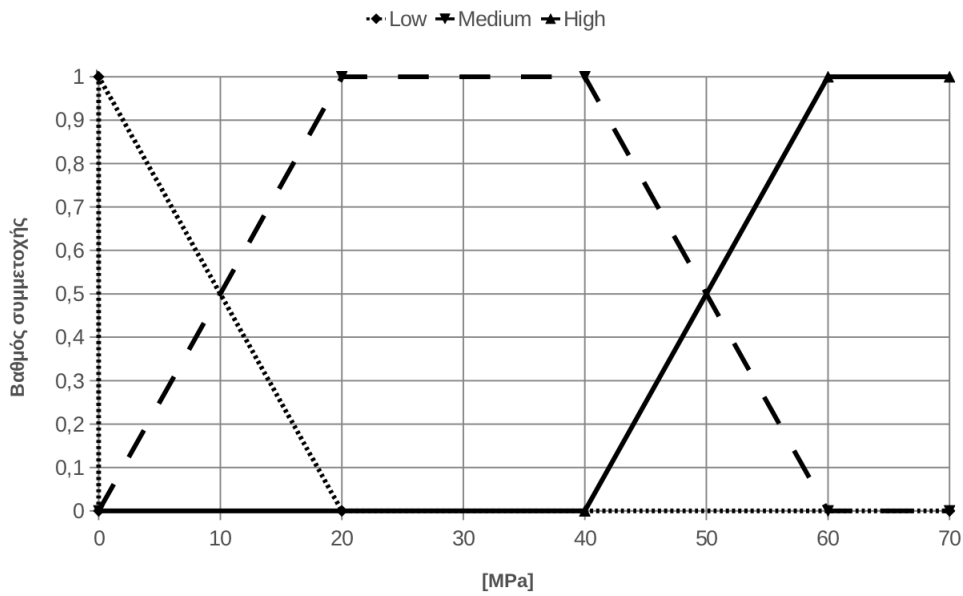
Σχήμα 5.12.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Απόσταση από τον κοντινότερο οικονομικό στόχο»



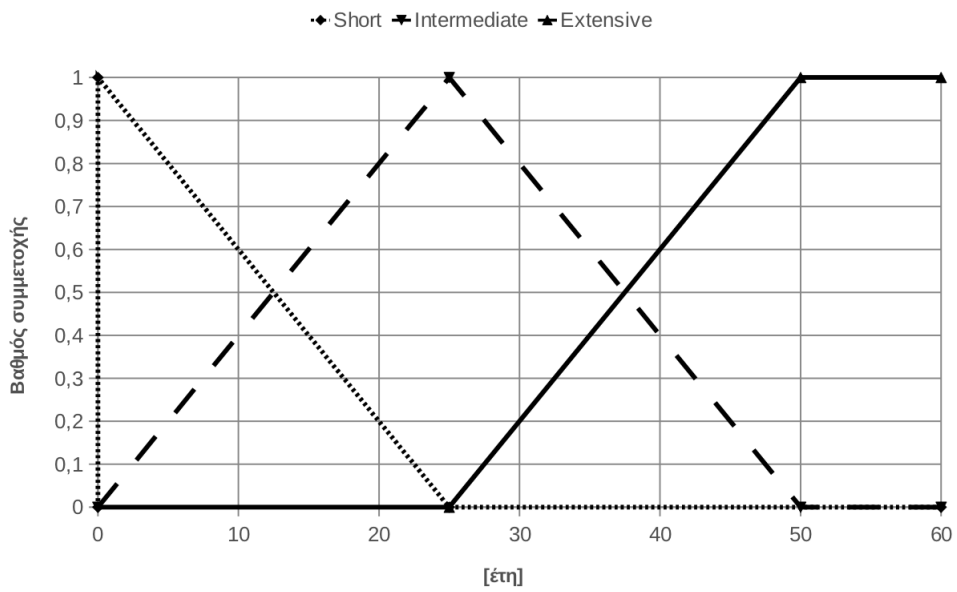
Σχήμα 5.13.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Απόσταση από την κοντινότερη περιοχή NATURA 2000»



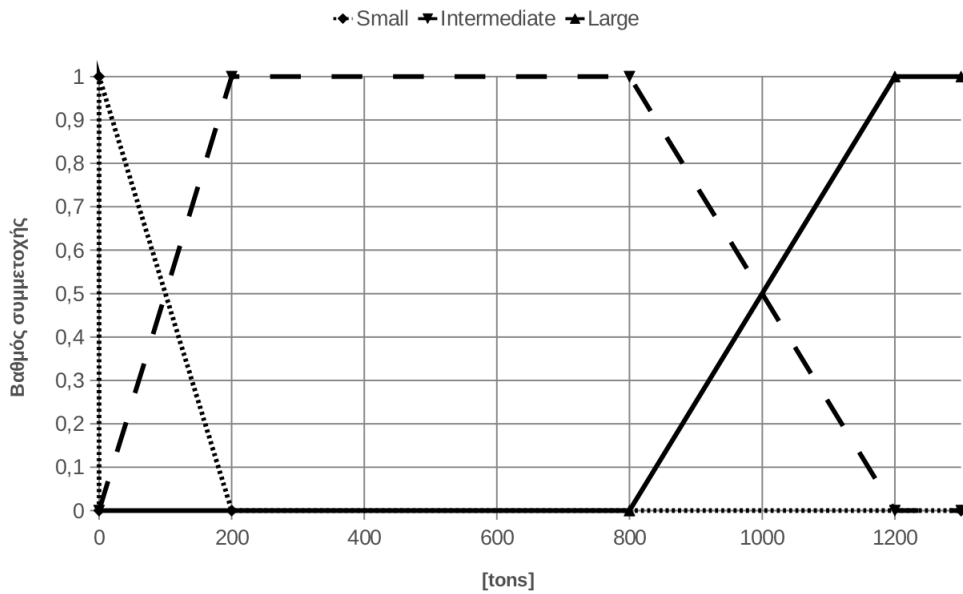
Σχήμα 5.14.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Απόσταση από την κοντινότερη ακτή»



Σχήμα 5.15.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Υδροστατική πίεση»



Σχήμα 5.16.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Λειτουργική ζωή πλοίου»



Σχήμα 5.17.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Πιθανή εγκλωβισμένη ποσότητα πετρελαίου»

Τα υποσυστήματα που αποτελούν τη συνολική δομή περιγράφουν σχέσεις ανάμεσα στα μεγέθη που συνδέουν, τέτοιες που να αντανακλούν τη συσσωρευμένη γνώση. Με αυτό τον τρόπο ορίζονται εμπειρικές συναρτήσεις που συνδέουν τις μεταβλητές εισόδου με τις μεταβλητές εξόδου. Ο γενικός κανόνας που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη της ιεραρχικής δομής είναι η ακόλουθη: τα υποσυστήματα που κατασκευάζονται να αποτελούνται από δύο εισόδους και μια έξοδο. Οι λόγοι για τους οποίους προτιμήθηκε αυτή η μορφή είναι αφενός γιατί προσφέρει καλύτερη οργάνωση του ιεραρχικού συστήματος, καθώς το συνολικό πρόβλημα χωρίζεται σε μικρότερα υπό-προβλήματα, και αφετέρου γιατί απλοποιεί σημαντικά τη μορφή των κανόνων. Η απλότητα της βάσης των κανόνων είναι σημαντική καθώς με αυτό τον τρόπο μπορούν να ελεγχθούν ευκολότερα οι κανόνες και το σύστημα να είναι περισσότερο διαφανές, ανοιχτό σε έλεγχο και κατανοητό.

Οι βασικοί παράγοντες που λαμβάνουν μέρος στον υπολογισμό του περιβαλλοντικού ρίσκου καθώς και η ιεραρχική δομή που καθορίζει τη ροή της πληροφορίας φαίνονται στο Σχ. 5.19. Το περιβαλλοντικό ρίσκο προκύπτει από τη σύνθεση των παραγόντων που επηρεάζουν τον κίνδυνο διαρροής του πετρελαίου και την ένταση των συνεπειών από μια πιθανή διαρροή. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται λεπτομερέστερα οι δύο βασικοί κλάδοι του μοντέλου.

Κλάδος έντασης συνεπειών. Αυτός ο κλάδος προσφέρει μια εκτίμηση της έντασης των επιπτώσεων μιας πιθανής διαρροής πετρελαίου από κάθε ναυάγιο. Η ποσοτικοποίηση της έντασης των συνεπειών γίνεται με την κατάταξη του κάθε ναυαγίου σε μια κλίμακα αυξανόμενης έντασης. Η κλίμακα έχει οριστεί σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα για τους πίνακες ρίσκου και αποτελείται από τις ακόλουθες κατηγορίες: None, Negligible, Marginal, Critical, και Catastrophic [4].

Στο Σχ. 5.20 φαίνεται η δομή αυτού του κλάδου, όπου κάθε ορθογώνιο απεικονίζει ένα υποσύστημα ασφούς λογικής και τα παραλληλόγραμμα απεικονίζουν μεταβλητές εισόδου. Το κάθε υποσύστημα συνοδεύεται από μια ξεχωριστή βάση κανόνων που αντιστοιχίζει τις μεταβλητές εισόδους στη μεταβλητή έξοδο.

Η ένταση των συνεπειών είναι συνάρτηση του δυναμικού που εμφανίζει το εγκλωβισμένο πετρέλαιο για ρύπανση σε περίπτωση διαρροής (*Επίδραση πετρελαίου*) και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των στόχων που βρίσκονται κοντά στην τοποθεσία του ναυαγίου, από τα οποία καθορίζουμε την ευαισθησία των στόχων στην περίπτωση που το διαρρέον πετρέλαιο φτάσει σε αυτούς (*Ευαισθησία στόχων*).

Η επίδραση που θα έχει το πετρέλαιο στην περίπτωση διαρροής εξαρτάται από το είδος και τη μεταβολή των ιδιοτήτων του λόγω της παραμονής του στο βυθό καθώς και από την εγκλωβισμένη ποσότητα στο ναυάγιο. Στην περίπτωση που το πετρέλαιο που έχει εγκλωβιστεί στο ναυάγιο δεν βρίσκεται μόνο σε άθικτες υδατοστεγείς δεξαμενές, τότε αυτό έρχεται σε επαφή με το νερό, οπότε υπόκειται σε διαδικασίες γαλακτωματοποίησης²⁰ με αποτέλεσμα να αυξάνει το ιξώδες και η τοξικότητά του. Επομένως η αντιμετώπισή του γαλακτωματοποιημένου πετρελαίου γίνεται δυσχερέστερη σε περίπτωση διαρροής στο περιβάλλον. Η δομή διακρίνει την ποσότητα των εγκλωβισμένων καυσίμων από την ποσότητα του εγκλωβισμένου πετρελαίου φορτίου. Αυτή η διάκριση στηρίζεται στην υπόθεση ότι τα καύσιμα στα διάφορα είδη πλοίων έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά, ενώ τα μεταφερόμενο

²⁰ Ένα γαλάκτωμα σχηματίζεται όταν δύο υγρά συνδυάζονται έτσι ώστε το ένα να αιωρείται στο άλλο. Η γαλακτωματοποίηση του πετρελαίου είναι μια διαδικασία κατά την οποία σταγονίδια θαλασσινού νερού αιωρούνται στο πετρέλαιο. Το γαλάκτωμα που προκύπτει έχει συνήθως μεγάλο ιξώδες και είναι περισσότερο persistent. Ο σχηματισμός του γαλακτώματος αυξάνει τον όγκο της αρχικής ποσότητας πετρελαίου περίπου τρεις με τέσσερις φορές. Αυτή η διαδικασία καθυστερεί άλλες διαδικασίες που θα επέτρεπαν τη φυσική διάλυση του πετρελαίου [74].

φορτίο μπορεί να είναι είτε «μαύρο» ή «άσπρο». Στο Σχ. 5.21 φαίνεται το υποσύστημα όπου υπολογίζεται το δυναμικό της ρύπανσης από το φορτίο πετρέλαιο.

Το κομμάτι για την ευαισθησία των κοντινών στην τοποθεσία του ναυαγίου στόχων χωρίζεται στην εκτίμηση των επιπτώσεων για την ακτή, τις προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000 και τις περιοχές οικονομικού ενδιαφέροντος. Οι επιπτώσεις για τις προστατευόμενες περιοχές και για τις περιοχές οικονομικού ενδιαφέροντος έχουν ομαδοποιηθεί στο υποσύστημα «Επιπτώσεις για τις ευαίσθητες περιοχές». αυτό έγινε ώστε να ικανοποιηθεί η δομική απαίτηση που έχει τεθεί, σύμφωνα με την οποία κάθε υποσύστημα θα έχει δύο μεταβλητές εισόδου και μία μεταβλητή εξόδου. Οι επιπτώσεις για την κοντινότερη ακτή εξαρτώνται από τον τύπο της ακτής και τον κίνδυνο που υπάρχει να φτάσει το διαρρέον πετρέλαιο σε αυτή. Η κατηγοριοποίηση του τύπου των ακτών είναι σε κλίμακα αυξανόμενης δυσκολίας καθαρισμού και αποκατάστασης στην περίπτωση που το διαρρέον πετρέλαιο φτάσει σε αυτές. Η εκτίμηση του κινδύνου προσέγγισης του διαρρέοντος πετρελαίου στους κοντινότερους στόχους (ακτές, περιοχές NATURA 2000, και περιοχές οικονομικού ενδιαφέροντος) γίνεται μέσω όμοιων υποσυστημάτων (Σχ. 5.22), στα οποία παράγοντες είναι η επίδραση της τοπικής θαλάσσιας κυκλοφορίας (εάν δηλαδή μια πιθανή πετρελαιοκηλίδα κατευθύνεται προς το στόχο ή μακριά από αυτόν υπό την επίδραση περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως είναι ο άνεμος και τα θαλάσσια ρεύματα) και η οριζόντια απόσταση από την τοποθεσία του ναυαγίου. Εδώ δεν λαμβάνονται υπόψη οι πιθανές επιπτώσεις σε μακρινούς στόχους διότι οι κοντινότεροι στόχοι θα είναι αυτοί στους οποίους θα φτάσει πρώτα μια πιθανή πετρελαιοκηλίδα οπότε εκεί θα υπάρχουν και οι αμεσότερες επιπτώσεις.

Κλάδος επικινδυνότητας διαρροής πετρελαίου. Ο κλασικός ορισμός του ρίσκου περιλαμβάνει την πιθανότητα για την πραγματοποίηση της ανεπιθύμητης κατάστασης που βρίσκεται υπό μελέτη. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, προτιμήθηκε ο ορισμός ενός δείκτη για τον κίνδυνο της διαρροής του πετρελαίου από ένα ναυάγιο, εφόσον με τα διαθέσιμα στοιχεία δεν ήταν δυνατό να υπολογιστούν αντίστοιχες πιθανότητες. Ο δείκτης μπορεί να πάρει μια από τις ακόλουθες τιμές: Minor, Significant, Major, και Severe.

Ο δείκτης της επικινδυνότητας λαμβάνει υπόψη διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν, άμεσα ή έμμεσα, την πιθανότητα διαρροής του πετρελαίου. Ένας από αυτούς είναι η ικανότητα της βυθισμένης κατασκευής να συγκρατήσει το πετρέλαιο (*Ικανότητα περιορισμού του πετρελαίου*). Ως διορθωτικός παράγοντας χρησιμοποιείται η πιθανή τοποθεσία του πετρελαίου εντός του ναυαγίου (υδατοστεγείς δεξαμενές ή/και διασκορπισμένο σε αυτό). Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμη η πληροφορία ότι το εγκλωβισμένο πετρέλαιο κινείται ελεύθερα εντός του ναυαγίου, τότε η ικανότητα της κατασκευής να περιορίσει το πετρέλαιο θα είναι μειωμένη και επομένως η πιθανότητα διαρροής στο περιβάλλον θα είναι αυξημένη. Στο Σχ. 5.23 φαίνεται η δομή αυτού του κλάδου.

Η ικανότητα του ναυαγίου να περιορίσει το εγκλωβισμένο σε αυτό πετρέλαιο εξαρτάται από την κατασκευαστική ακεραιότητα της κατασκευής καθώς και από τον τύπο της γάστρας.

Η παράμετρος «τύπος της γάστρας» (δηλαδή, γάστρα απλών ή διπλών τοιχωμάτων) χρησιμοποιείται ως διορθωτικός παράγοντας στην εκτίμηση της κατασκευαστικής ακεραιότητας του ναυαγίου. Η λογική που ακολουθείται εδώ είναι ότι όσες περισσότερες ασφαλιστικές δικλίδες έναντι διαρροής έχει ένα πλοίο εκ κατασκευής τόσο αυξάνει η ικανότητά του να συγκρατήσει πετρέλαιο. Για παράδειγμα ένα πλοίο διπλών τοιχωμάτων, του οποίου το εσωτερικό τοίχωμα δεν έχει διαρραγεί σημαντικά, θα έχει αυξημένη κατασκευαστική ακεραιότητα κατόπιν του ατυχήματος και επομένως η ικανότητά του να συγκρατήσει το εγκλωβισμένο πετρέλαιο είναι μεγαλύτερη από ένα πλοίο απλών τοιχωμάτων για τον ίδιο τύπο ατυχήματος. Αυτό βέβαια δεν ισχύει σε κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα για τα πλοία διπλών τοιχωμάτων, η προστασία έναντι διαρροής πετρελαίου λειτουργεί σε ατυχήματα

χαμηλής ενεργειακής στάθμης. Σε ατυχήματα υψηλής ενεργειακής στάθμης είναι πολύ πιθανό να έχουμε διάτρηση και του εσωτερικού τοιχώματος και να έχουμε τελικά διαρροή. Επομένως, ένα πετρελαιοφόρο πλοίο διπλών τοιχωμάτων που έχει άθικτες τις εσωτερικές δεξαμενές μπορεί να έχει εγκλωβίσει μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου οπότε ο κίνδυνος για διαρροή μπορεί να είναι τελικά μεγαλύτερος, αν για παράδειγμα η επίδραση της διάβρωσης στο θαλάσσιο περιβάλλον γίνει πολύ μεγάλη.

Η εκτίμηση της κατασκευαστικής ακεραιότητας του ναυαγίου αποτελεί ένα τρόπο να μετρηθεί η έκταση της μεταβολής των αρχικών χαρακτηριστικών της άθικτης κατασκευής, η αντοχή και η μορφή, λόγω των διεργασιών τις οποίες έχει υποστεί το πλοίο κατά:

1. το ατύχημα λόγω του οποίου βυθίστηκε,
2. τη διαδικασία της βύθισης, και
3. την παραμονή του ναυαγίου στο βυθό.

Η αντοχή της γάστρας του ναυαγίου εκτιμάται από την υπόλοιπη αντοχή της γάστρας και ως διορθωτικός παράγοντας λαμβάνονται ο τύπος των κατασκευαστικών ενισχύσεων της γάστρας. Η μεταβολή των χαρακτηριστικών αντοχής της γάστρας του ναυαγίου οφείλεται σε δύο παράγοντες: (1) η επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος στη γάστρα του ναυαγίου, και (2) τα κοπωτικά φορτία που έχει δεχτεί η γάστρα τόσο πριν το ατύχημα όσο και μετά από αυτό. Στο Σχ. 5.24 φαίνεται η δομή αυτού του υποσυστήματος.

Η κόπωση της γάστρας του ναυαγίου θεωρείται ως η αθροιστική επίδραση της κόπωσης της κατασκευής πριν το ατύχημα και της επίδρασης των περιβαλλοντικών παραγόντων από την παραμονή του ναυαγίου στο βυθό. Η αντοχή της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου επηρεάζεται αρνητικά λόγω των κοπωτικών φορτίων που επιβάλλονται σε αυτή κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του πλοίου. Η διάρκεια της λειτουργίας του πλοίου υπολογίζεται εδώ ως η χρονική διάρκεια από την κατασκευή του πλοίου έως τη βύθισή του. Η υπόθεση που γίνεται είναι ότι σε αυτή τη χρονική διάρκεια η λειτουργία του πλοίου ήταν αδιάλειπτη. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη, για την κόπωση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου μετά τη βύθιση, είναι τα υποθαλάσσια ρεύματα. Η ένταση των θαλάσσιων ρευμάτων εξαρτάται από την περιοχή καθώς και από το βάθος όπου βρίσκεται το ναυάγιο. Λόγω έλλειψης στοιχείων για το προφίλ των υποθαλάσσιων ρευμάτων ανά περιοχή, γίνεται η υπόθεση ότι η ένταση των ρευμάτων εξαρτάται μόνο από το βάθος, και συγκεκριμένα ότι αυξανόμενου του βάθους μειώνεται η ένταση των ρευμάτων. Αυτή η υπόθεση βασίζεται στη θεωρία του Ekman για τα θαλάσσια ρεύματα και προκύπτει από τον ορισμό του σπιράλ του Ekman [49].

Η επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος στη μεταλλική κατασκευή του ναυαγίου, που οφείλεται στην παραμονή του στο βυθό, μπορεί να μετρηθεί από την έκταση της διάβρωσης. Αυτή υπολογίζεται συνήθως από το γινόμενο του ρυθμού της διάβρωσης στη μονάδα του χρόνου επί τη χρονική διάρκεια που το ναυάγιο βρίσκεται βυθισμένο, δηλαδή την ηλικία του ναυαγίου. Ο ρυθμός της διάβρωσης εξαρτάται από χαρακτηριστικές ιδιότητες του διαβρωτικού περιβάλλοντος, όπως είναι η θερμοκρασία του νερού, η αλατότητα, η συγκέντρωση οξυγόνου, το pH, καθώς και από τα χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας του νερού γύρω από αυτό, και την έκταση των κατακαθίσεων στα μεταλλικά ελάσματα του ναυαγίου [30]. Ο ρυθμός της διάβρωσης ενισχύεται όταν η συγκέντρωση οξυγόνου στο περιβάλλον αυξάνεται, η αλατότητα αυξάνεται, το pH μειώνεται, η θερμοκρασία αυξάνεται, και η ταχύτητα της κυκλοφορίας του νερού γύρω από το ναυάγιο αυξάνεται.

Η έκταση των κατακαθίσεων στα μεταλλικά ελάσματα του ναυαγίου ενώ αρχικά αυξάνει τους ρυθμούς της διάβρωσης, καθώς οι μικρο-οργανισμοί διασπούν το μέταλλο, τελικά υπάρχει περίπτωση να μειώνει τους ρυθμούς της διάβρωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή το

στρώμα των κατακαθίσεων μπορεί να λειτουργήσει προστατευτικά για το υποκείμενο μέταλλο απομονώνοντάς το από το διαβρωτικό περιβάλλον. Η έκταση των κατακαθίσεων εξαρτάται από την ηλικία του ναυαγίου. Εδώ όμως, αυτός ο παράγοντας δεν έχει ληφθεί υπόψη για λόγους απλούστευσης της ανάλυσης.

Οι ιδιότητες του διαβρωτικού περιβάλλοντος (θερμοκρασία, αλατότητα, κλπ.) έχουν ισχυρή εξάρτηση από το βάθος. Επίσης τα διάφορα μεγέθη είναι πεπλεγμένα μεταξύ τους, για παράδειγμα η συγκέντρωση του νερού σε οξυγόνο εξαρτάται κυρίως από παράγοντες όπως η αλατότητα και η θερμοκρασία. Το παράδειγμα που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση των σχέσεων του βάθους με τα διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη ώστε να εξαχθεί η σχέση του βάθους με το ρυθμό διάβρωσης φαίνεται στο Σχ. 5.25 και αφορά μια δοκιμαστική τοποθεσία στον Ειρηνικό Ωκεανό [14].

Η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος μπορεί να διακριθεί σε τρία στρώματα [2]:

- ένα επιφανειακό στρώμα, καλά αναμεμιγμένο, θερμότερο από όλη τη στήλη του νερού,
- θερμοκλινές, που είναι μια περιοχή βαθών στην οποία η θερμοκρασία μειώνεται με μεγάλο ρυθμό,
- βαθύ ψυχρό στρώμα, που είναι μια περιοχή βαθών στην οποία η θερμοκρασία μειώνεται με πολύ μικρό ρυθμό.

Σε μικρά γεωγραφικά πλάτη (όπως είναι η Μεσόγειος) το θερμοκλινές έχει εποχιακό χαρακτήρα. Για παράδειγμα στο Αιγαίο, τους καλοκαιρινούς μήνες το θερμοκλινές είναι έντονο ενώ τους χειμερινούς μήνες εξαφανίζεται και η θερμοκρασία (μέχρι και βάθος 250 m) παραμένει σταθερή περίπου στους 14 °C (Σχ. 5.26).

Η κατανομή της συγκέντρωσης του οξυγόνου με το βάθος είναι γενικά η ακόλουθη [35]: στο ανώτερο στρώμα, που ορίζεται περίπου από τα 10 έως τα 50 m βάθος, υπάρχει πολύ υψηλή συγκέντρωση οξυγόνου λόγω του φαινομένου της φωτοσύνθεσης. Η περιοχή, η οποία ορίζεται περίπου από τα 200 έως τα 2,000 m βάθος, έχει τη μικρότερη συγκέντρωση οξυγόνου και είναι γνωστή ως περιοχή ελάχιστου οξυγόνου. Σε μεγαλύτερα βάθη η συγκέντρωση του οξυγόνου αυξάνεται λόγω της θερμόαλου κυκλοφορίας²¹ και της χαμηλής κατανάλωσης από διάφορους οργανισμούς.

Για τις ανάγκες λοιπόν της παρούσας εργασίας, το υπολογιστικό μοντέλο εκτιμά την έκταση της διάβρωσης χρησιμοποιώντας δύο δεδομένα, την ηλικία του ναυαγίου και το βάθος όπου βρίσκεται το ναυάγιο. Η ηλικία του ναυαγίου χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της χρονικής περιόδου για την οποία η μεταλλική κατασκευή του ναυαγίου βρίσκεται εκτεθειμένη στο διαβρωτικό περιβάλλον. Το βάθος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τάσης που εμφανίζουν στην κάθε ζώνη βάθους οι ιδιότητες του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Οι βλάβες που έχει υποστεί η γάστρα του ναυαγίου είναι η συνισταμένη των ακόλουθων παραγόντων: (1) βλάβες που οφείλονται στις ιδιαίτερες συνθήκες του ατυχήματος, (2) βλάβες που υπέστη η γάστρα κατά τη διάρκεια της βύθισης του πλοίου. Με τη σειρά τους, οι βλάβες κατά τη διάρκεια της βύθισης είναι η αθροιστική επίδραση των βλαβών που προέκυψαν από την πιθανή κατάφρευση υδατοστεγώς κλεισμένων δεξαμενών, που οφείλονται στη διαφορά της πίεσης του εσωτερικού της δεξαμενής και του εξωτερικού περιβάλλοντος, καθώς και των βλαβών που προέκυψαν από την πρόσκρουση του πλοίου στο θαλάσσιο πυθμένα. Στο Σχ. 5.27 φαίνεται η δομή αυτού του υποσυστήματος.

²¹ Ο όρος “θερμόαλος κυκλοφορία” αναφέρεται στην μεγάλης κλίμακας ωκεάνια κυκλοφορία, η οποία δημιουργείται κυρίως από διαφορές στη θερμοκρασία και την αλατότητα των υδάτων. Η θερμόαλος κυκλοφορία αναφέρεται σε ωκεάνια ρεύματα που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος [79].

Η έκταση των βλαβών που προκλήθηκαν από το ατύχημα εξαρτάται από τον τύπο του ατυχήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια αυθαίρετη κλίμακα αυξανόμενης έκτασης βλαβών ανάλογα με το είδος του ατυχήματος (Πιν. 5.15). Για παράδειγμα, ένα πλοίο που έχει βυθιστεί εξαιτίας εισροής υδάτων υπό άσχημες καιρικές συνθήκες θα έχει πιθανότατα πολύ μικρότερες σε έκταση βλάβες σε σχέση με ένα πλοίο που βυθίστηκε κατά τη διάρκεια πολεμικών επιχειρήσεων από μια τορπίλη.

Πίνακας 5.15.: Κλίμακα κατάταξης επιπέδου έκτασης βλαβών σύμφωνα με τον τύπο του ατυχήματος

Επίπεδο έκτασης βλαβών	Τύπος ατυχήματος
Negligible	Λόγω καιρικών συνθηκών, μηχανική βλάβη
Minor	Κατασκευαστική βλάβη
Significant	Σύγκρουση, προσάραξη
Major	Πυρκαγιά/Έκρηξη
Severe	Απώλεια πολέμου

Το φαινόμενο της κατάρρευσης των δεξαμενών αφορά πιθανές βλάβες από την κατάρρευση μη κατακλυσμένων χώρων υπό την επίδραση της υδροστατικής πίεσης κατά τη βύθιση του ναυαγίου. Το φορτίο που επιβάλλεται στην κατασκευή και οφείλεται σε αυτό το φαινόμενο είναι κρουστικό και επομένως επηρεάζει τα συνήθη ελάσματα του πλοίου καθώς δεν είναι κατάλληλα σχεδιασμένα για αυτή την κατάσταση.

Οι εργασίες που έχουν γίνει από την επιτροπή Marine Forensics του Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME) δίνουν την ακόλουθη περιγραφή του φαινομένου [24]. Υδατοστεγή διαμερίσματα που περιέχουν αέρα θα καταρρεύσουν υπό την επίδραση της αυξανόμενης υδροστατικής πίεσης καθώς το πλοίο βυθίζεται προς τον πυθμένα. Οι υδατοστεγείς χώροι θα πιέζονται έως ότου το πιο αδύναμο στοιχείο της κατασκευής καταρρεύσει προς τα μέσα, συμπιέζοντας τον αέρα που είναι εγκλωβισμένοι σε αυτούς σε πολύ μεγαλύτερες πιέσεις. Ο συμπιεσμένος αέρας θα διασταλεί προς τα έξω επιβάλλοντας κρουστικά φορτία τα οποία θα καταστρέψουν την περιβάλλουσα κατασκευή. Αρχικά, τα φορτία θα έχουν τη μορφή κρουστικού κύματος με μεγάλη αύξηση της πίεσης, προκαλώντας ψαθυρή θραύση καθώς οι περισσότεροι χάλυβες Grade A δεν αντέχουν σε τέτοιου είδους φορτίσεις. Το κρουστικό κύμα ακολουθείται από μια φάση δημιουργίας ταλαντευόμενης φυσαλίδας που θα συνεισφέρει στις βλάβες που έχει ήδη υποστεί η κατασκευή. Οι δυνάμεις κατάρρευσης επιδρούν σε άδεια υδατοστεγή διαμερίσματα.

Αν λοιπόν ένα πλοίο που βυθίζεται έχει χώρους που δεν έχουν κατακλυστεί πλήρως τότε μέχρι να φτάσει στον πυθμένα πιθανότατα αυτοί θα καταρρεύσουν. Όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος που θα φτάσει τελικά το ναυάγιο τόσο πιο πιθανό είναι να υπάρχουν βλάβες στη γάστρα από κατάρρευση μη κατακλυσμένων χώρων, υπό την επίδραση της αυξανόμενης υδροστατικής πίεσης. Η έκταση αυτών των βλαβών μπορεί να συναρτηθεί με το εύρος των βλαβών της γάστρας που οφείλονται στο ατύχημα, με την έννοια ότι όσο μεγαλύτερη έκταση έχουν οι βλάβες από το ατύχημα τόσο περισσότεροι χώροι θα έχουν κατακλυστεί πλήρως, πριν αρχίσει το ναυάγιο να βυθίζεται, και άρα τόσο μικρότερη πιθανότητα υπάρχει για βλάβες από κατάρρευση μη κατακλυσμένων δεξαμενών.

Η πιθανότητα κατάρρευσης μη κατακλυσμένων δεξαμενών εξαρτάται και από την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου και τη φάση του ταξιδιού που βρισκόταν όταν βυθίστηκε

(πληρότητα δεξαμενών καυσίμου, νερού κλπ.). Η αντίσταση των διαφόρων διαμερισμάτων σε τέτοιου είδους φορτία αυξάνεται όσο αυξάνεται η πληρότητα αυτών με κάτι άλλο πέραν του αέρα.

Για τις ανάγκες του υπολογιστικού μοντέλου που έχει αναπτυχθεί, η έκταση των βλαβών από κατάρρευση υδατοστεγών διαμερισμάτων εξαρτάται από την κατάσταση της φόρτωσης του πλοίου κατά τη βύθιση και από την υδροστατική πίεση στο βάθος όπου έχει καταλήξει το ναυάγιο. Εάν το βάθος όπου βρίσκεται το ναυάγιο είναι πολύ μεγάλο τότε είναι πιθανότερο να έχουν αναπτυχθεί αρκετά μεγάλα κρουστικά φορτία ώστε να καταρρεύσουν ορισμένοι χώροι.

Οι βλάβες που έχει υποστεί η γάστρα από την πρόσκρουση του πλοίου στον πυθμένα εξαρτώνται από την ορμή που αυτό έχει αναπτύξει κατά τη βύθιση και από το είδος του πυθμένα. Το είδος του πυθμένα υποδεικνύει τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας σύγκρουσης του ναυαγίου. Η έκταση των βλαβών θα αυξάνεται με την αυξανόμενη «σκληρότητα» του πυθμένα. Η ορμή είναι το γινόμενο της μάζας επί την ταχύτητα ενός σώματος. Επειδή αυτές οι πληροφορίες δεν ήταν διαθέσιμες, η μάζα του ναυαγίου εκτιμάται από το μέγεθος αυτού (ως μέτρο του μεγέθους χρησιμοποιούμε το μήκος) και η ταχύτητα που ανέπτυξε κατά τη βύθιση εκτιμάται από το βάθος όπου τελικά βρίσκεται το ναυάγιο. Το βάθος στο οποίο βρίσκεται το ναυάγιο είναι ενδεικτικό του εάν κατά τη βύθιση αυτό ανέπτυξε τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα²². Όσο μεγαλύτερη ταχύτητα έχει αναπτύξει το πλοίο κατά την κάθοδο προς τον πυθμένα τόσες περισσότερες βλάβες θα έχει υποστεί η γάστρα του.

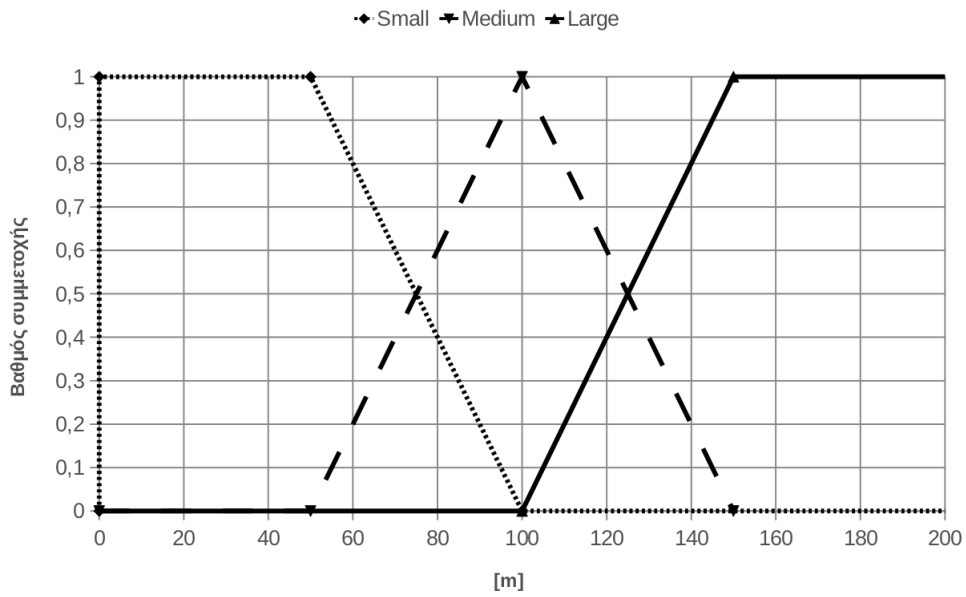
Βάση κανόνων

Στα Σχ. 5.28 - 5.33 φαίνονται σε πινακοποιημένη μορφή οι κανόνες για κάθε υποσύστημα του μοντέλου, ομαδοποιημένα κατά ενότητες ώστε να αντιστοιχούν στην ιεραρχική δομή. Για τα συστήματα με δύο εισόδους σημειώνεται στον κάθε πίνακα η λογική πράξη με την οποία συνδέονται οι μεταβλητές εισόδου. Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί χρωματικός κώδικας από το πράσινο έως το κόκκινο με σειρά αυξανόμενης έντασης, για καλύτερη εποπτεία των σχέσεων που έχουν κωδικοποιηθεί στους κανόνες.

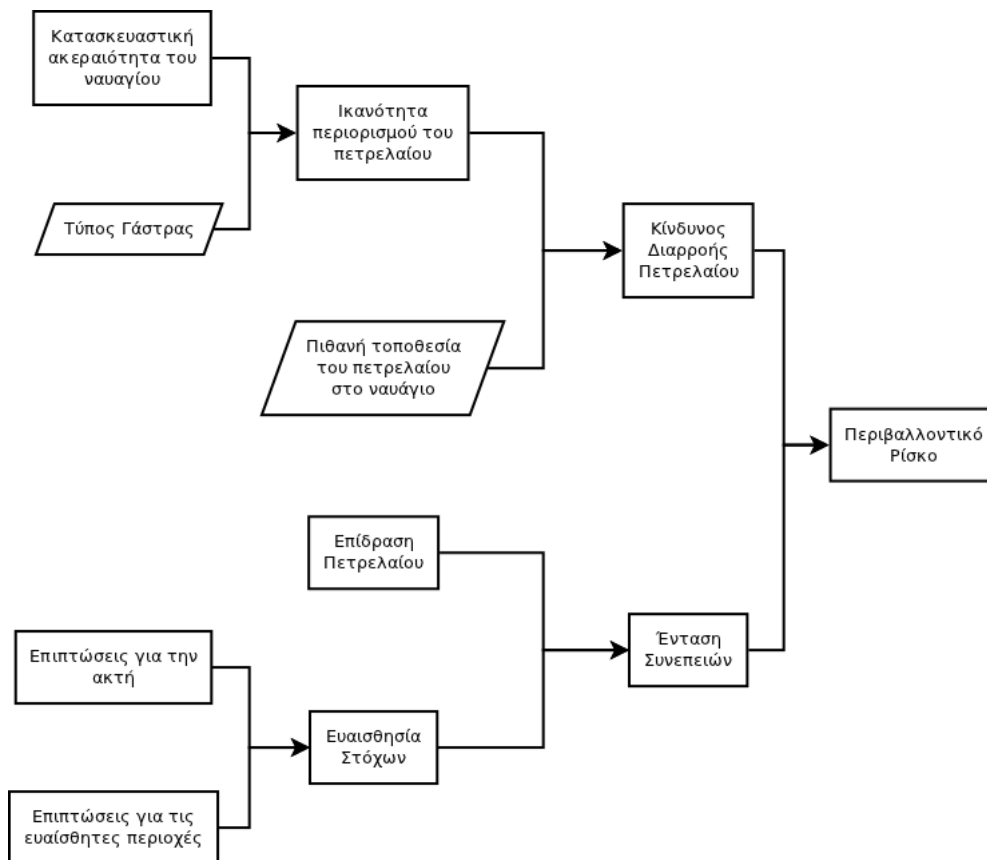
Στο Σχ. 5.34 φαίνονται σε πινακοποιημένη μορφή οι κανόνες για το υποσύστημα όπου γίνεται η εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου.

Στο Σχ. 5.35 φαίνεται η επιφάνεια από την οποία προσδιορίζεται το περιβαλλοντικό ρίσκο, συναρτήσει της επικινδυνότητας διαρροής του πετρελαίου και της έντασης των συνεπειών, όπως προκύπτει από την αντίστοιχη βάση κανόνων. Οι τιμές του ρίσκου αντιστοιχίζονται στις κατηγορίες που έχουν προσδιοριστεί με τον ακόλουθο τρόπο: 0.1 → *Minor*, 0.33 → *Significant*, 0.66 → *Major*, 1 → *Severe*.

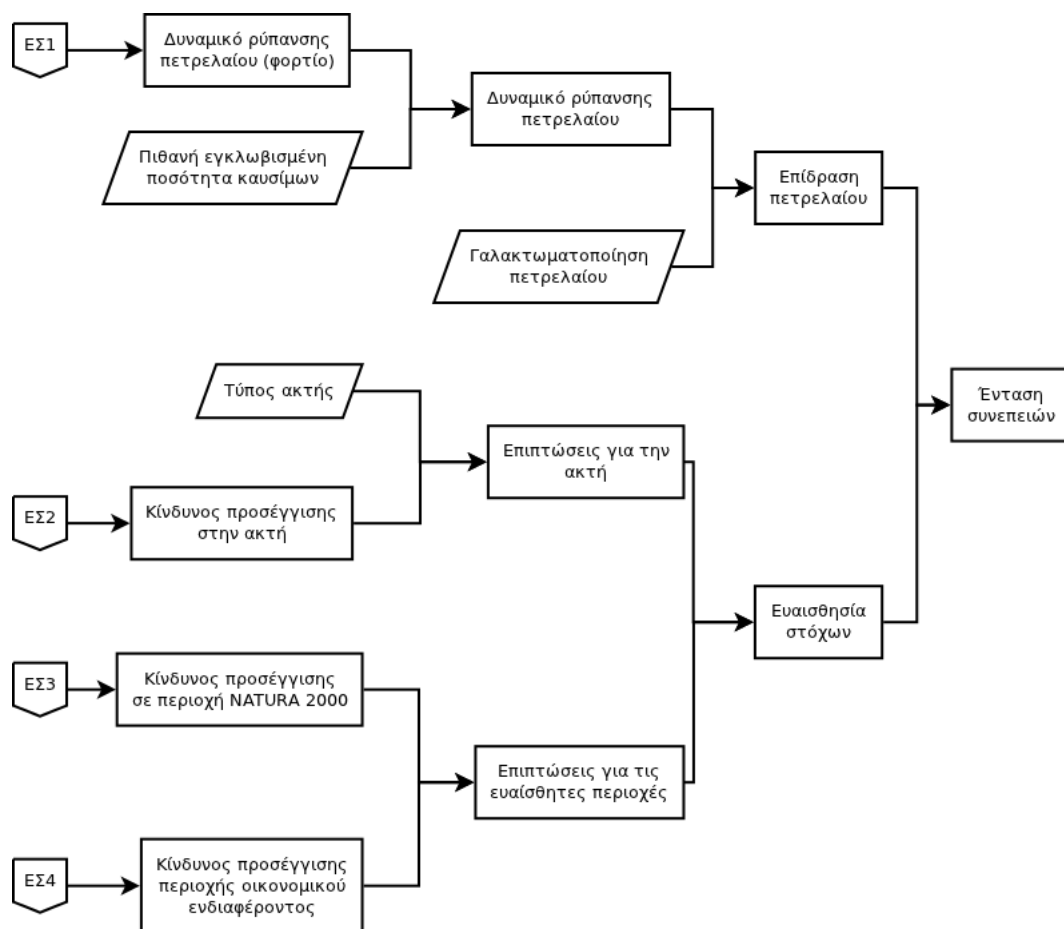
²² Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα ενός βυθιζόμενου πλοίου εξαρτάται από τη μορφή της γάστρας και των υπερκατασκευών του, άρα από την αντίσταση που αναπτύσσεται εξαιτίας του περιβάλλοντος υγρού. Εδώ γίνεται η υπόθεση ότι αυτή επιτυγχάνεται σε ένα διάστημα βαθών από 100-300 m [24].



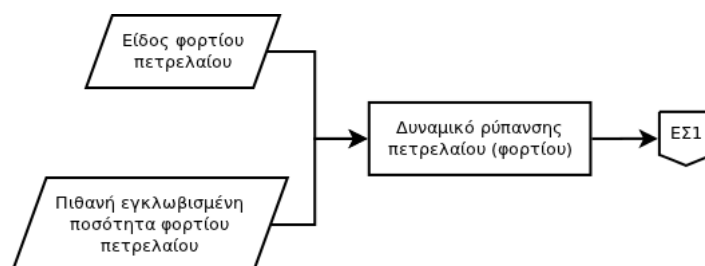
Σχήμα 5.18.: Συνάρτηση συμμετοχής για τη μεταβλητή «Μέγεθος πλοίου»



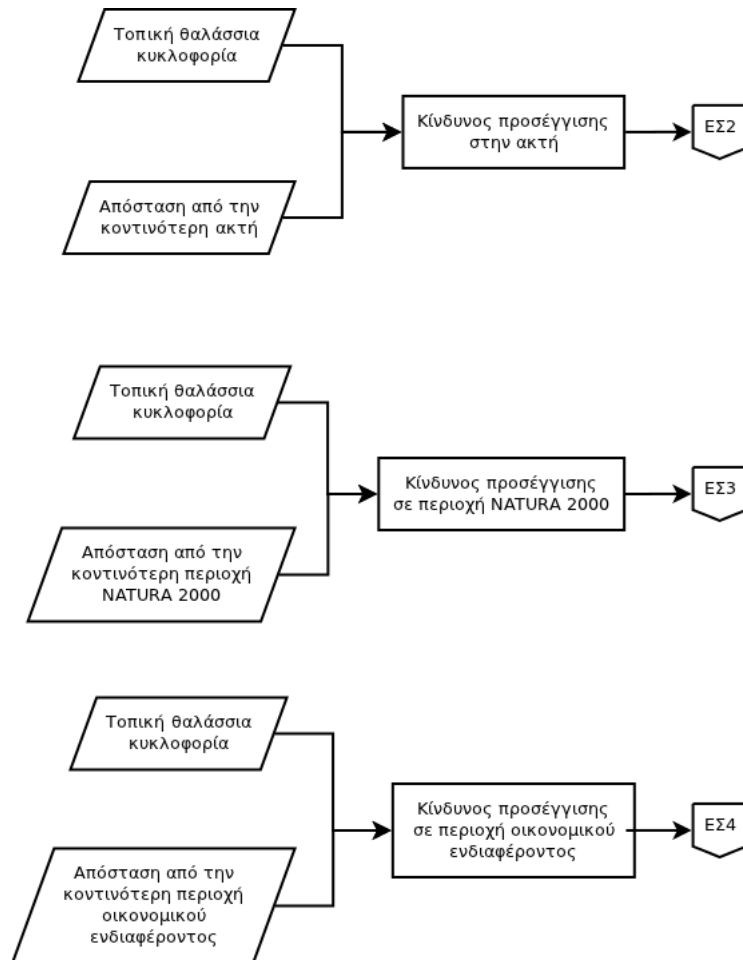
Σχήμα 5.19.: Γενική δομή του μοντέλου ασφούς λογικής με τους βασικούς παράγοντες



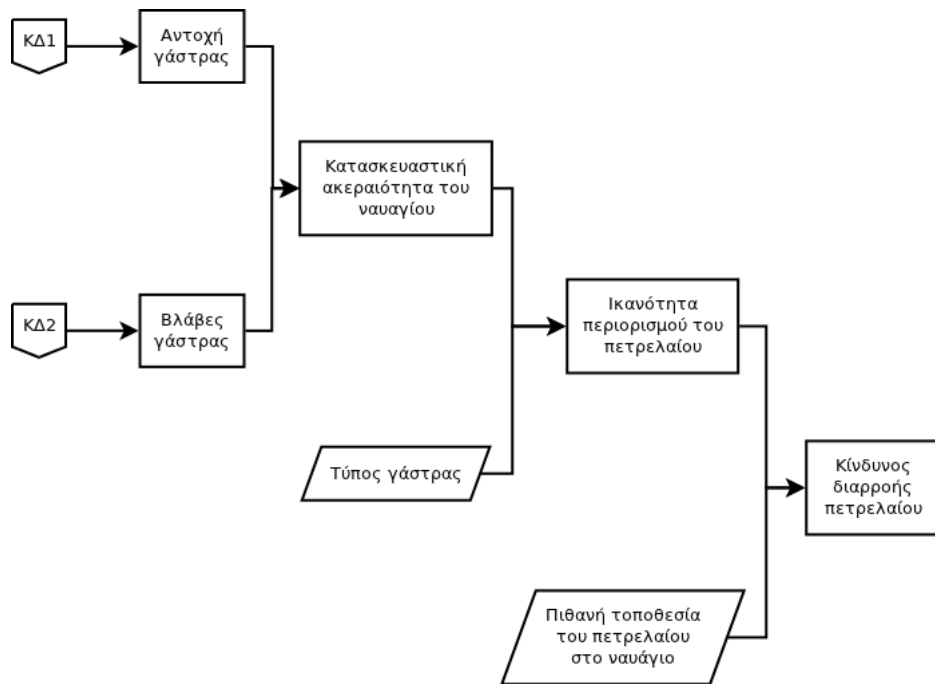
Σχήμα 5.20.: Κλάδος εκτίμησης έντασης των συνεπειών



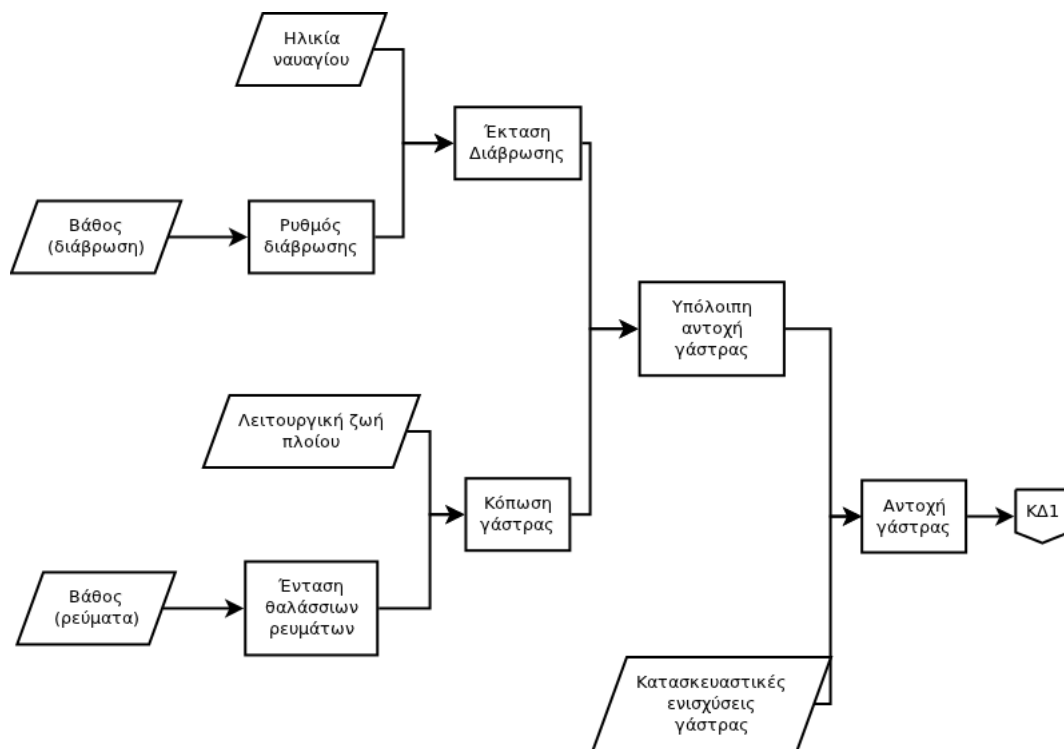
Σχήμα 5.21.: Υποσύστημα για το δυναμικό της ρύπανσης από το φορτίο πετρέλαιο



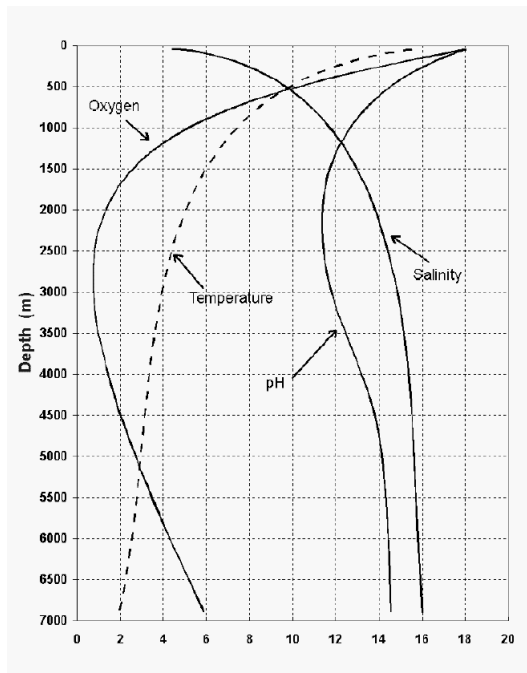
Σχήμα 5.22.: Υποσυστήματα για την εκτίμηση του κινδύνου προσέγγισης του διαρρέοντος πετρελαίου στους κοντινούς στόχους



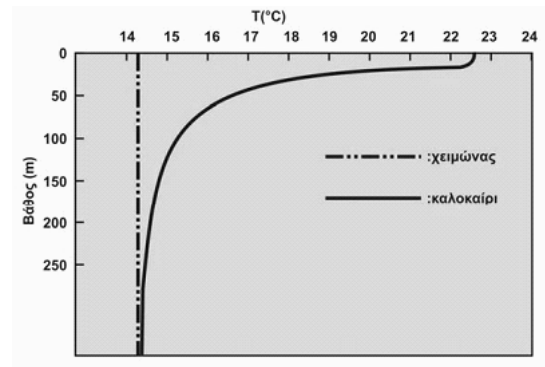
Σχήμα 5.23.: Κλάδος εκτίμησης της επικινδυνότητας για τη διαρροή του πετρελαίου



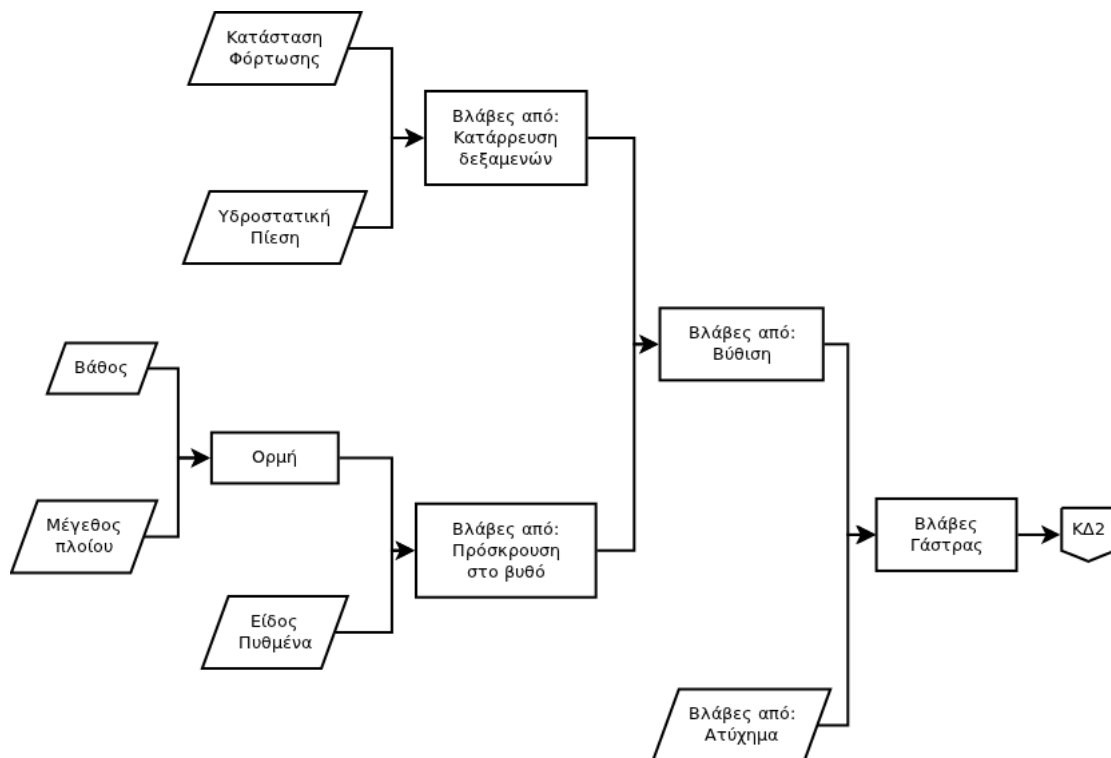
Σχήμα 5.24.: Υποσύστημα εκτίμησης της αντοχής της γάστρας του ναυαγίου



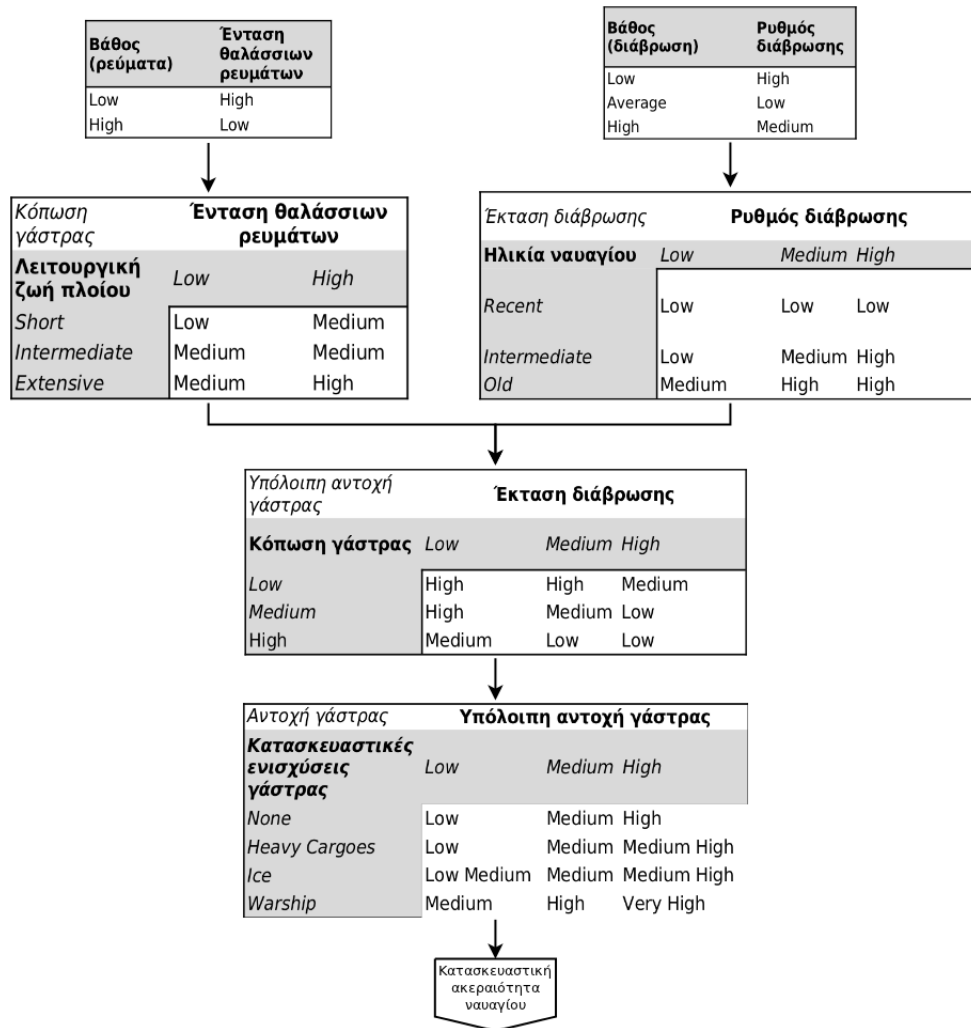
Σχήμα 5.25.: Μεταβολή των ιδιοτήτων του θαλασσινού νερού σε συνάρτηση με το βάθος



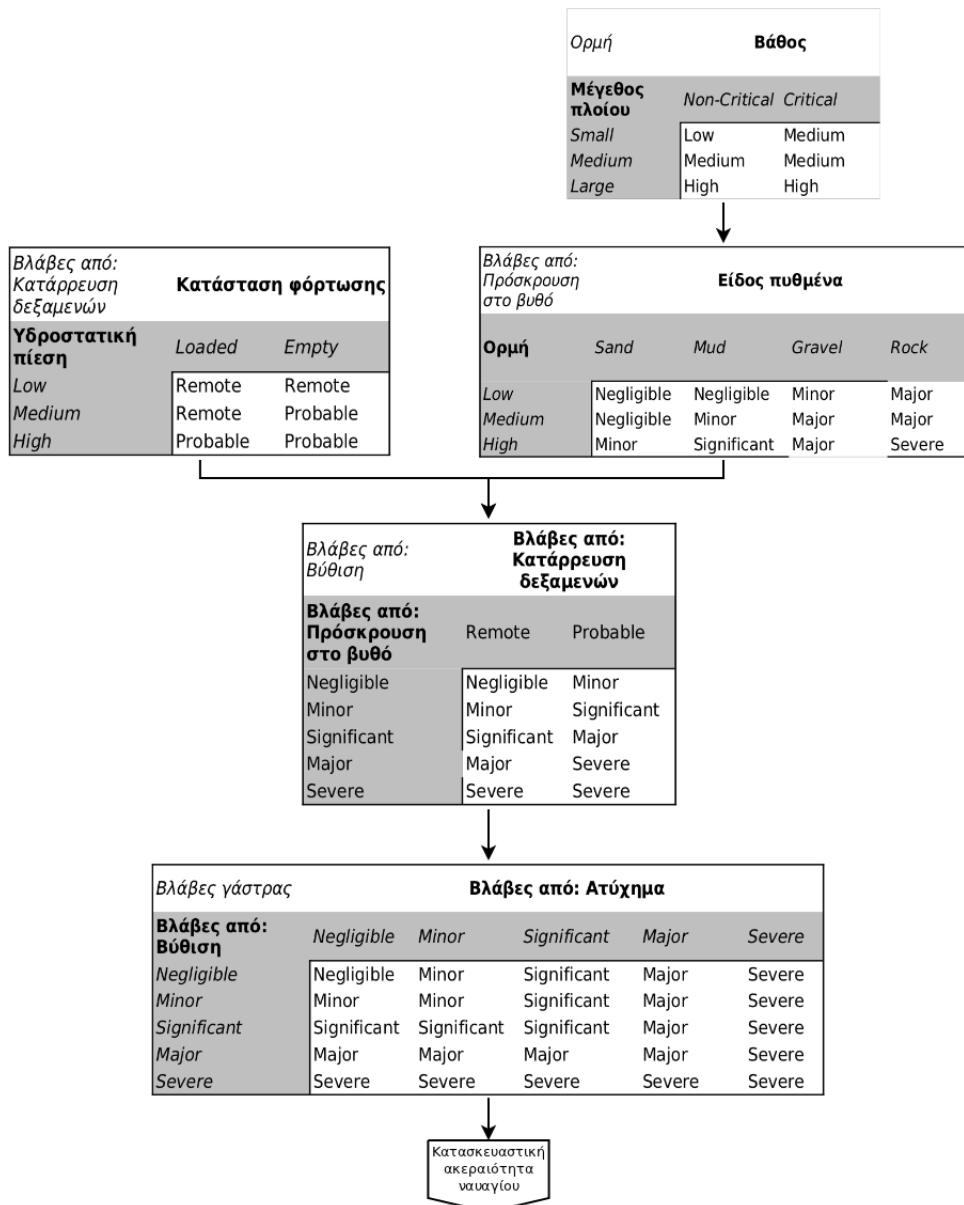
Σχήμα 5.26.: Κατανομή θερμοκρασίας σε συνάρτηση με το βάθος το χειμώνα και το καλοκαίρι στην περιοχή του Αιγαίου



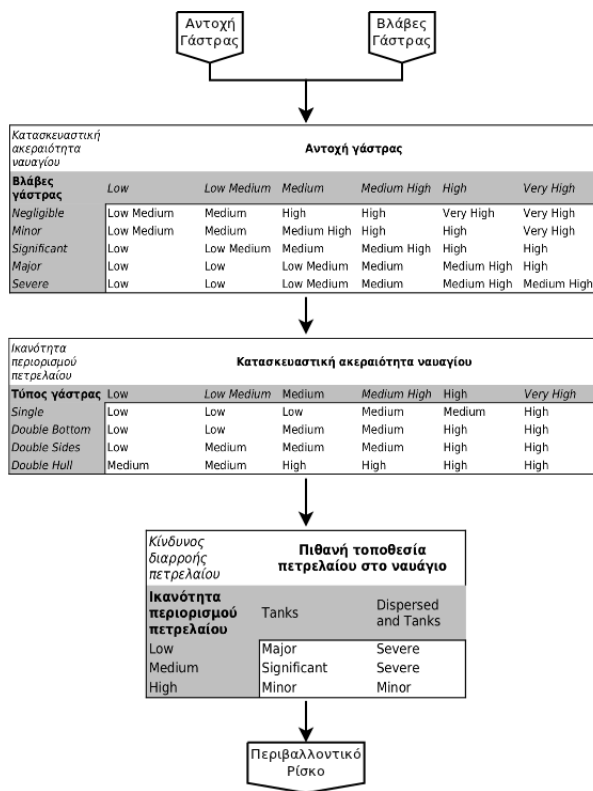
Σχήμα 5.27.: Τποσύστημα αξιολόγησης των βλαβών της γάστρας του ναυαγίου



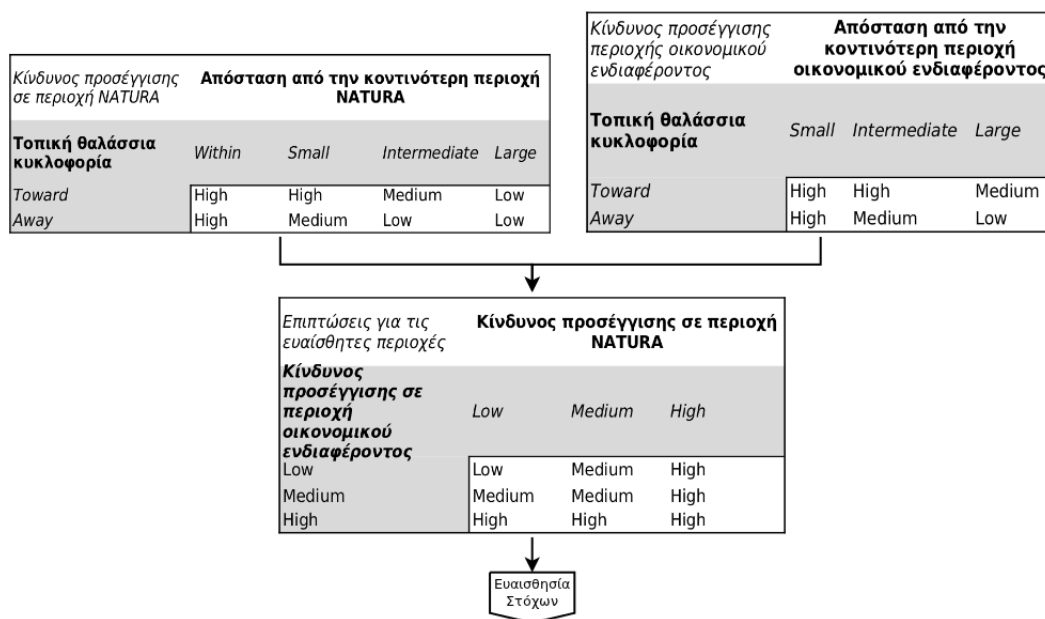
Σχήμα 5.28.: Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης της αντοχής της γάστρας του ναυαγίου



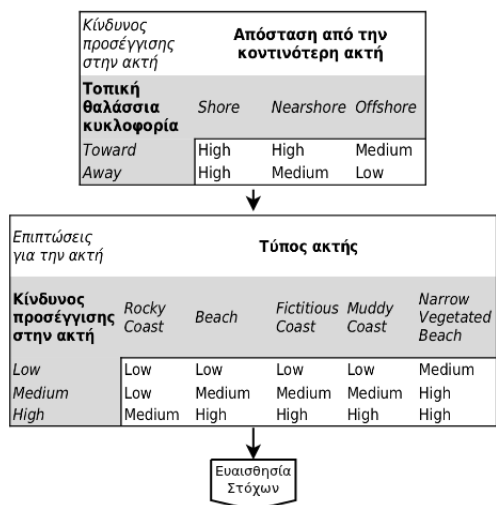
Σχήμα 5.29.: Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης των βλαβών της γάστρας του ναυαγίου



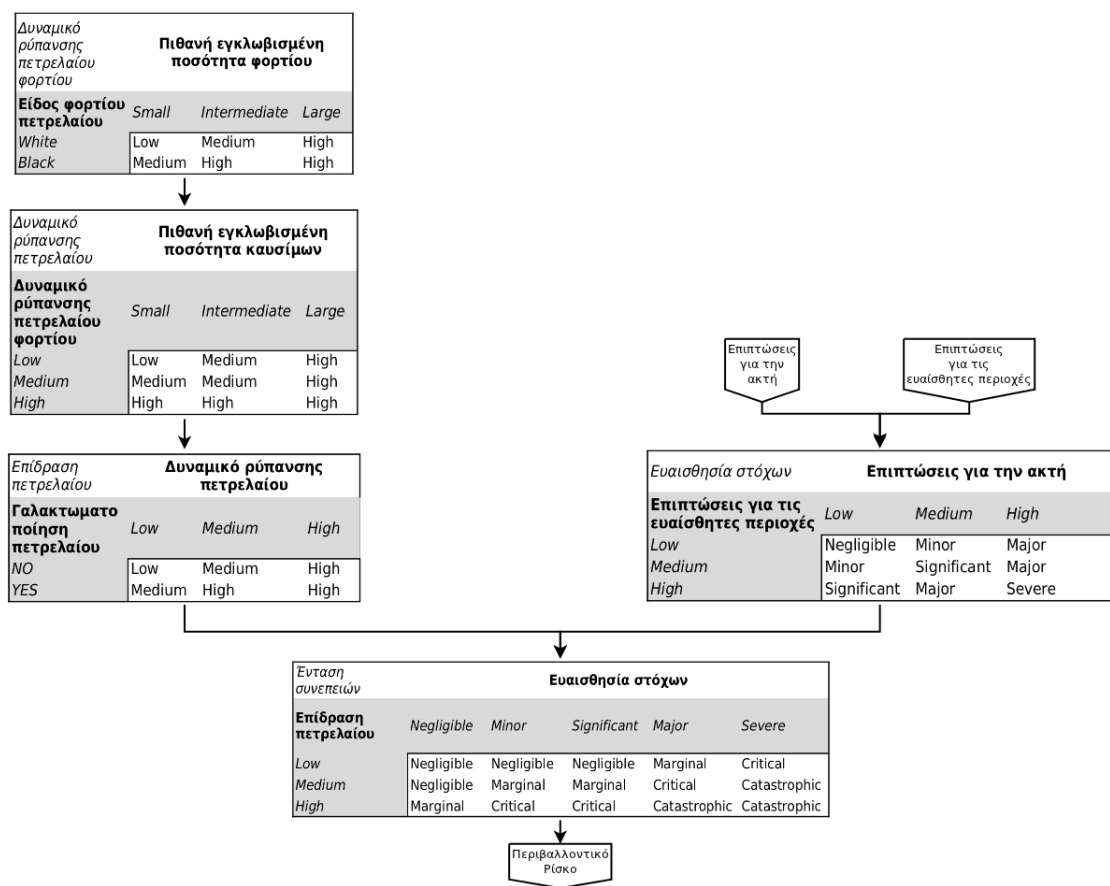
Σχήμα 5.30.: Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης του κινδύνου διαρροής πετρελαίου



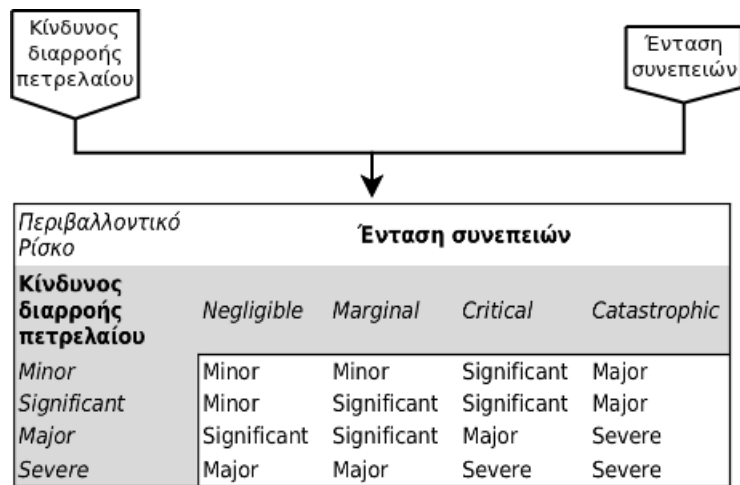
Σχήμα 5.31.: Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης των επιπτώσεων για τις ευαίσθητες περιοχές



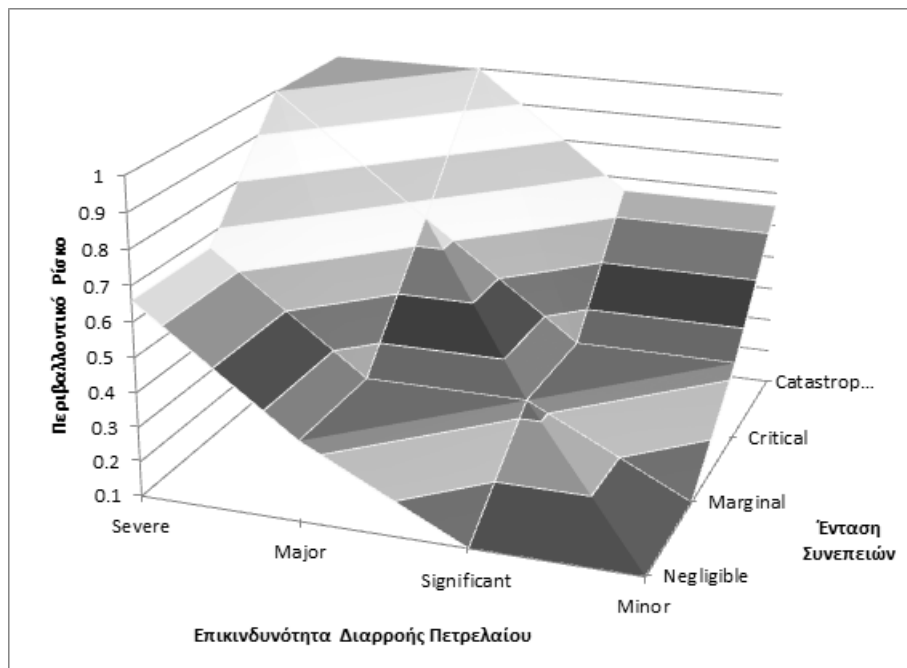
Σχήμα 5.32.: Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης των επιπτώσεων για την ακτή



Σχήμα 5.33.: Κανόνες για το υποσύστημα εκτίμησης της έντασης των συνεπειών



Σχήμα 5.34.: Κανόνες για το υποσύστημα για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου



Σχήμα 5.35.: Επιφάνεια τιμών περιβαλλοντικού ρίσκου

5.5. Ανάλυση αβεβαιότητας

Η ανάλυση αβεβαιότητας αποσκοπεί στον ποσοτικό προσδιορισμό της σχετικής επίδρασης της αβεβαιότητας των μεταβλητών εισόδου επί της αβεβαιότητας του περιβαλλοντικού ρίσκου. Μια τέτοια ανάλυση χρησιμεύει στον προσδιορισμό της απαιτούμενης ακρίβειας για τα δεδομένα εισόδου. Για παράδειγμα, για μια μεταβλητή εισόδου με δεδομένη αβεβαιότητα, η οποία δεν επηρεάζει πολύ το τελικό αποτέλεσμα, δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, ώστε το μοντέλο να εξάγει ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα.

Κατά τη φάση των υπολογισμών των εκτιμήσεων των ποσοτήτων πετρελαίου, η αβεβαιότητα μοντελοποιήθηκε για τις μεταβλητές «πιθανή ποσότητα καυσίμου» και «πιθανή ποσότητα φορτίου», υπολογίζοντας τα όρια ενός διαστήματος αντί για μια σημειακή εκτίμηση. Η ανάλυση αβεβαιότητας έγινε για να μελετηθεί περαιτέρω η επίδραση αυτών των δύο μεταβλητών.

Πηγές αβεβαιότητας

Η αβεβαιότητα που υπάρχει στα δεδομένα εισόδου μπορεί να διακριθεί στις ακόλουθες κύριες κατηγορίες: (1) αβεβαιότητα που οφείλεται σε στατιστικά μοντέλα που έχουμε χρησιμοποιήσει, (2) αβεβαιότητα που οφείλεται στην ποιότητα των πληροφοριών που διαθέτουμε, και (3) αβεβαιότητα που οφείλεται στην ποσότητα των πληροφοριών που χρησιμοποιούμε για την εξαγωγή του αποτελέσματος.

1. Αβεβαιότητα που οφείλεται στα στατιστικά μοντέλα που έχουμε χρησιμοποιήσει.

Αυτός ο τύπος αβεβαιότητας εμφανίζεται στη διαδικασία εκτίμησης της πιθανής ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου (Ενότητα 5.3). Ο υπολογισμός της ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου στηρίζεται στη χρήση του λόγου καύσιμα προς DWT, που έχει προκύψει στατιστικά από την ανάλυση κατάλληλων στατιστικών δειγμάτων. Κατόπιν χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης στο [46] για τον υπολογισμό ενός διαστήματος εκτίμησης για κάθε ναυάγιο.

2. Αβεβαιότητα που οφείλεται στην ποιότητα πληροφοριών.

Η φάση της συλλογής των δεδομένων βασίζεται στη συλλογή πληροφοριών που καταγράφονται σε έναν αριθμό διαφορετικών πηγών. Πολλές φορές αυτές οι πληροφορίες δεν είναι αξιόπιστες οπότε υπάρχει αβεβαιότητα για την ορθότητά τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι πληροφορίες για τις λεπτομέρειες του ατυχήματος καθώς και την κατάσταση του πλοίου τη στιγμή της βύθισης, οι οποίες βασίζονται πολλές φορές σε μαρτυρίες που έχουν μικρή αξιοπιστία²³.

Στίγμα του ναυαγίου. Η πραγματική θέση ενός ναυαγίου μπορεί να είναι διαφορετική σε σχέση με την τελευταία αναφερθείσα που έχει καταγραφεί στις διάφορες πηγές. Ανάλογα λοιπόν με τις πληροφορίες στις οποίες βασιζόμαστε υπάρχει αβεβαιότητα ως προς την πραγματική τοποθεσία του ναυαγίου. Η πηγή αυτού του προβλήματος είναι η ελλιπής ή λανθασμένη καταγραφή της πληροφορίας ή ακόμα και περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα μια πιθανή, αλλά άγνωστη, μετατόπιση του ναυαγίου από ρεύματα. Ο μόνος ασφαλής τρόπος να προσδιορίσουμε την τοποθεσία του ναυαγίου είναι ο εντοπισμός και η καταγραφή των συντεταγμένων της θέσης του (wreck survey).

²³ Μερικοί από τους λόγους για τους οποίους η αξιοπιστία των μαρτυριών είναι μικρή είναι η σύγχυση που επικρατεί κατά το ατύχημα, και ο ανθρώπινος παράγοντας γενικότερα.

Η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει την πληροφορία της θέσης του ναυαγίου μεταφέρεται και σε όλες τις μεταβλητές που εξαρτώνται άμεσα από αυτή. Οι μεταβλητές που επηρεάζονται είναι το βάθος όπου βρίσκεται το ναυάγιο, η υδροστατική πίεση στο ίδιο βάθος, ο τύπος του πυθμένα στην περιοχή, ο τύπος της κοντινότερης ακτής στη θέση του ναυαγίου και η κατεύθυνση της θαλάσσιας κυκλοφορίας στην περιοχή.

Λοιπές πληροφορίες. Αβεβαιότητα που οφείλεται σε ελλιπή ή λανθασμένη καταγραφή υπάρχει επίσης στις ομάδες πληροφοριών που αφορούν τα χαρακτηριστικά του ναυαγίου²⁴, τις λεπτομέρειες του ατυχήματος²⁵ και την κατάσταση του παγιδευμένου πετρελαίου στο ναυάγιο²⁶.

3. Ποσότητα των πληροφοριών

Ένα από τα πλεονεκτήματα στη χρήση συστημάτων ασαφούς λογικής είναι η ικανότητά τους να εξάγουν συμπεράσματα με ελλιπείς και ασαφείς πληροφορίες. Επομένως δεν χρειάζεται να έχουμε ένα πλήρες σύνολο πληροφοριών για κάθε ναυάγιο για την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου. Αυτή η δυνατότητα, δηλαδή η χρήση ενός υποσυνόλου των απαιτούμενων πληροφοριών για την εξαγωγή ενός αποτελέσματος, εισάγει άλλον ένα παράγοντα αβεβαιότητας. Η αβεβαιότητα έγκειται στην πιθανότητα να εξάγονται διαφορετικά αποτελέσματα σε σύγκριση με την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται το πλήρες σύνολο πληροφοριών. Για αυτό το σκοπό σε κάθε μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο σύστημα ασαφούς λογικής προστέθηκε ένα ασαφές σύνολο με singleton συνάρτηση συμμετοχής για την ένδειξη έλλειψης της συγκεκριμένης πληροφορίας. Με αυτό τον τρόπο κάθε αποτέλεσμα μπορεί να συνοδεύεται από ένα δείκτη «αξιοπιστίας», για την πληρότητα του συνόλου πληροφοριών που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του. Στην παρούσα ανάλυση, για το μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων χρησιμοποιήθηκε σύνολο δεδομένων εισόδου με πληρότητα 60-65%.

Μεθοδολογία

Στην παρούσα ανάλυση αβεβαιότητας θα μελετηθεί η επίδραση της αβεβαιότητας που συνοδεύει τις μεταβλητές εισόδου «πιθανή ποσότητα καυσίμων» και «πιθανή ποσότητα φορτίου πετρελαίου».

Η αβεβαιότητα του λόγου καύσιμα προς DWT μοντελοποιείται με τη χρήση κατάλληλων κατανομών πιθανότητας. Η προαπαίτηση για την ανάλυση είναι ότι το DWT είναι γνωστό για κάθε ναυάγιο. Επίσης, οι τιμές όλων των υπολοίπων μεταβλητών θεωρούνται γνωστές και σταθερές. Επομένως, η αβεβαιότητα που εξετάζεται στην παρούσα ανάλυση είναι αυτή που οφείλεται στα στατιστικά μοντέλα του λόγου καύσιμα προς DWT που έχουμε χρησιμοποιήσει κατά τη διαδικασία εκτίμησης των πιθανών ποσοτήτων εγγλωβισμένου πετρελαίου.

Η θεωρία της ασαφούς λογικής υποθέτει τη χρήση ασαφών ή ελλιπών, αλλά όχι αβέβαιων, δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι τα συστήματα ασαφούς λογικής με ιεραρχική δομή δέχονται στην είσοδό τους αριθμητικές τιμές, αλλά όχι κατανομές πιθανοτήτων. Επομένως, πρέπει οι κατανομές πιθανότητες για τις μεταβλητές εισόδου να προσομοιωθούν ώστε να εφαρμοστεί η ανάλυση. Ο τύπος που επιλέχθηκε για την προσομοίωση είναι η μέθοδος Monte Carlo.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την ανάλυση της αβεβαιότητας αναφέρονται στην προσεχή λίστα:

²⁴ Τα χαρακτηριστικά, στα οποία γίνεται αναφορά, είναι τα ακόλουθα: ημερομηνία κατασκευής, κατασκευαστικές ενισχύσεις γάστρας, μέγεθος πλοίου, είδος γάστρας και τύπος φορτίου πετρελαίου.

²⁵ Οι λεπτομέρειες του ατυχήματος περιλαμβάνουν την ημερομηνία βύθισης, την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου πριν το ατύχημα και έκταση των βλαβών στη γάστρα που προκλήθηκαν από το ατύχημα.

²⁶ Πιθανή θέση του πετρελαίου στο ναυάγιο και αν αυτό έχει υποστεί γαλακτωματοποίηση.

1. Προσδιορισμός θεωρητικών κατανομών πιθανότητας για το λόγο καύσιμα προς DWT.
2. Προσομοίωση κατανομών πιθανότητας για τις μεταβλητές, για κάθε ναυάγιο.
3. Εφαρμογή μοντέλου με δειγματοληψία από κατανομές πιθανότητας.
4. Στατιστική ανάλυση των κατανομών συχνότητας που προκύπτουν.

Στο βήμα 1 προσαρμόζονται θεωρητικές κατανομές πιθανοτήτων (distribution fitting) στις στατιστικές κατανομές συχνότητας του λόγου καύσιμα προς DWT για κάθε κατηγορία πλοίου (Ενότητα 5.3).

Στο βήμα 2 εφαρμόστηκε προσομοίωση Monte Carlo για τον προσδιορισμό των κατανομών πιθανότητας των μεταβλητών «καύσιμα» και «φορτίο πετρέλαιο» για κάθε ναυάγιο.

Στο βήμα 3 εφαρμόστηκε μια δεύτερη προσομοίωση Monte Carlo για τον προσδιορισμό των κατανομών συχνότητας του περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναυάγιο. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε ένα κύκλο των 1,000 επαναλήψεων.

Στο βήμα 4 υπολογίζεται ο Δείκτης Ποιοτικής Μεταβλητότητας (Index of Qualitative Variation)²⁷ και η συχνότερη τιμή (mode) για κάθε κατανομή συχνότητας ρίσκου που προκύπτει από το βήμα 3.

Η σχετική επίδραση των δύο μεταβλητών προσδιορίστηκε από την εξέταση του υποσύνολου των πετρελαιοφόρων πλοίων. Αυτό είναι αναγκαίο γιατί μόνο τα πετρελαιοφόρα πλοία μεταφέρουν τόσο καύσιμα όσο και πετρέλαιο, και επομένως η σύγκριση της επίδρασης των μεταβλητών μπορεί να γίνει μόνο για αυτή την κατηγορία πλοίων. Αποτελέσματα της ανάλυσης για το υποσύνολο των μη-πετρελαιοφόρων πλοίων θα παρουσιαστούν ξεχωριστά.

Πίνακας 5.16.: Παράμετροι θεωρητικών κατανομών κατά τύπο πλοίου

Τύπος πλοίου	Θεωρητική κατανομή	μ	σ^2
Bulk Carrier	LogLogistic	0.077	0.053
Cable Layer	Triangular	0.208	0.096
Containers	LogLogistic	0.090	0.024
General Cargo	LogLogistic	0.077	0.053
Passenger/Cruise	LogLogistic	0.426	0.226
All Other Passenger	LogLogistic	0.210	0.191
Tankers	Lognormal	0.059	0.040

Η προσομοίωση εφαρμόστηκε τρεις φορές για κάθε υποσύνολο που εξετάζεται. Στο πρώτο τρέξιμο γίνεται δειγματοληψία μόνο από την κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής «φορτίο πετρέλαιο», στο δεύτερο η αντίστοιχη διαδικασία γίνεται μόνο για τη μεταβλητή «καύσιμα» και στο τρίτο τρέξιμο γίνεται δειγματοληψία ταυτόχρονα για τις δύο μεταβλητές.

²⁷ Ο Δείκτης Ποιοτικής Μεταβλητότητας (Index of Qualitative Variation) αποτελεί μέτρο διασποράς για κατανομές τιμών κατηγορικών μεταβλητών. Ορίζεται ως το ποσοστό της μεταβλητότητας που παρατηρείται σε μια κατανομή σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή μεταβλητότητα που θα μπορούσε να υπάρξει στην ίδια κατανομή. Ο δείκτης παίρνει τιμές από 0, στην περίπτωση που όλες οι τιμές ανήκουν σε μια κατηγορία, έως και 1, στην περίπτωση κατά την οποία οι τιμές της κατηγορικής μεταβλητής ισοκατανέμονται στις διάφορες κατηγορίες. Ο υπολογισμός του δείκτη έγινε σύμφωνα με την Σχέση 5.5.1

$$IQV = \frac{K}{K-1} \left(1 - \sum_{i=1}^K p_i^2 \right) \quad (5.5.1)$$

όπου K είναι ο αριθμός των κατηγοριών της μεταβλητής και $p_i = \frac{f_i}{N}$ είναι το ποσοστό των παρατηρήσεων που ανήκουν στην κατηγορία i . Ο παράγοντας $\frac{K}{K-1}$ χρησιμοποιείται για την κανονικοποίηση του δείκτη στο διάστημα $[0, 1]$.

Αυτή η στρατηγική ακολουθήθηκε για να απομονωθεί η επίδραση στην αβεβαιότητα της κάθε μεταβλητής ξεχωριστά.

Ο προσδιορισμός των θεωρητικών κατανομών πιθανότητας στο βήμα 1 έγινε με τη χρήση του λογισμικού πακέτου @RISK μέσω της μεθόδου της εκτίμησης παραμέτρων (parameter estimation). Στον Πιν. 5.16 δίδονται οι παράμετροι, δηλαδή ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση, των θεωρητικών κατανομών πιθανότητας που προσαρμόστηκαν στις αντίστοιχες κατανομές συχνότητας, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Για την εκτίμηση της ποιότητας του προσδιορισμού των θεωρητικών κατανομών πιθανότητας χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό μέγεθος χ^2 .

6. Αποτελέσματα

6.1. Βάση δεδομένων

Η βάση δεδομένων περιέχει 402 καταγραφές πλοίων που ναυάγησαν στο διάστημα από το έτος 1940 έως και το 2009 και τα οποία υπόκεινται στους περιορισμούς που τέθηκαν στην ενότητα 5.2.

Η πληρότητα της βάσης δεδομένων ορίζεται ως ο λόγος των πληρωμένων κελιών προς το άθροισμα των πληρωμένων και κενών κελιών. Η πληρότητα για τη βάση δεδομένων είναι περίπου 63%. Αυτό υποδεικνύει μια έλλειψη πληροφοριών, η οποία εν μέρει οδήγησε στην ανάπτυξη του υπολογιστικού μοντέλου ασαφούς λογικής.

Περίπου το 60% των περιπτώσεων αποτελείται από πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.3α'. Ακολουθούν τα επιβατηγά, στα οποία περιλαμβάνονται και πλοία ΕΓ/ΟΓ, με ποσοστό περίπου 16%, τα πολεμικά πλοία με ποσοστό περίπου 15% και τα πετρελαιοφόρα με ποσοστό περίπου 7%. Οι υπόλοιπες κατηγορίες αποτελούν, αθροιστικά, περίπου το 2% της βάσης δεδομένων. Όπως φαίνεται στο Σχ. 6.4α', τα εμπορικά πλοία αποτελούν το 85% της βάσης δεδομένων ενώ τα πολεμικά το 15%. Τα εμπορικά μη πετρελαιοφόρα πλοία αποτελούν το 78% της βάσης δεδομένων, τα εμπορικά πετρελαιοφόρα πλοία το 7%, ενώ η κατηγορία των πολεμικών πλοίων δεν περιέχει κανένα πετρελαιοφόρο.

Η πλειοψηφία των πλοίων έχουν βυθιστεί κατά τη δεκαετία 1940 - 1950, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.2. Αυτά αφορούν κυρίως απώλειες σε πολεμικές επιχειρήσεις κατά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και αποτελούνται τόσο από πολεμικά όσο και από εμπορικά πλοία, που είχαν επιταχθεί για διάφορες αποστολές υποστήριξης. Οι απώλειες των εμπορικών επιταγμένων πλοίων είναι περισσότερες από αυτές των πολεμικών σκαφών. Στο Σχ. 6.8 φαίνεται η γεωγραφική κατανομή και το αντίστοιχο ιστόγραμμα για την ηλικία των ναυαγίων, σύμφωνα με τις κατηγορίες που έχουν οριστεί για την αντίστοιχη ασαφή μεταβλητή. Από αυτό προκύπτει ότι τα περισσότερα ναυάγια είναι παλαιά, δηλαδή με ηλικία μεγαλύτερη των 40 ετών.

Η κατανομή των ναυαγίων σύμφωνα με τη σημαία στην οποία ήταν εγγεγραμμένα φαίνεται στο Σχ. 6.1. Η πλειοψηφία των ναυαγίων, περίπου 42%, είχαν Ελληνική σημαία. Οι επικρατούσες σημαίες που ακολουθούν είναι της Ιταλίας (17%), του Ηνωμένου Βασιλείου (8.5%), της Γερμανίας (7%), και του Παναμά (4%). Το υπόλοιπο 21.5% των ναυαγίων κατανέμονται σε μια πληθώρα σημαιών, γεγονός που υποδεικνύει την αυξημένη κίνηση πλοίων που διασχίζει τα Ελληνικά χωρικά ύδατα.

Στο Σχ. 6.4β' φαίνεται η κατανομή των περιπτώσεων ανάλογα με το είδος του ατυχήματος που προκάλεσε τη βύθιση του πλοίου. Το κυριότερο είδος ατυχήματος που εμφανίζεται στη βάση δεδομένων είναι η απώλεια πολέμου σε ποσοστό 54%. Σε ποσοστό 24% οι βυθίσεις των πλοίων είχαν ως αιτία την εισροή υδάτων λόγω αντίξωων καιρικών συνθηκών. Στο Σχ. 6.5 φαίνεται η γεωγραφική κατανομή και το αντίστοιχο ιστόγραμμα για τα είδη των ατυχημάτων, σύμφωνα με τις κατηγορίες που έχουν οριστεί για την αντίστοιχη ασαφή μεταβλητή.

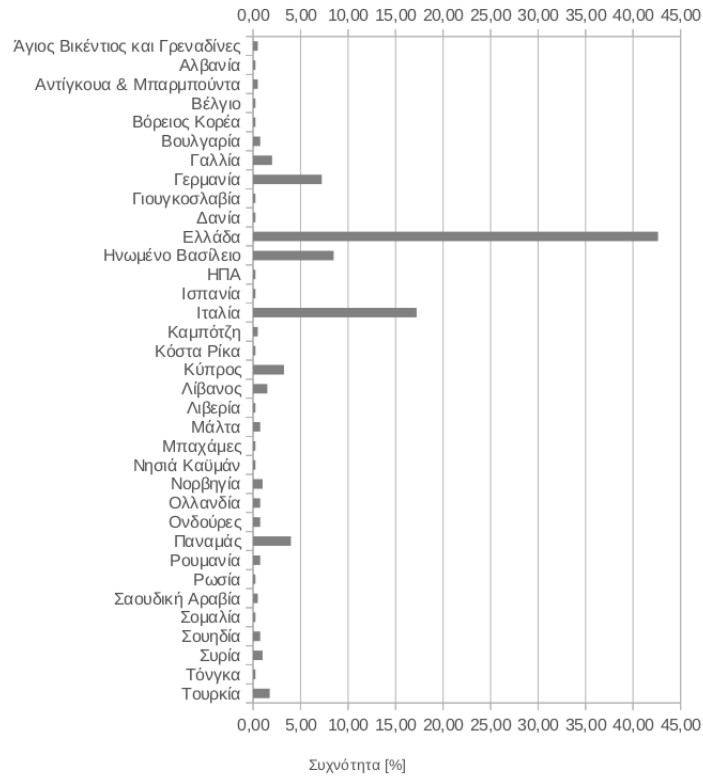
Τα περισσότερα πλοία στη βάση δεδομένων, όταν ναυάγησαν, είχαν λειτουργική ζωή μικρής διάρκειας, δηλαδή έως 25 έτη, ενώ ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτών (\approx 2%) είχε εκτεταμένη λειτουργική ζωή, δηλαδή μεγαλύτερη από 50 έτη (Σχ. 6.6). Όσον αφορά το

μέγεθος, η πλειοψηφία των ναυαγίων είναι μεσαίου μεγέθους, το οποίο σημαίνει ότι έχουν μήκη (L_{BP}) από 50 - 150 m (Σχ. 6.7).

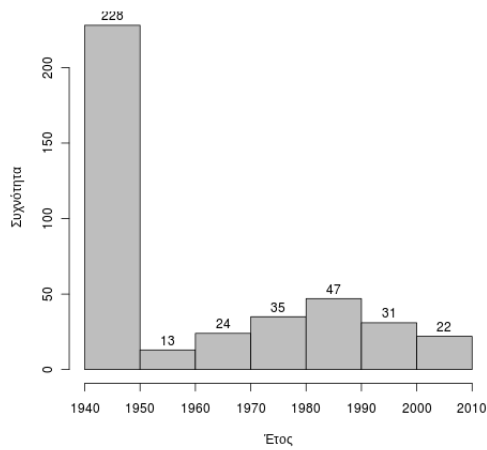
Στο Σχ. 6.10 φαίνεται η κατανομή των ναυαγίων στο γεωγραφικό χώρο με κριτήρια την κατηγορία και λειτουργία πλοίου καθώς και το ιστόγραμμα των βαθών, όπου βρίσκεται το καθένα. Από αυτό προκύπτει ότι τα περισσότερα ναυάγια ($\approx 77\%$) βρίσκονται σε βάθη μικρότερα των 500 m. Το 45% των περιπτώσεων βρίσκεται μέσα στα όρια των παράκτιων περιοχών όπως αυτές ορίζονται στο Σχ. 6.9, ενώ το 82% των περιπτώσεων απέχει από την κοντινότερη ακτή απόσταση μικρότερη των 10 nm.

Τέλος στο Σχ. 6.11 φαίνεται η συγκέντρωση ανά μονάδα επιφάνειας των ναυαγίων. Ένα μεγάλο ποσοστό ($\approx 28\%$) των ναυαγίων τοποθετούνται στο Αιγαίο Πέλαγος. Ακολουθεί το Ιόνιο Πέλαγος και ο Σαρωνικός Κόλπος με ποσοστό περίπου 17% και το Κρητικό Πέλαγος και το Αρχιπέλαγος των Κυκλάδων με περίπου 10%. Από το ίδιο σχήμα, γίνεται σαφές ότι ο Σαρωνικός Κόλπος διαθέτει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ναυαγίων, 10 - 19 ναυάγια ανά μονάδα επιφάνειας, αν μάλιστα το αποτέλεσμα συγκριθεί με το μέγεθος της περιοχής. Στην περιοχή επίσης βρίσκεται το μεγαλύτερο λιμάνι της Ελλάδας, το λιμάνι του Πειραιά.

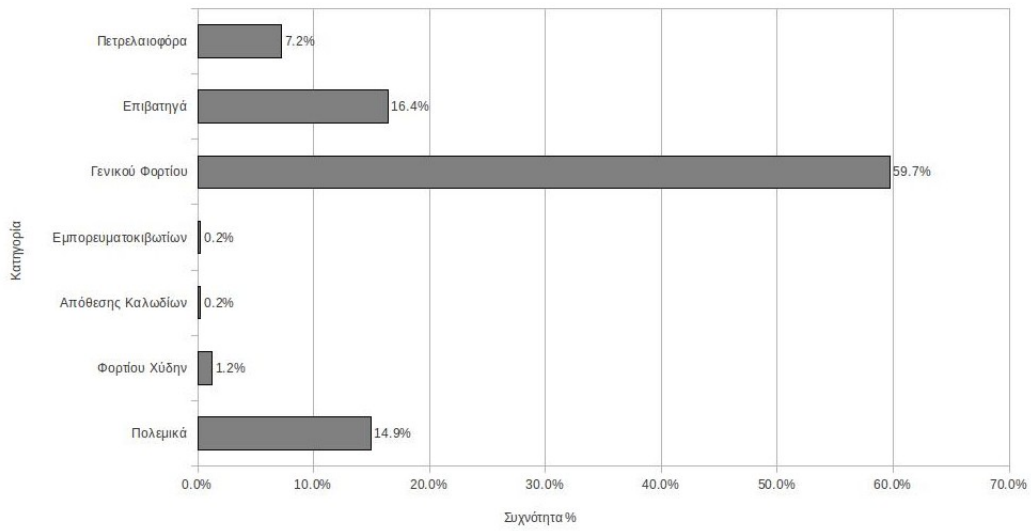
Το 50% των περιπτώσεων που καταγράφονται στη βάση δεδομένων βρίσκονται σε οριζόντια απόσταση μικρότερη των 7 nm από τα όρια μιας προστατευόμενης περιοχής NATURA 2000. Περίπου το 7% αυτών (4% του συνόλου των περιπτώσεων) βρίσκονται μέσα στα όρια μιας προστατευόμενης περιοχής.



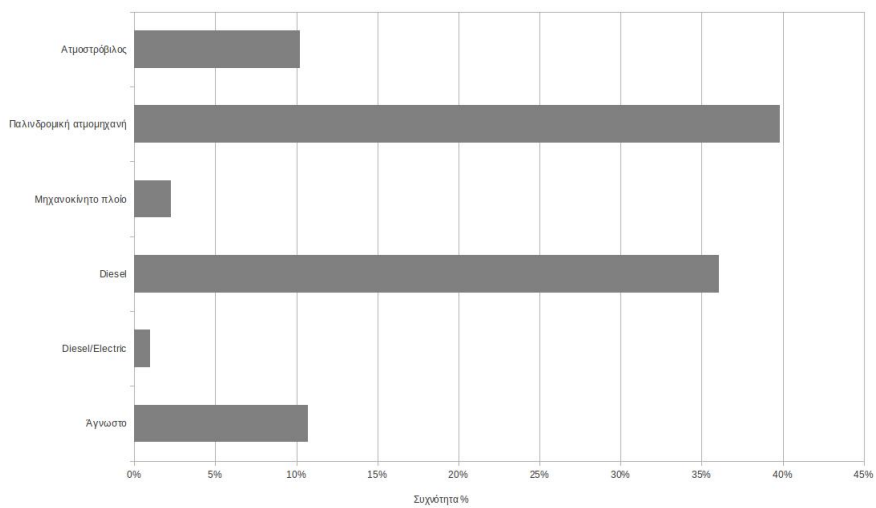
Σχήμα 6.1.: Σημαίες πλοίων



Σχήμα 6.2.: Αριθμός ναυαγίων ανά δεκαετία

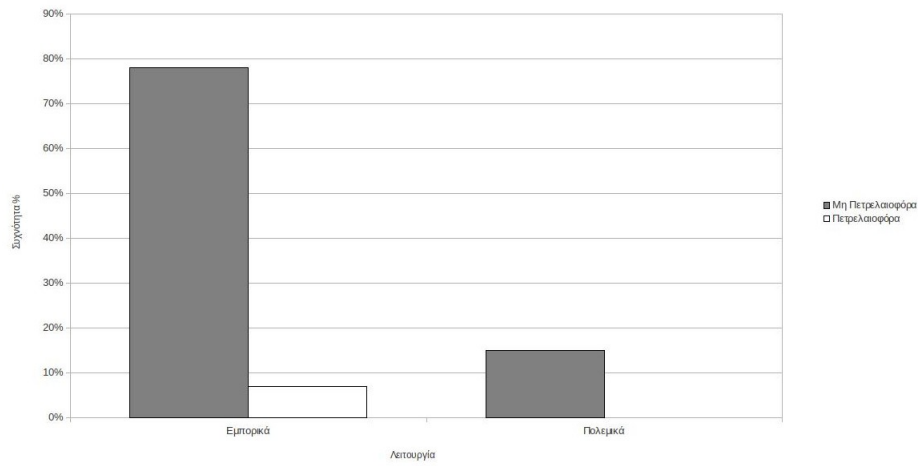


(α') Κατηγορίες

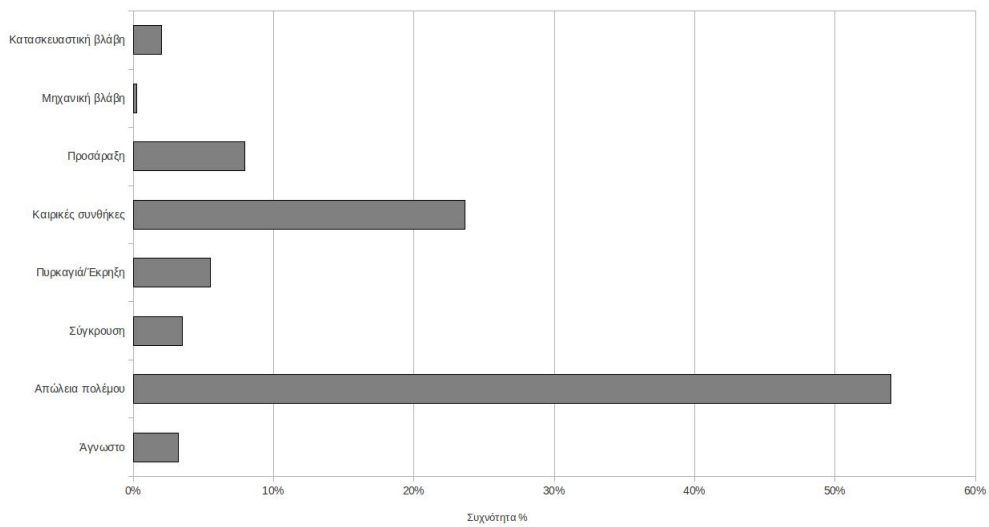


(β') Τύπος προωστήριας εγκατάστασης

Σχήμα 6.3.: Κατανομές πλοίων με διάφορα κριτήρια

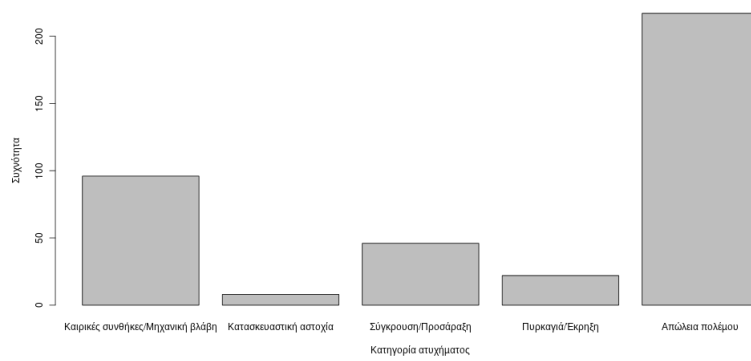
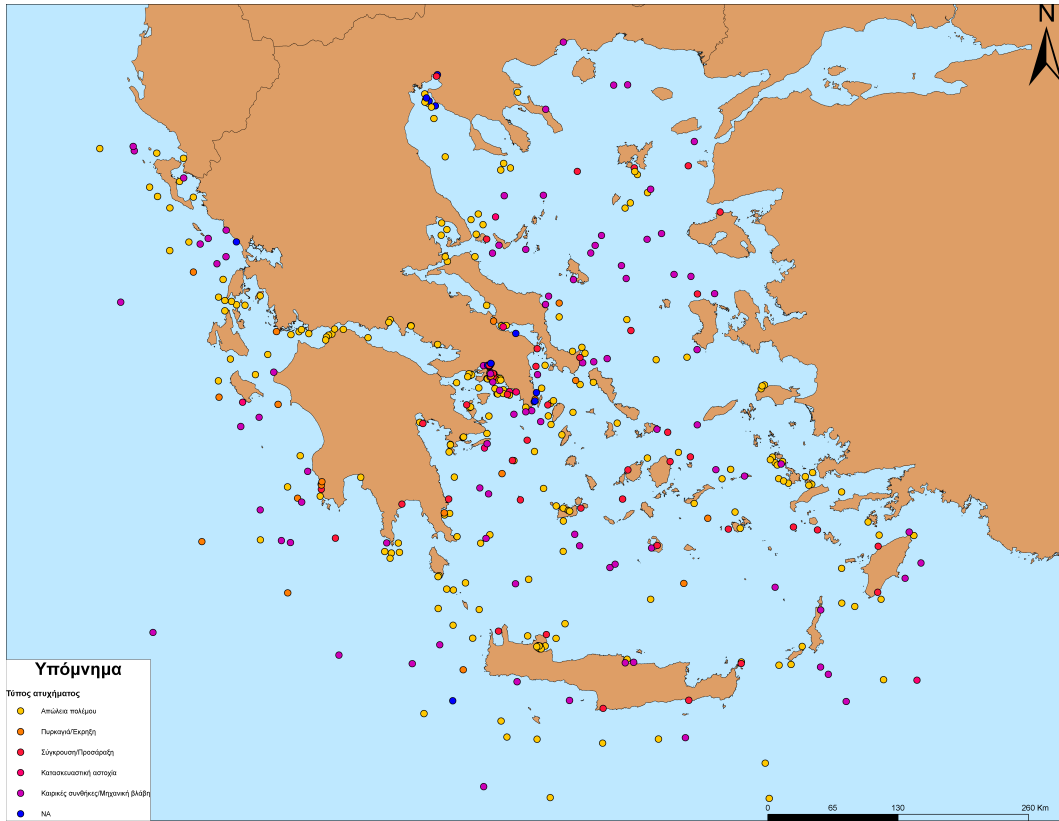


(α') Λειτουργία και τύπος

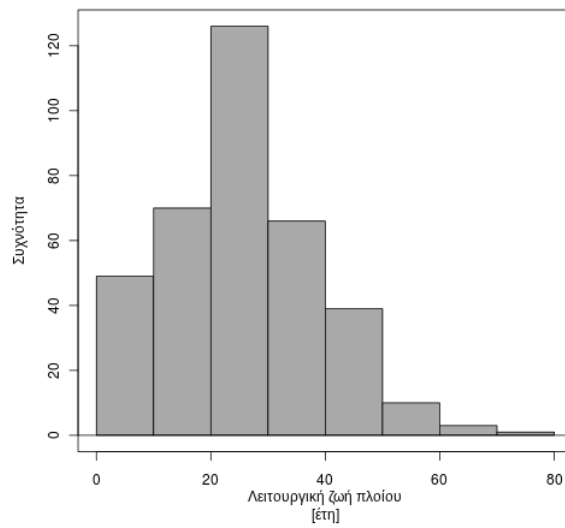


(β') Είδος του ατυχήματος

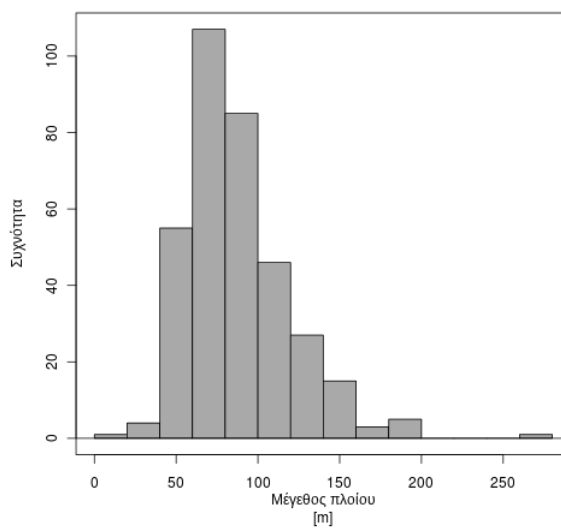
Σχήμα 6.4.: Κατανομές πλοίων με διάφορα κριτήρια



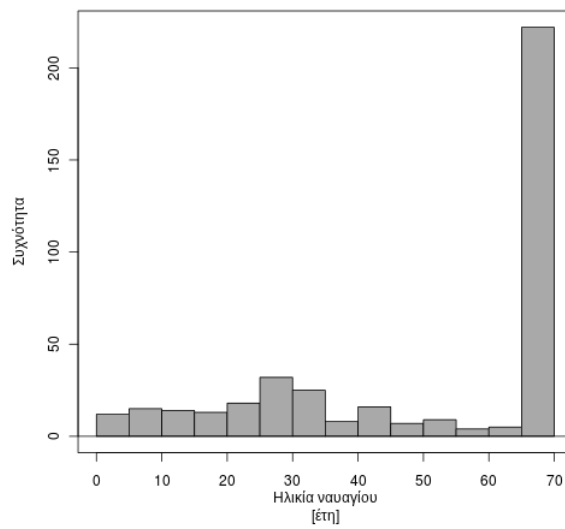
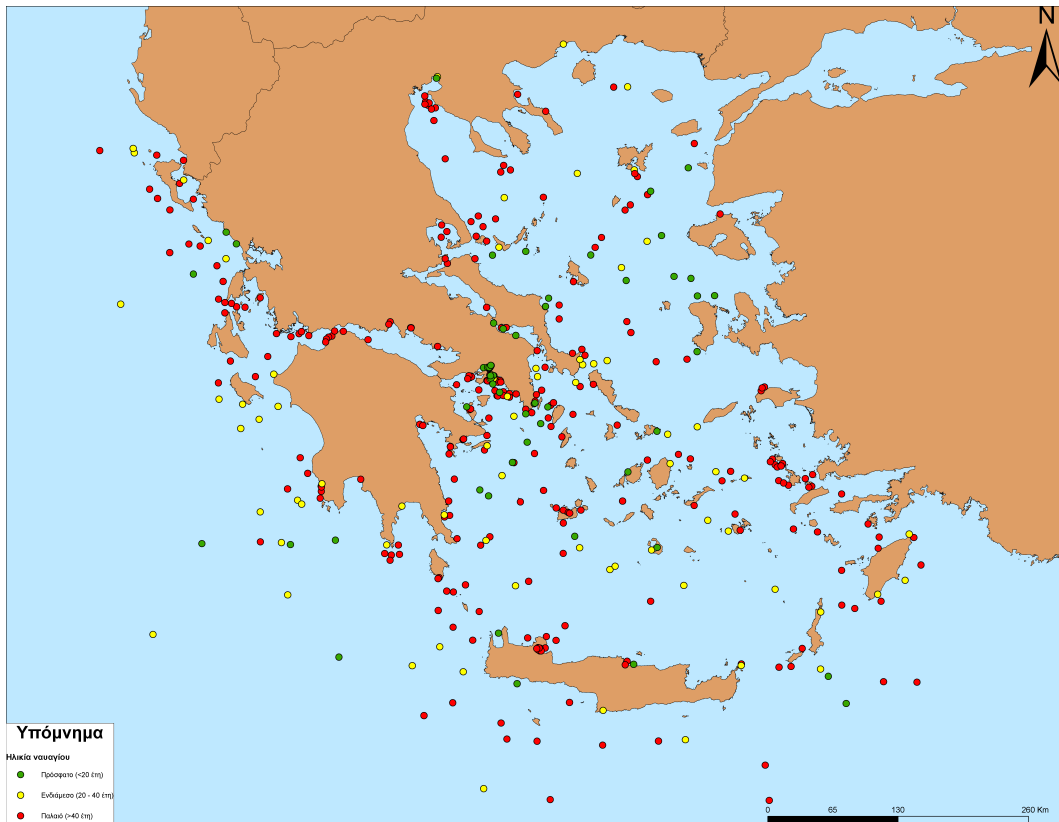
Σχήμα 6.5.: Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο τον τύπο του ατυχήματος



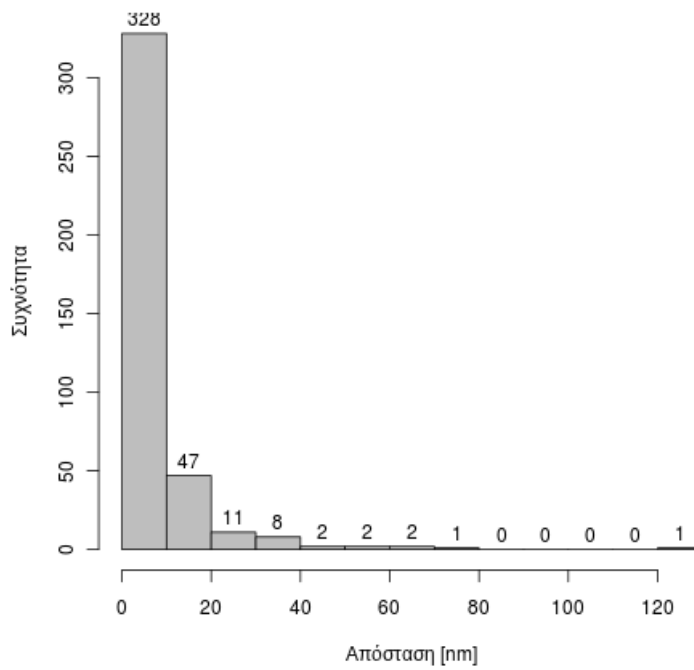
Σχήμα 6.6.: Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο τη διάρκεια λειτουργικής ζωής πριν το ατύχημα



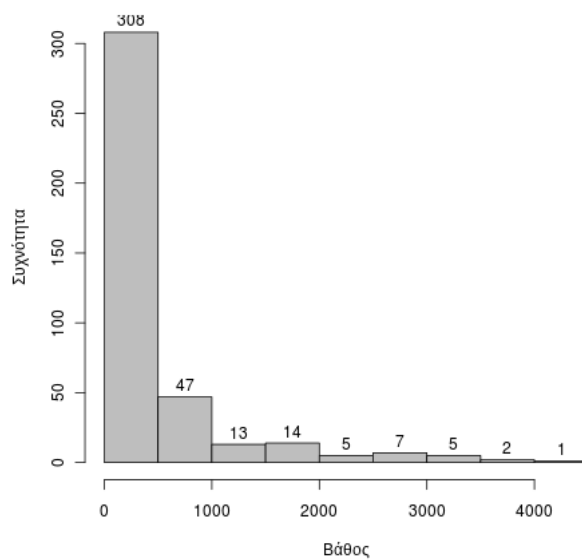
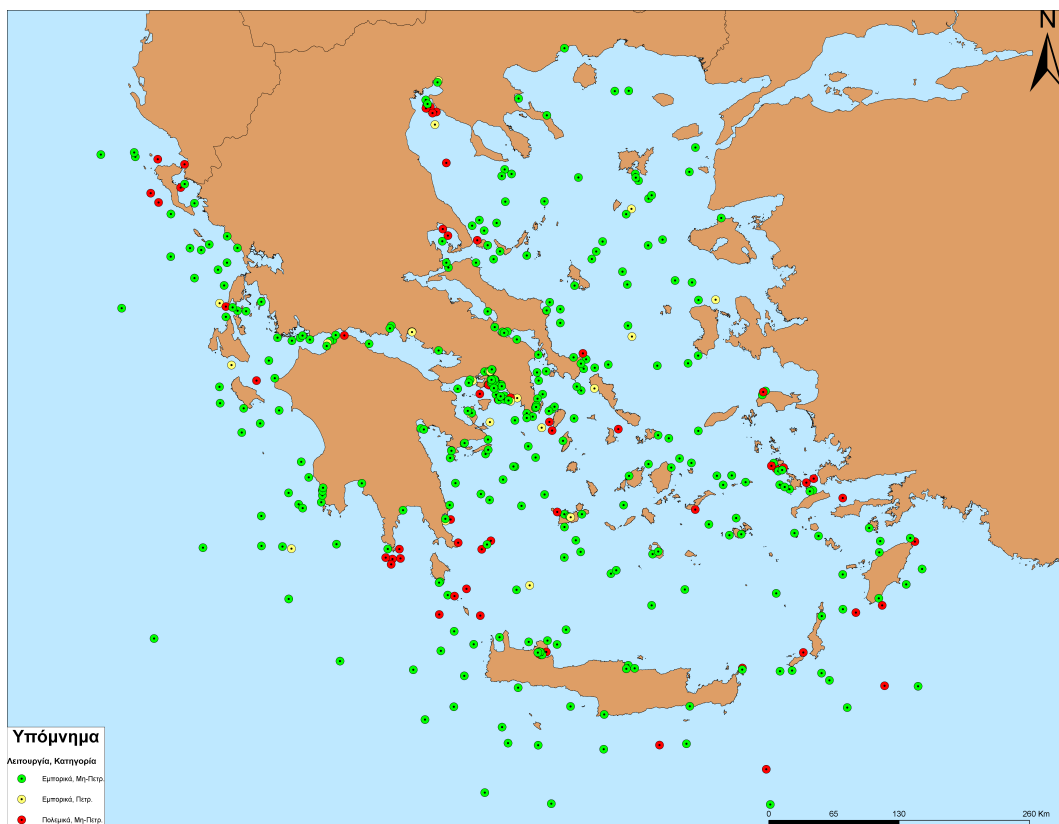
Σχήμα 6.7.: Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο το μέγεθος (μήκος L_{BP})



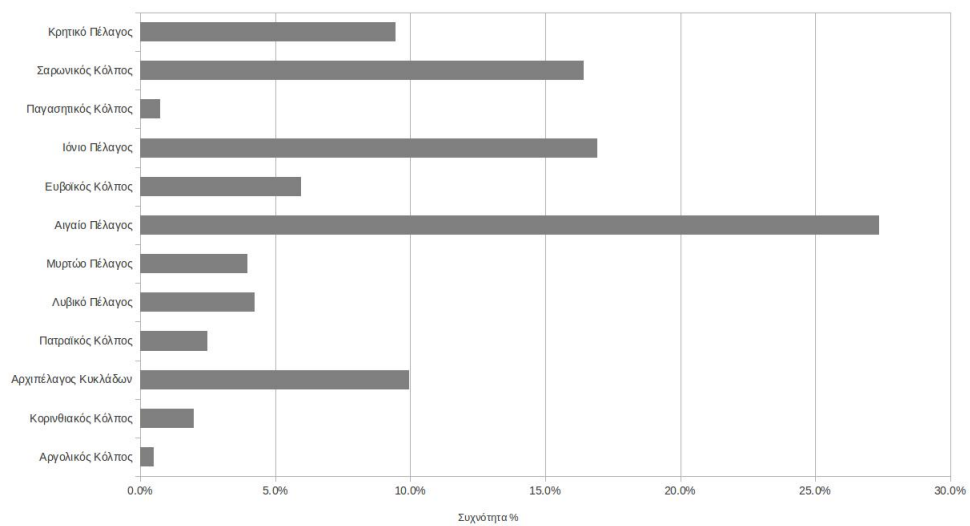
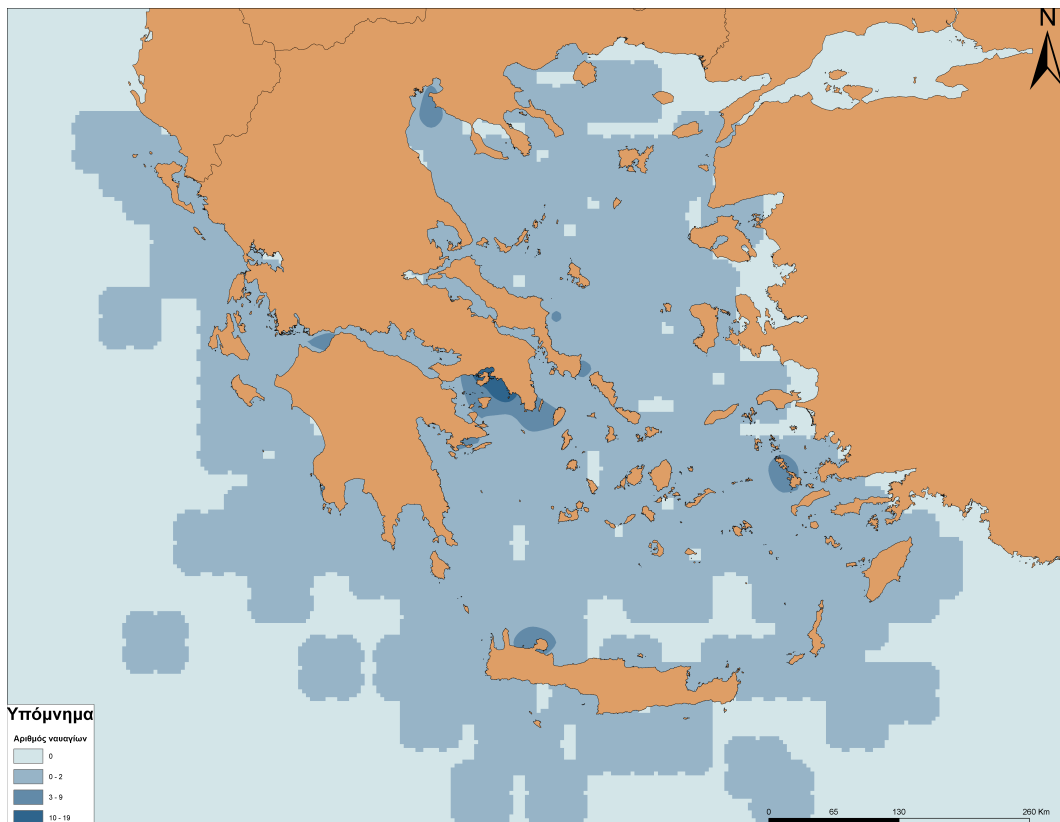
Σχήμα 6.8.: Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο την ηλικία



Σχήμα 6.9.: Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων σε παράλιες περιοχές και ιστόγραμμα οριζόντιας απόστασης από την κοντινότερη ακτή



Σχήμα 6.10.: Γεωγραφική κατανομή ναυαγίων με κριτήριο την κατηγορία και τη λειτουργία και ι-στόγραμμα βαθών όπου βρίσκονται τα ναυάγια



Σχήμα 6.11.: Συγκέντρωση ναυαγίων κατά γεωγραφική περιοχή

6.2. Πιθανή ποσότητα πετρελαίου

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις, που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.3, η συνολική πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου στις Ελληνικές θάλασσες κυμαίνεται από περίπου 18,000 έως 133,000 tons.

Στον Πιν. 6.1 αναγράφονται τα όρια των εκτιμήσεων κατά τύπο πλοίου καθώς και οι αρχικές εκτιμήσεις, για λόγους σύγκρισης, οι οποίες προκύπτουν από το στάδιο πριν την εφαρμογή των συντελεστών για τον υπολογισμό των ορίων του διαστήματος εκτίμησης. Το μεγαλύτερο ποσοστό ($\approx 55\%$) του εγκλωβισμένου πετρελαίου, δηλαδή ποσότητες από 9,500 έως 75,300 tons, συγκεντρώνεται στα πετρελαιοφόρα πλοία. Τα πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου συγκεντρώνουν περίπου το 30% της συνολικής ποσότητας πετρελαίου και το υπόλοιπο 20% κατανέμεται στους άλλους τύπους πλοίων.

Στα Σχ. 6.12α' και 6.12β' φαίνεται η κατανομή του εγκλωβισμένου πετρελαίου ανά πλοίο, με κριτήρια την κατηγορία και τη λειτουργία. Τα πετρελαιοφόρα πλοία συγκεντρώνουν κατά μέσο όρο 2.5 φορές περισσότερο πετρέλαιο ανά πλοίο, σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες πλοίων. Παρότι λοιπόν αποτελούν ένα πολύ μικρό κομμάτι της βάσης δεδομένων ($\approx 7\%$) οι ποσότητες πετρελαίου που είναι πιθανό να περιέχουν είναι σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τους υπόλοιπους τύπους πλοίων. Αντίστοιχα παρατηρούμε ότι τα πολεμικά πλοία συγκεντρώνουν πολύ μικρές, σχετικά με τα εμπορικά πλοία, ποσότητες πετρελαίου ανά πλοίο. Πρέπει να τονιστεί όμως ότι επειδή τα περισσότερα από αυτά βυθίστηκαν κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, είναι πιθανό να έχουν μεγαλύτερο κίνδυνο διαφθοής λόγω της εκτεταμένης παραμονής τους στο βυθό.

Στο Σχ. 6.13 φαίνονται τα ιστογράμματα συχνότητας της ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου, δηλαδή το άθροισμα των καυσίμων και του φορτίου πετρελαίου. Η μορφή αυτών των κατανομών είναι λογαριθμική. Η πλειοψηφία των εκτιμήσεων είναι μικρότερες των 200 tons, τόσο για το κάτω όσο και για το άνω όριο της εκτίμησης. Στα Σχ. 6.15 και 6.16 δίνεται η γεωγραφική κατανομή των σημειακών εκτιμήσεων, όπου οι ποσότητες χωρίζονται σε καύσιμα και φορτίο πετρέλαιο. Οι εκτιμήσεις χωρίζονται σε κατηγορίες σύμφωνα με αυτές που ορίζονται για τις αντίστοιχες ασαφείς μεταβλητές (βλ. Παρ. 5.4). Στο Σχ. 6.17 δίνεται η γεωγραφική συγκέντρωση της συνολικής εγκλωβισμένης ποσότητας πετρελαίου, όπου οι περιοχές με μαύρο χρώμα είναι αυτές με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση.

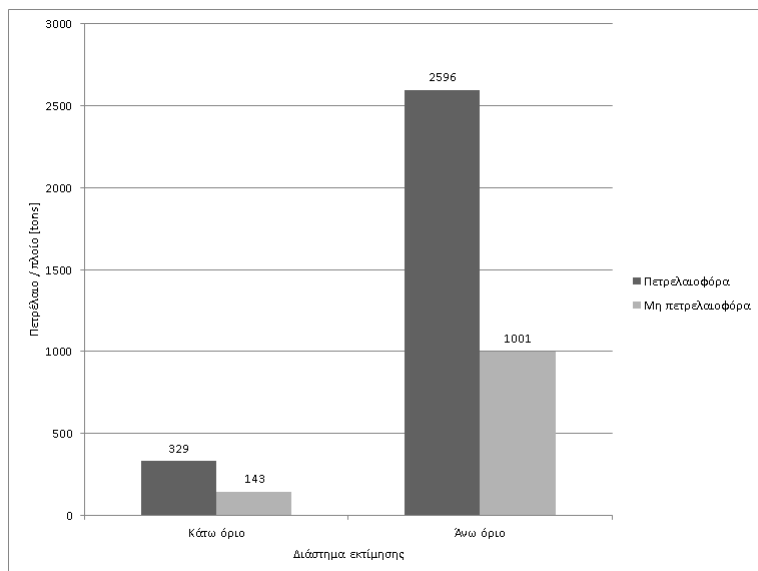
Πίνακας 6.1.: Εκτιμήσεις για την πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου, κατά τύπο πλοίου

Τύπος πλοίου	Ποσότητες πετρελαίου [tons]			Αριθμός περιπτώσεων
	Κάτω όριο	Άνω όριο	Αρχική εκτίμηση	
Πολεμικά	1,325	9,276	13,251	60
Μεταφοράς φορτίου χύδην	183	1,279	1,827	5
Απόθεσης καλωδίων	10	73	104	1
Μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων	34	235	336	1
Μεταφοράς γενικού φορτίου	5,448	38,135	54,478	240
Επιβατηγά	1,165	8,156	11,651	66
Πετρελαιοφόρα	9,535	75,284	95,354	29
Σύνολο	17,700	132,437	177,001	402

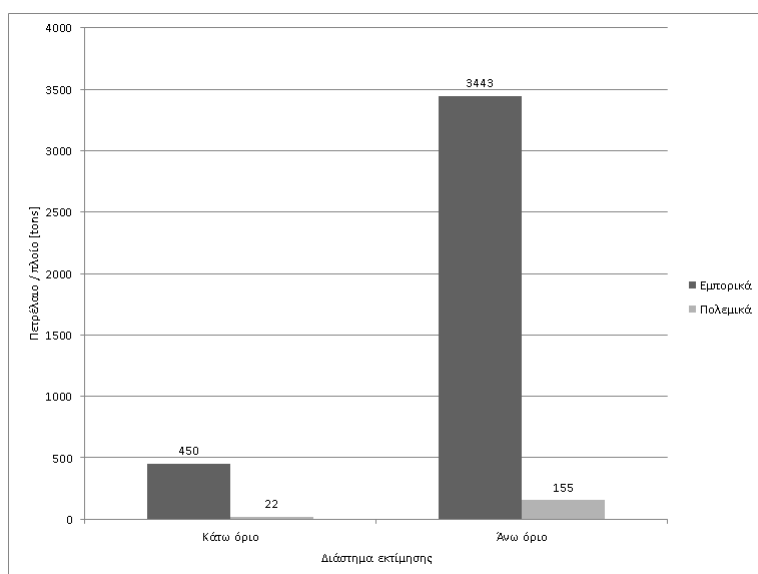
Οι αντίστοιχες εκτιμήσεις, που έγιναν στην εργασία της Etkin [46], για τη συνολική

ποσότητα πετρελαίου που βρίσκεται εγκλωβισμένη σε ναυάγια στη Μεσόγειο Θάλασσα είναι: 132,000 tons, για το κάτω όριο, και 1,000,000 tons, για το άνω όριο του διαστήματος εκτίμησης. Σύμφωνα λοιπόν με τις εκτιμήσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία, στις ελληνικές θάλασσες, οι οποίες καταλαμβάνουν περίπου το 15% της συνολικής επιφάνειας της Μεσογείου, βρίσκεται περίπου το 13.5% της συνολικής ποσότητας για ολόκληρη τη Μεσόγειο Θάλασσα.

Στο Σχ. 6.14 φαίνεται η χρονική εξέλιξη του αριθμού ναυαγίων, που καταγράφονται στη βάση δεδομένων, ανά πενταετία και η αντίστοιχη για τη μέση ποσότητα πετρελαίου ανά πλοίο, σε tons. Η μέση ποσότητα πετρελαίου είναι ο μέσος όρος του κάτω και του άνω ορίου του διαστήματος εκτίμησης. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει πάντα αναλογική συσχέτιση ανάμεσα στα δύο μεγέθη. Για τη μέση ποσότητα πετρελαίου ανά πλοίο παρατηρούνται τρία τοπικά μέγιστα: το πρώτο τοποθετείται στην περίοδο 1940 - 1945, οπότε βυθίστηκαν πολλά πλοία στις πολεμικές επιχειρήσεις του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, το δεύτερο τοποθετείται περί το 1950 και το τρίτο, που είναι και ολικό μέγιστο, περί το 1995. Επομένως, η μεγαλύτερη μέση ποσότητα πετρελαίου εκτιμάται ότι βρίσκεται σε πλοία που βρισκονται βυθισμένα για διάστημα περίπου 15 ετών.

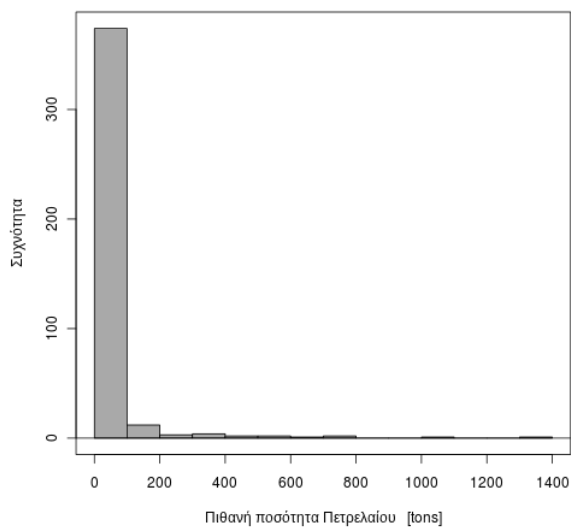


(α) Κατηγορία πλοίων

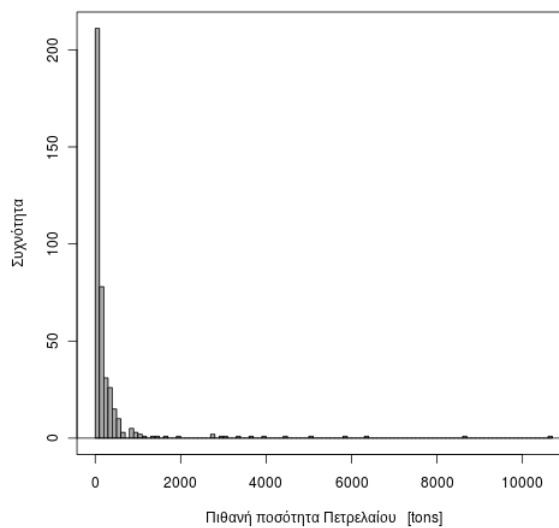


(β') Λειτουργία πλοίων

Σχήμα 6.12.: Κατανομές πετρελαίου / πλοίο με διάφορα κριτήρια

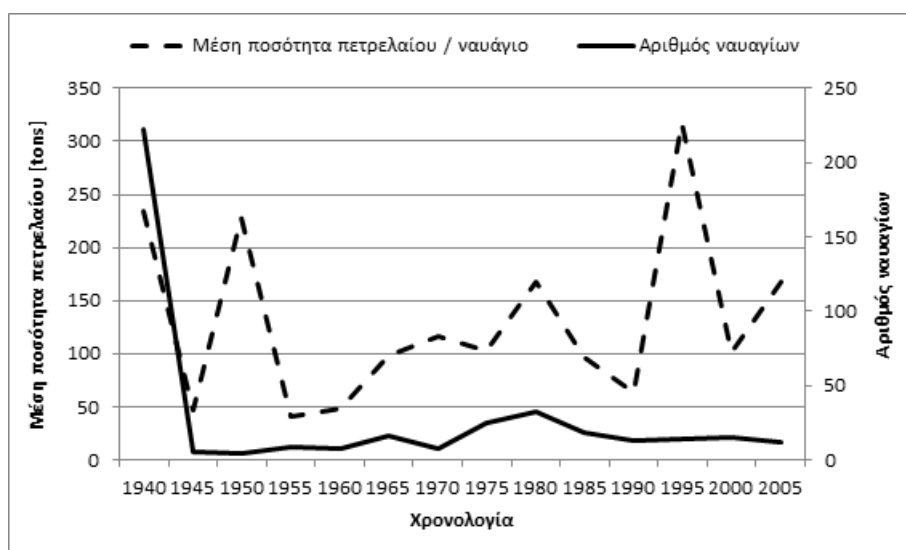


(α) Κάτω όριο



(β) Άνω όριο

Σχήμα 6.13.: Ιστόγραμμα συχνοτήτων εγκλωβισμένου πετρελαίου



Σχήμα 6.14.: Συσχέτιση ηλικίας ναυαγίου με την μέση ποσότητα πετρελαίου ανά πλοίο



(α') Κάτω όριο



(β') Άνω όριο

Σχήμα 6.15.: Γεωγραφική κατανομή σημειακών εκτιμήσεων για την πιθανή ποσότητα καυσίμου



(α') Κάτω όριο

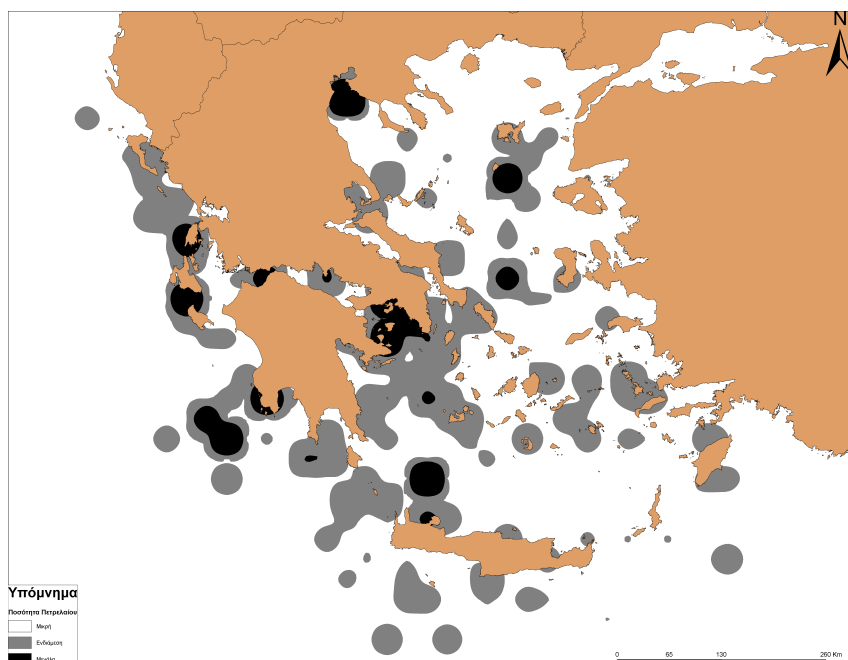


(β') Άνω όριο

Σχήμα 6.16.: Γεωγραφική κατανομή σημειακών εκτιμήσεων για την πιθανή ποσότητα φορτίου πετρελαίου



(α') Κάτω όριο



(β') Άνω όριο

Σχήμα 6.17.: Συγκέντρωση συνολικής ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου κατά γεωγραφική περιοχή

6.3. Ανάλυση ρίσκου

Το μοντέλο υπολογίζει τον κίνδυνο της διαρροής του πετρελαίου και την ένταση των συνεπειών από μια πιθανή διαρροή, για κάθε ναυάγιο. Τελικά, τα δύο αποτελέσματα συνδυάζονται, σύμφωνα με τους κανόνες που έχουν οριστεί στη βάση των κανόνων, ώστε να υπολογιστεί το περιβαλλοντικό ρίσκο της κάθε περίπτωσης. Στα Σχ. 6.18 - 6.20 δίνεται η γεωγραφική κατανομή των σημειακών τιμών για την επικινδυνότητα της διαρροής και την ένταση των συνεπειών αντίστοιχα. Για την επικινδυνότητα της διαρροής δεν προκύπτει διάστημα εκτίμησης, καθώς δεν συμμετέχει στον υπολογισμό της η πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου. Στα Σχ. 6.21, 6.22 δίνεται η γεωγραφική κατανομή του περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναυάγιο.

Στα Σχ. 6.23 και 6.24 δίνονται τα ιστογράμματα για την ένταση των συνεπειών και το περιβαλλοντικό ρίσκο αντίστοιχα. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις δύο εκτιμήσεις του περιβαλλοντικού ρίσκου προκύπτει ότι υπάρχει μια μετατόπιση των τιμών προς κατηγορίες με αυξημένο περιβαλλοντικό ρίσκο. Ενδεικτικά, στο άνω όριο παρατηρούνται λιγότερες Minor και Significant περιπτώσεις αλλά περισσότερες Major και Severe περιπτώσεις. Παρόμοιο συμπέρασμα προκύπτει και από την αντίστοιχη σύγκριση για την ένταση των συνεπειών.

Στον Πιν. 6.2 αναγράφονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά για τις κατανομές των τιμών των μεταβλητών εξόδου, η συχνότερη τιμή (Mode) και ο Δείκτης Ποιοτικής Μεταβλητότητας (IQV).

Πίνακας 6.2.: Στατιστικά στοιχεία των κατανομών τιμών για τις μεταβλητές εξόδου

Μεταβλητή	Mode	IQV
Επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου	Major	25%
Ένταση συνεπειών		
κάτω όριο εκτίμησης	Marginal	84.1%
άνω όριο εκτίμησης	Critical	71.2%
Περιβαλλοντικό ρίσκο		
κάτω όριο εκτίμησης	Significant	64.6%
άνω όριο εκτίμησης	Significant	61.8%

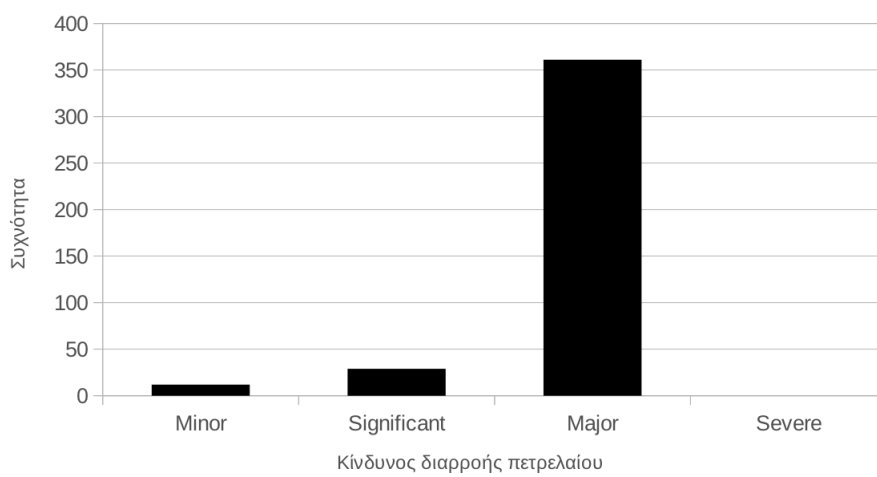
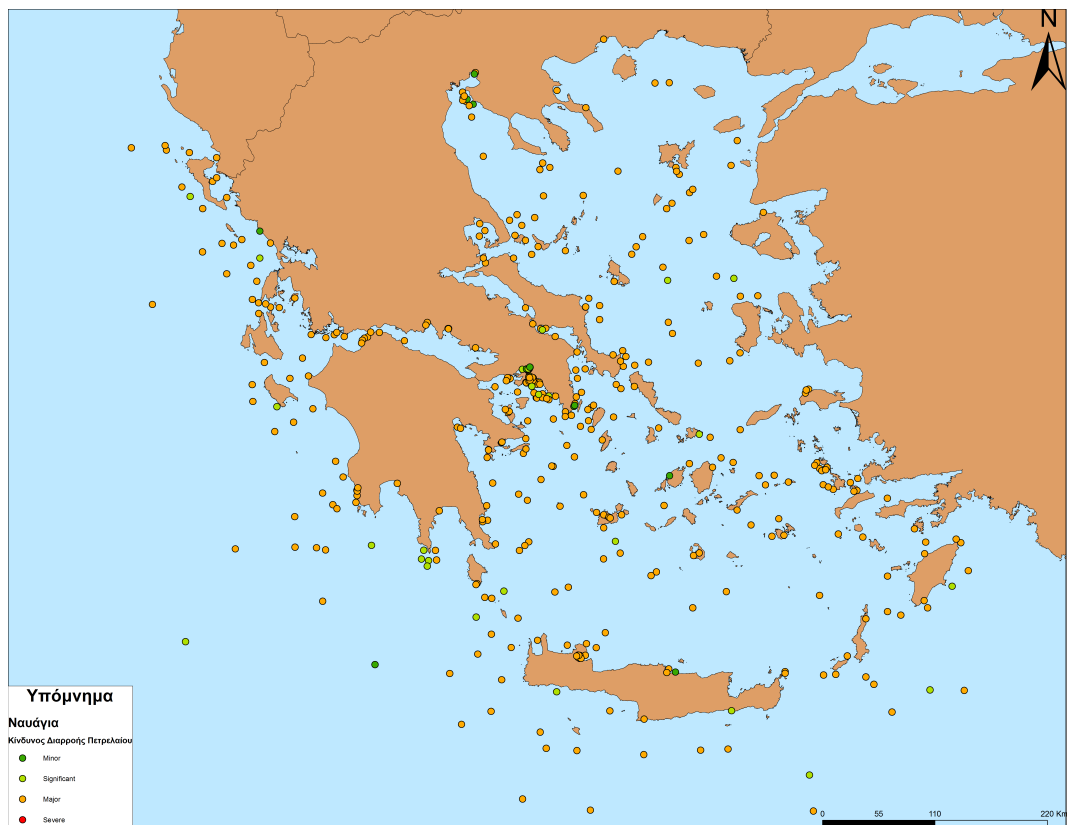
Οι γεωγραφικές περιοχές με παρόμοιο χαρακτηρισμό επικινδυνότητας, έντασης συνεπειών και περιβαλλοντικού ρίσκου αντίστοιχα διακρίνονται στα Σχ. 6.28 - 6.26. Σε αυτά, για παράδειγμα, οι περιοχές που σημειώνονται με έντονο χρώμα είναι περιοχές που περικλείουν ναυάγια με μεγάλες τιμές ρίσκου. Από αυτά προκύπτει ότι οι περιοχές που εμφανίζουν τη μέγιστη επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου δεν είναι απαραίτητα και αυτές όπου εμφανίζεται υψηλό περιβαλλοντικό ρίσκο. Αυτό παρατηρείται επειδή οι περιοχές με υψηλή επικινδυνότητα δεν εμφανίζουν και αντίστοιχα υψηλό επίπεδο έντασης συνεπειών.

Αυξημένα επίπεδα επικινδυνότητας διαρροής πετρελαίου εμφανίζονται σε περιοχές όπου βρίσκονται παλαιά ναυάγια σε μικρά βάθη. Το μέγιστο επίπεδο έντασης συνεπειών εμφανίζεται σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση της εκτιμώμενης πιθανής ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου, και τα ναυάγια βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τις κοντινότερες ακτές, για παράδειγμα όπου υπάρχουν κλειστοί κόλποι. Οι προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000 εμφανίζουν επίσης αυξημένο επίπεδο έντασης συνεπειών, όταν βρίσκονται ναυάγια μέσα στα όριά τους ή κοντά σε αυτές. Αυτό φαίνεται στο Σχ. 6.27 όπου γίνεται υπέρθεση των επιπέδων δεδομένων (layers) έντασης συνεπειών, προστατευόμενες περιοχές

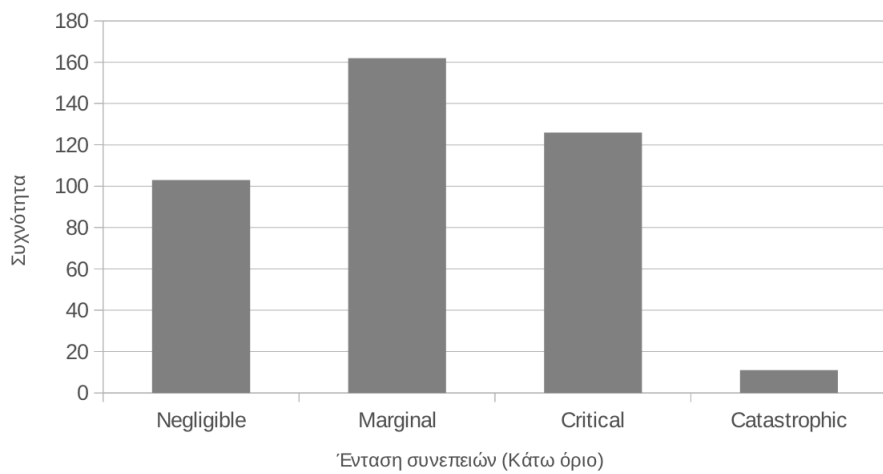
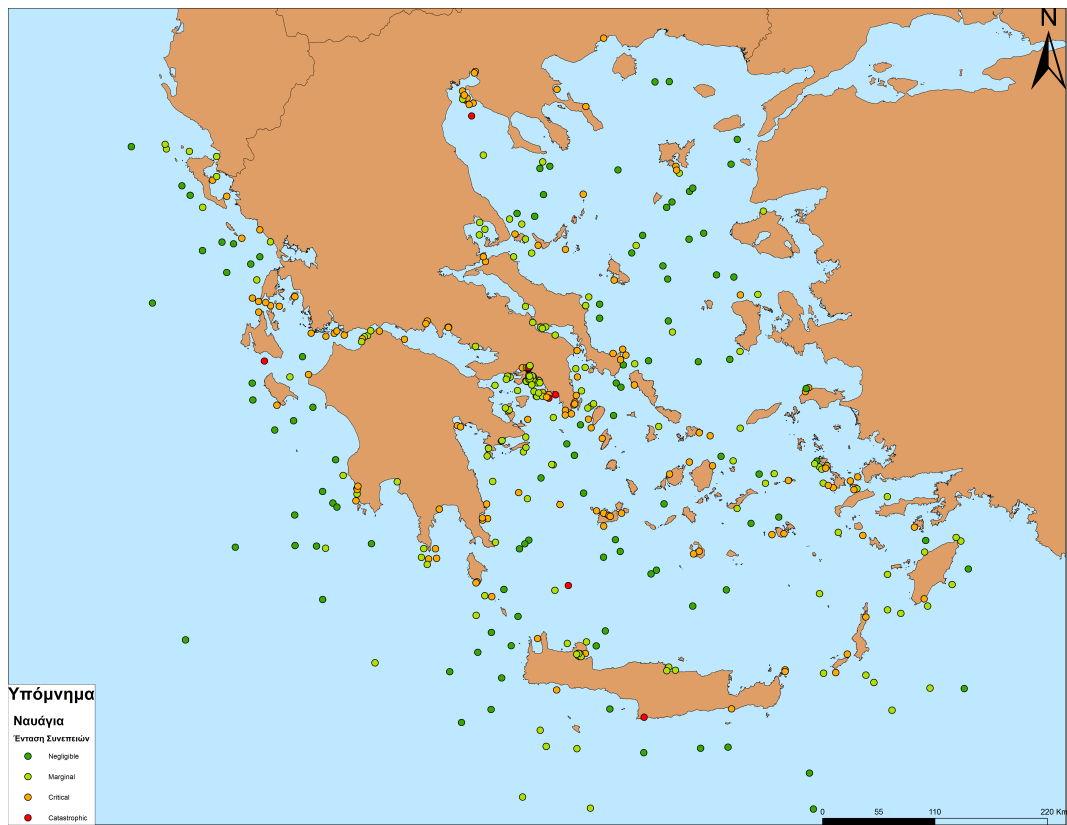
NATURA 2000 και τα στίγματα των ναυαγίων. Τα ναυάγια που περιέχονται πλήρως σε προστατευόμενες περιοχές σημαίνονται με γαλάζιο χρώμα.

Η συγκέντρωση¹ ως ποσοστό του συνολικού αθροίσματος για την επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου, την ένταση συνεπειών και το περιβαλλοντικό ρίσκο αντίστοιχα, κατά γεωγραφική περιοχή, δίνεται στα Σχ. 6.29 - 6.31. Αυτά τα σχήματα έχουν ως στόχο να απεικονίσουν τον αθροιστικό χαρακτήρα του ρίσκου που στο παρόν πλαίσιο σημαίνει ότι μια περιοχή που, για παράδειγμα, συγκεντρώνει πέντε ναυάγια είναι αθροιστικά περισσότερο ευάλωτη από μια περιοχή που περιλαμβάνει μόνο ένα ναυάγιο. Η μέγιστη συγκέντρωση περιβαλλοντικού ρίσκου που εμφανίζεται είναι περίπου το 5% του συνόλου και εντοπίζεται κυρίως στις περιοχές του Σαρωνικού και του Θερμαϊκού Κόλπου, περιοχές Η1 και Η2 αντίστοιχα στο Σχ. 6.32. Σε αυτές τις περιοχές βρίσκονται τα δύο μεγαλύτερα λιμάνια της Ελλάδας, του Πειραιά και της Θεσσαλονίκης. Η μεγάλη συγκέντρωση περιβαλλοντικού ρίσκου, που παρατηρείται σε αυτές τις περιοχές, αντανακλά τη μεγάλη συγκέντρωση ναυαγίων, τις μεγάλες ποσότητες εκτιμώμενης ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου αλλά και τα μικρά βάθη στα οποία βρίσκονται τα ναυάγια. Παρομοίως μεγάλες τιμές συγκέντρωσης ρίσκου εμφανίζονται και στην περιοχή Η3, όπου βρίσκεται το λιμάνι της Πάτρας στον Πατραϊκό Κόλπο, αλλά και στην περιοχή Η4. Οι χαμηλότερες τιμές συγκέντρωσης του ρίσκου εμφανίζονται στις περιοχές S1, S2, S3, S4 στο Σχ. 6.32. Αυτές είναι οι πιο ασφαλείς περιοχές λόγω της μικρής συγκέντρωσης ναυαγίων - υπάρχουν μερικά διάσπαρτα σε αυτές τις περιοχές - αλλά και των μικρών ποσοτήτων πετρελαίου που εκτιμάται ότι βρίσκεται εγκλωβισμένο σε αυτά σε συνδυασμό με τα μεγάλα βάθη όπου βρίσκονται.

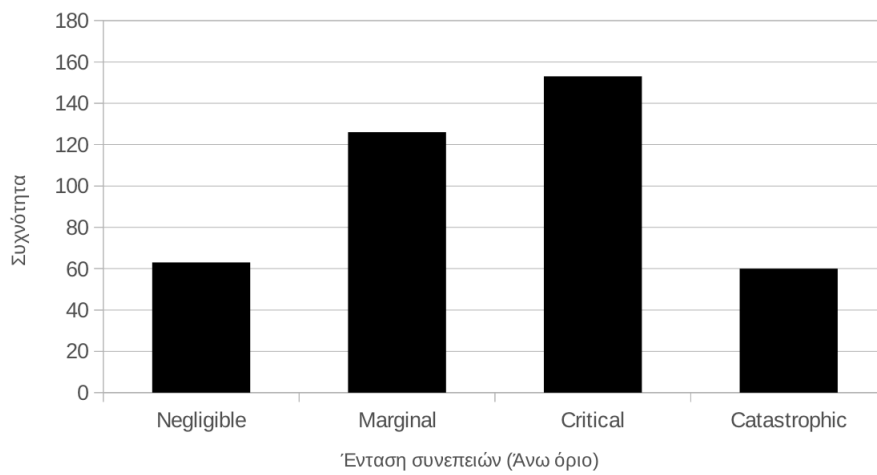
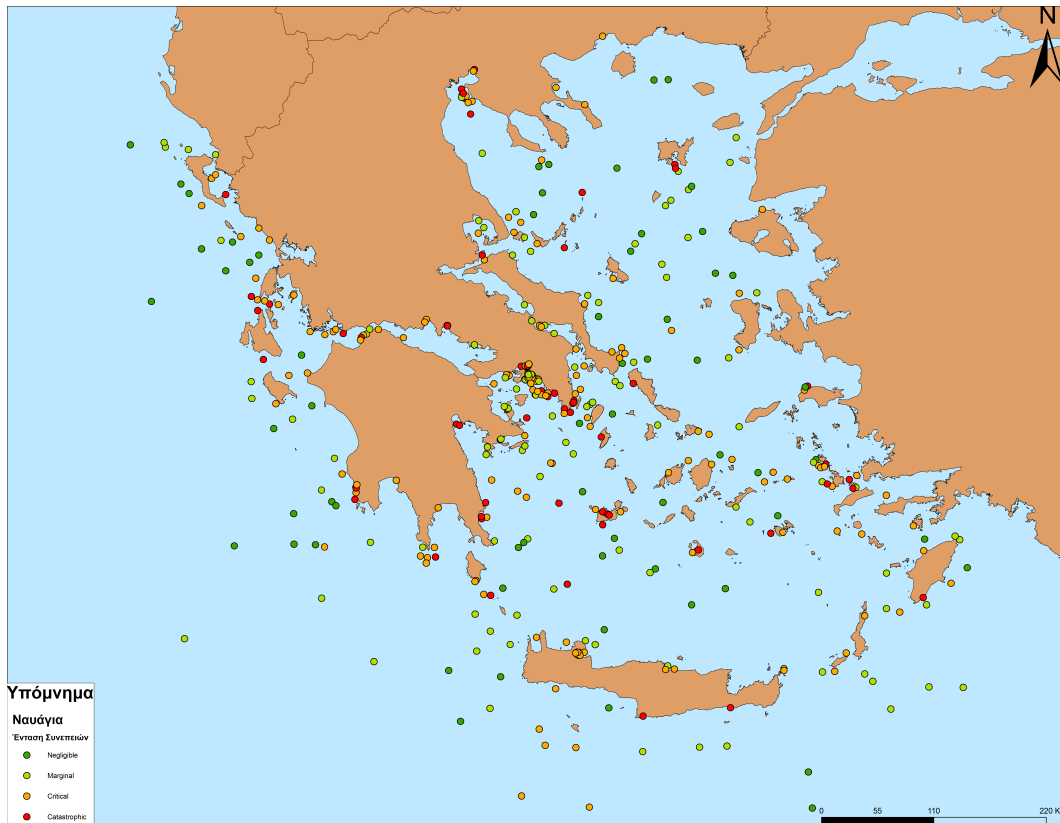
¹ Τα μεγέθη της συγκέντρωσης είναι σχετικά, δηλαδή οι διάφορες περιοχές συγκρίνονται μεταξύ τους και τοποθετούνται σε μια κλίμακα αυξανόμενης συγκέντρωσης. Επίσης οι τιμές της συγκέντρωσης έχουν κανονικοποιηθεί με το συνολικό άθροισμα για όλες τις περιοχές.



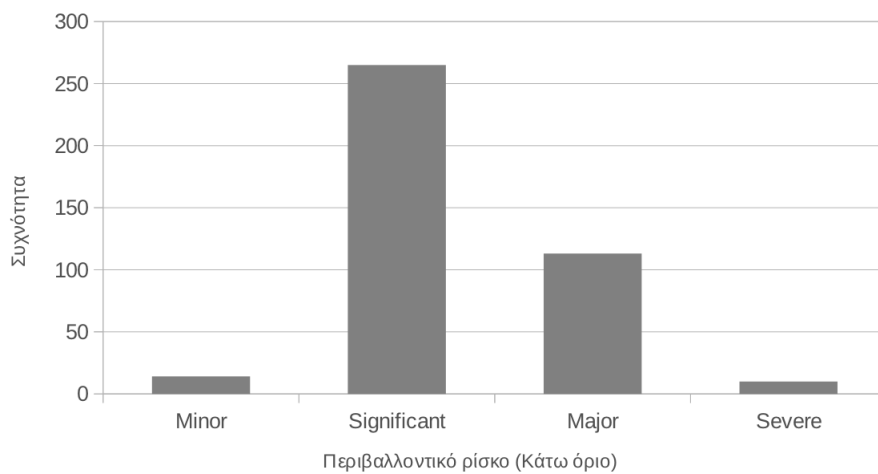
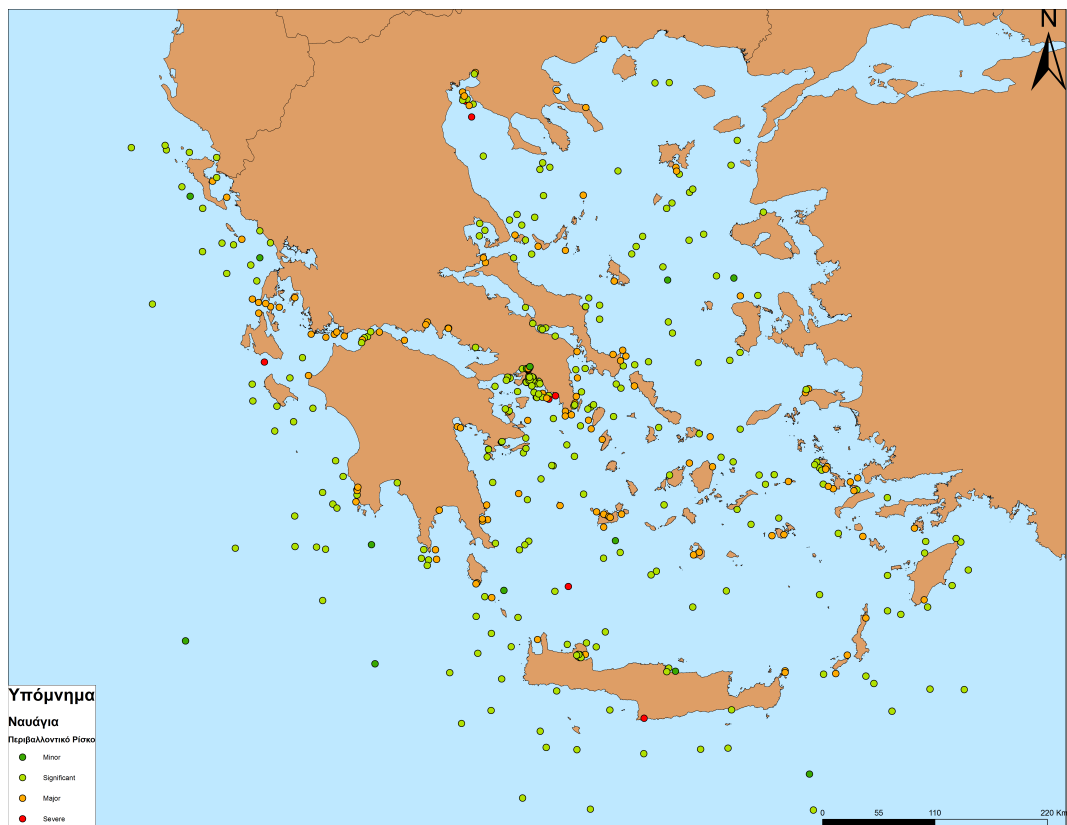
Σχήμα 6.18.: Κίνδυνος διαρροής πετρελαίου για κάθε ναυαγίο



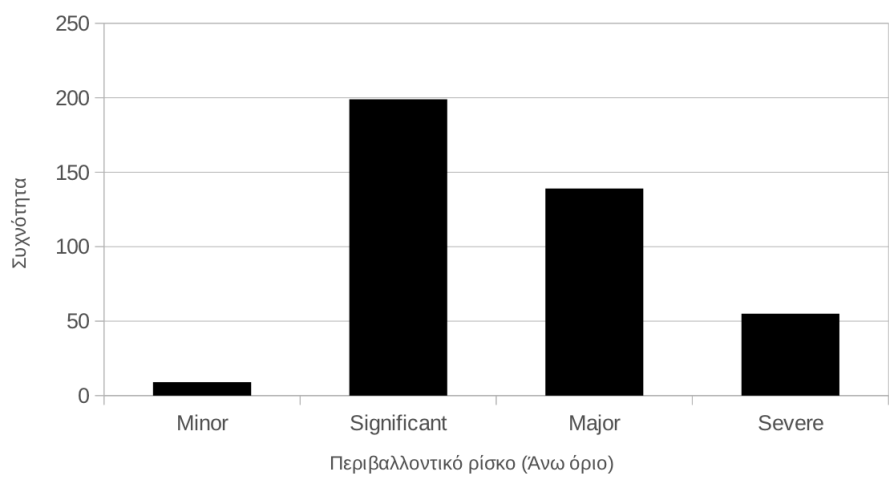
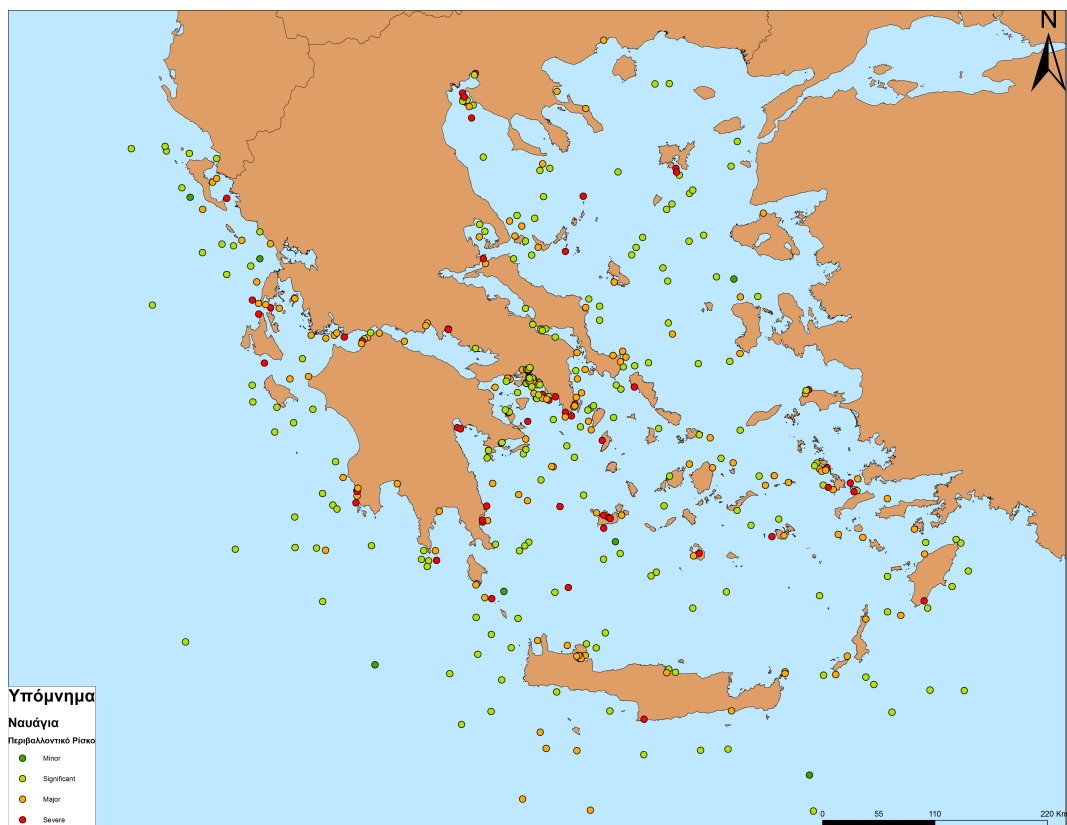
Σχήμα 6.19.: Ένταση συνεπειών για κάθε ναυάγιο (κάτω όριο εκτίμησης)



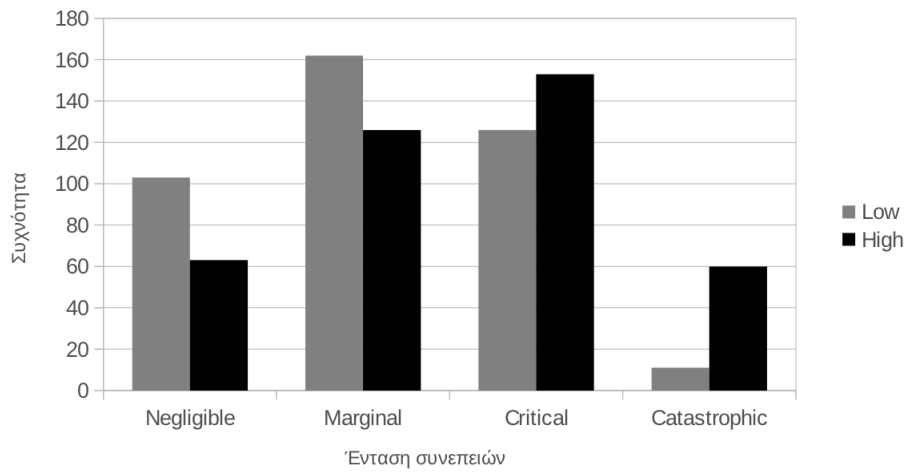
Σχήμα 6.20.: Ένταση συνεπειών για κάθε ναυάγιο (άνω όριο εκτίμησης)



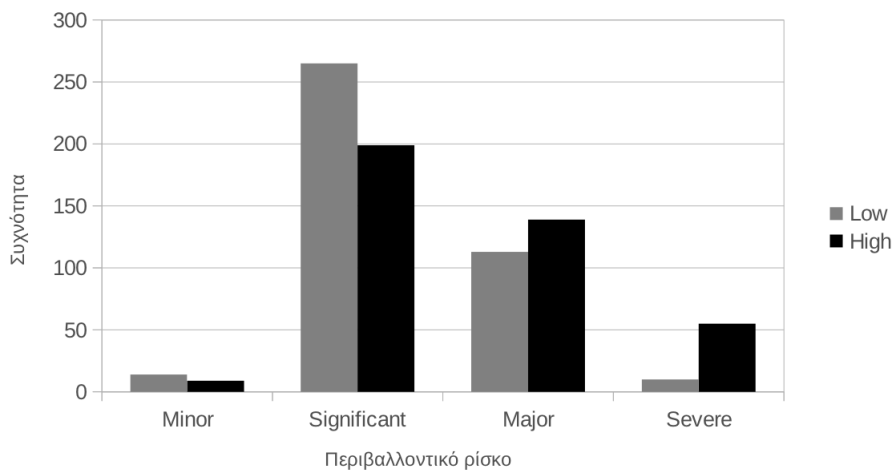
Σχήμα 6.21.: Επίπεδο περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναύγιο (κάτω όριο εκτίμησης)



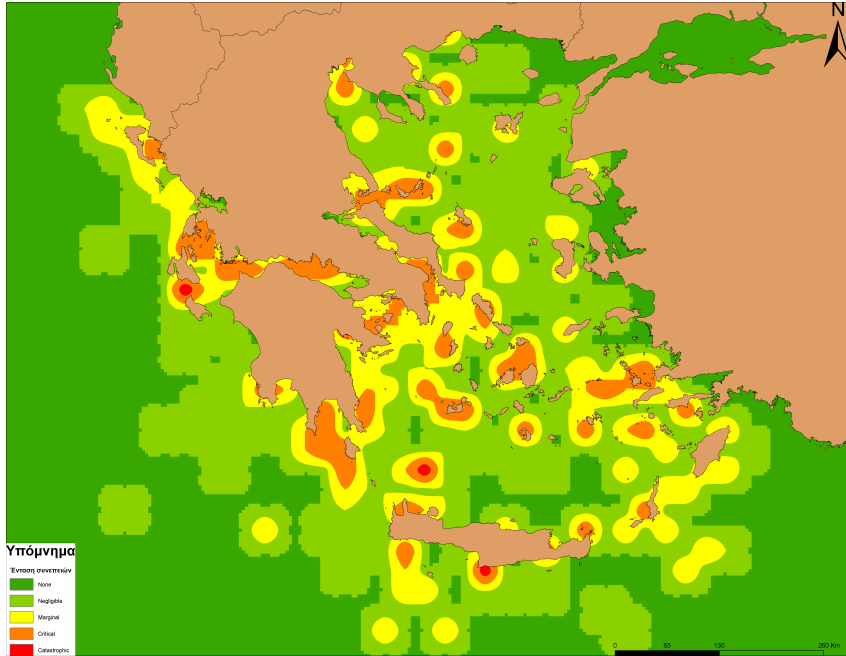
Σχήμα 6.22.: Επίπεδο περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναύαγιο (άνω όριο εκτίμησης)



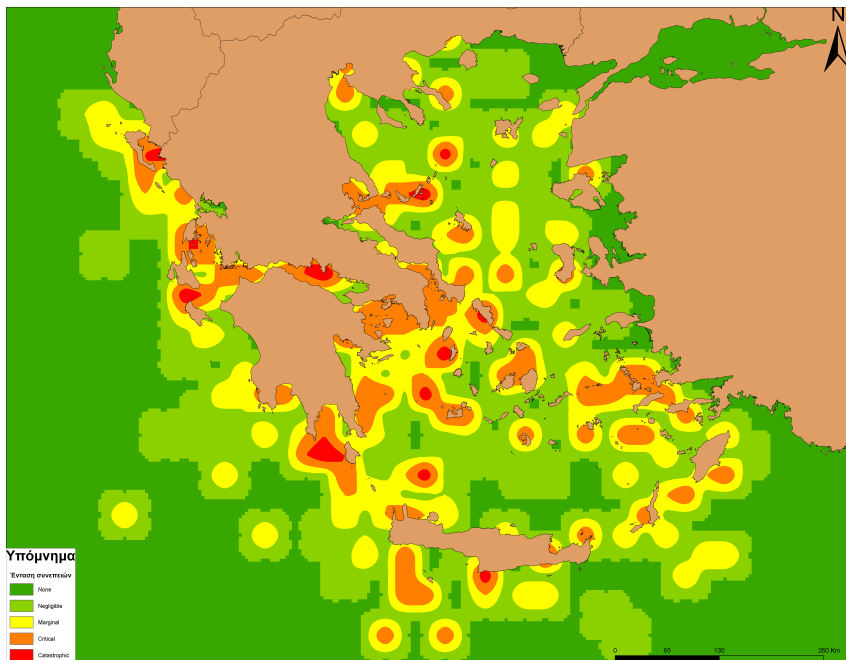
Σχήμα 6.23.: Ιστόγραμμα τιμών για την ένταση συνεπειών



Σχήμα 6.24.: Ιστόγραμμα τιμών για το περιβαλλοντικό ρίσκο

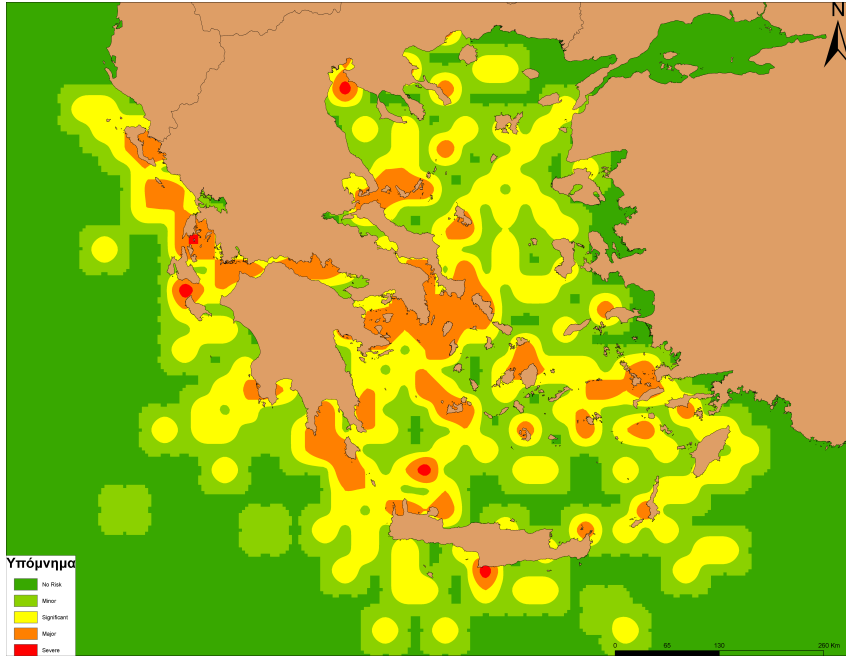


(α) Κάτω όριο

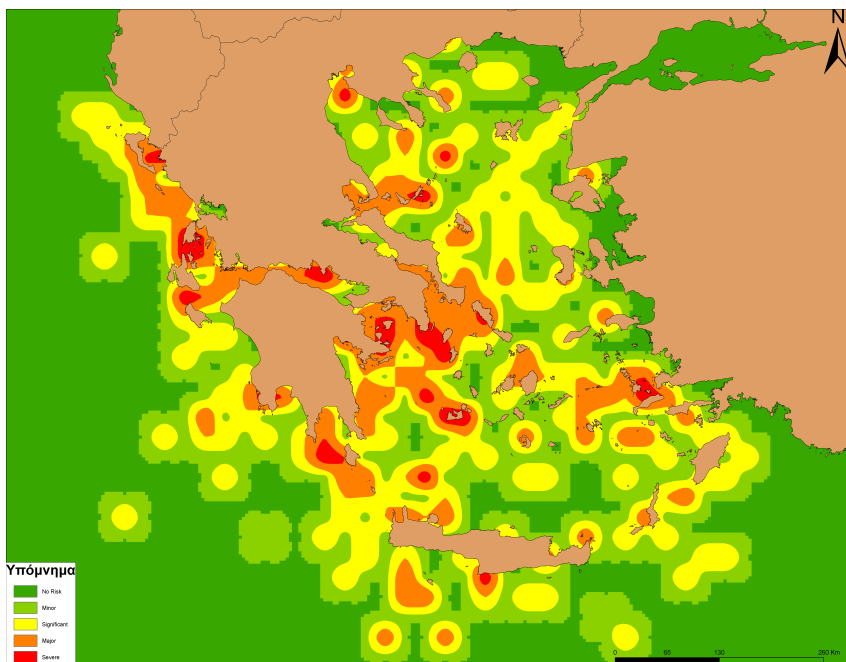


(β) Άνω όριο

Σχήμα 6.25.: Περιοχές με παρόμοια ένταση συνεπειών

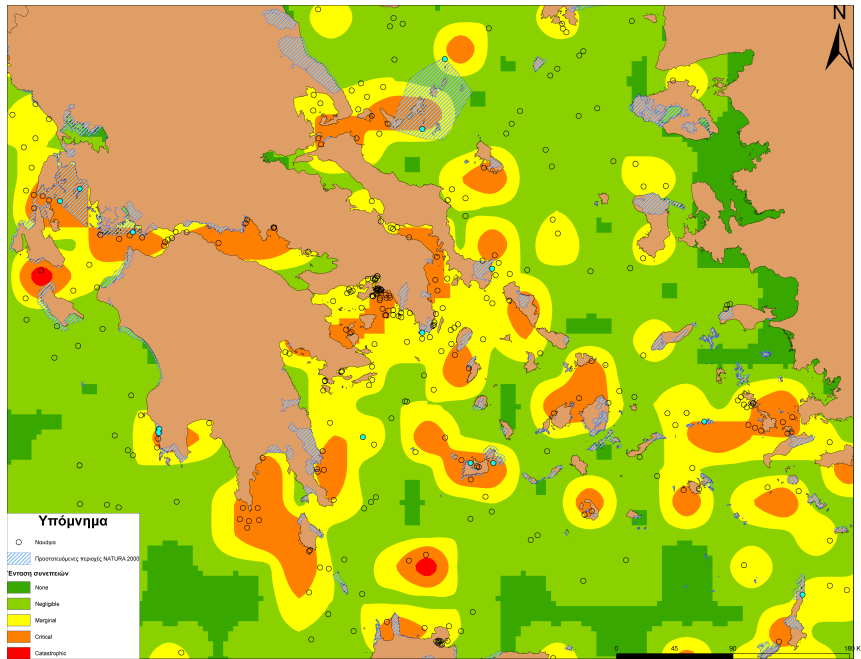


(α) Κάτω όριο

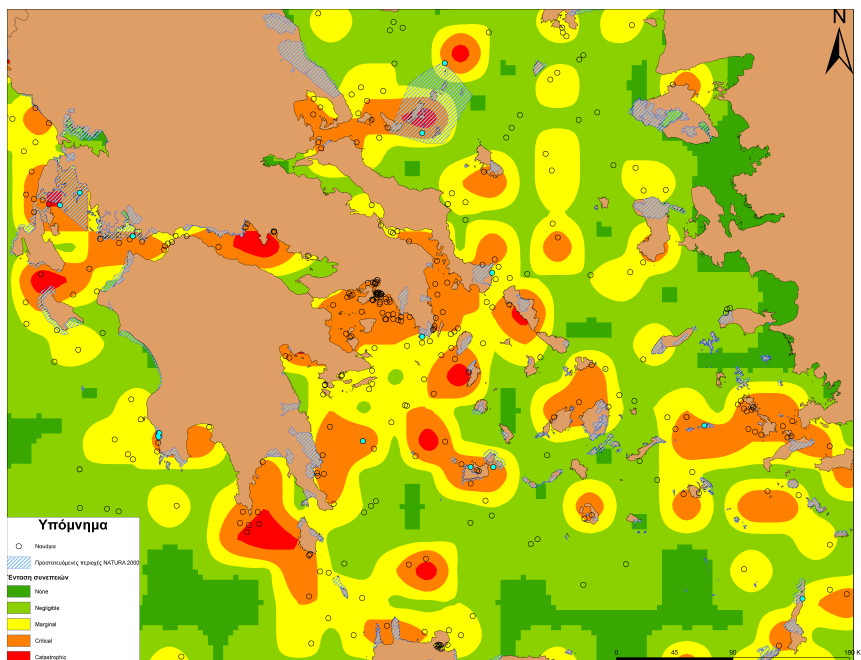


(β) Άνω όριο

Σχήμα 6.26.: Περιοχές με παρόμοιο περιβαλλοντικό ρίσκο

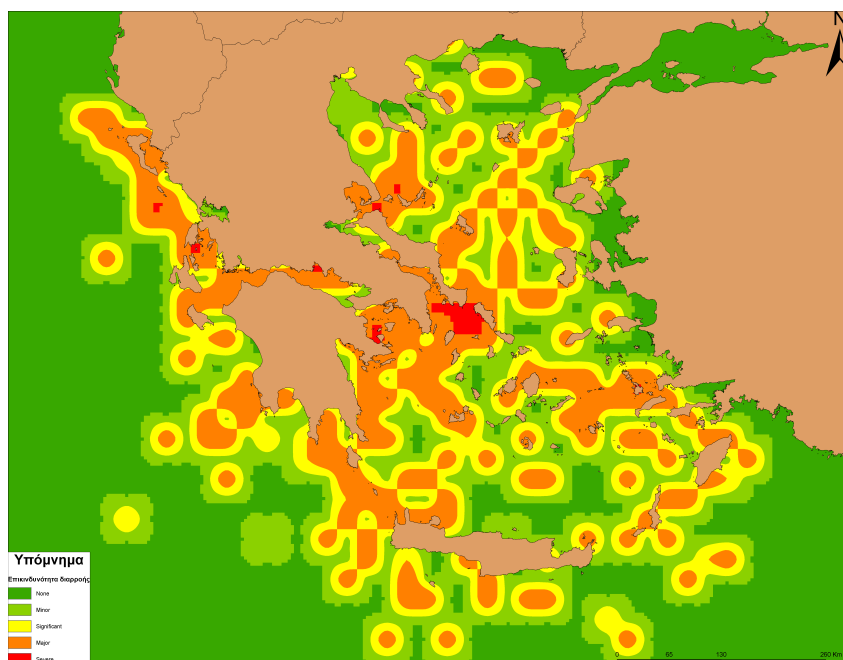


(α') Κάτω όριο

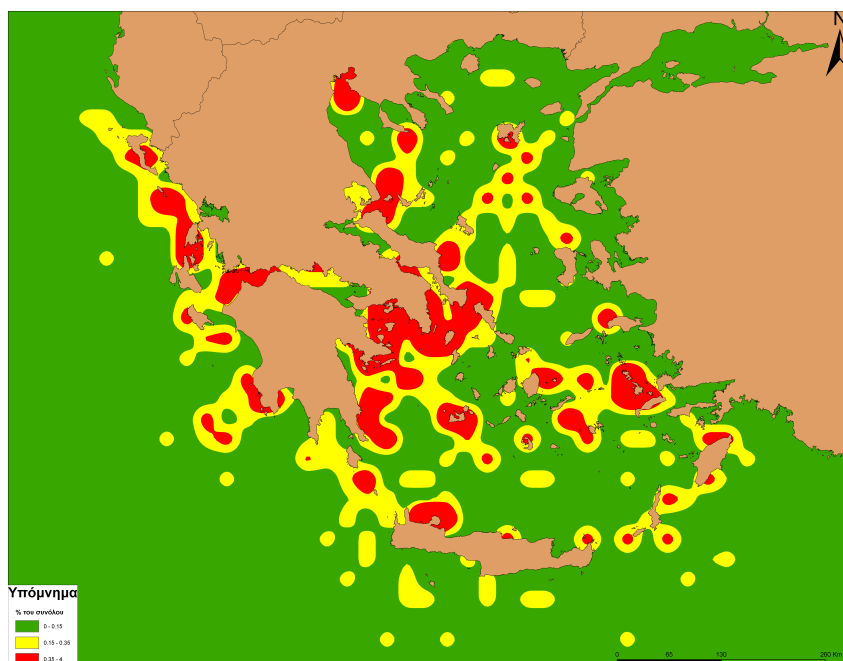


(β') Άνω όριο

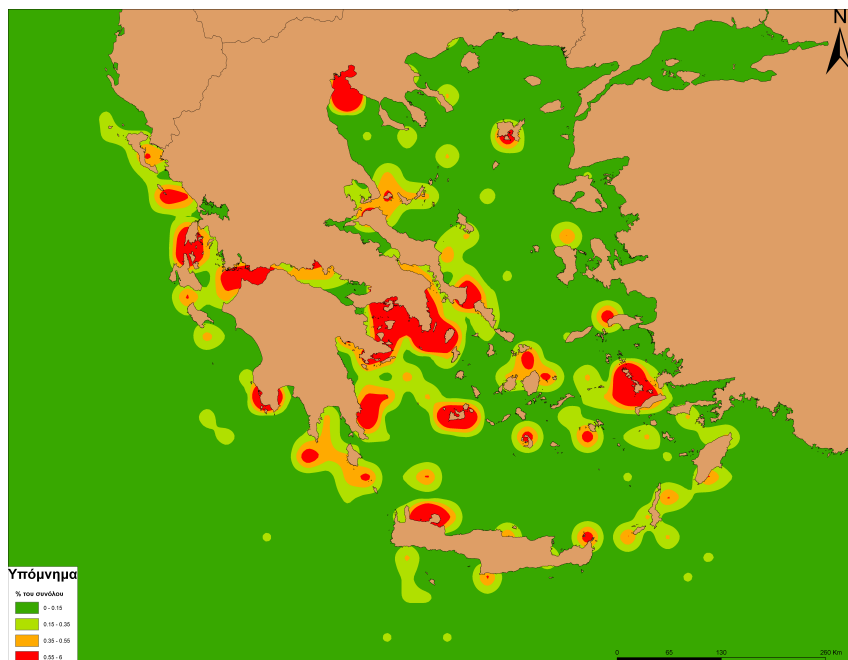
Σχήμα 6.27.: Επίπεδο έντασης συνεπειών για προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000 που περιέχουν ναυάγια



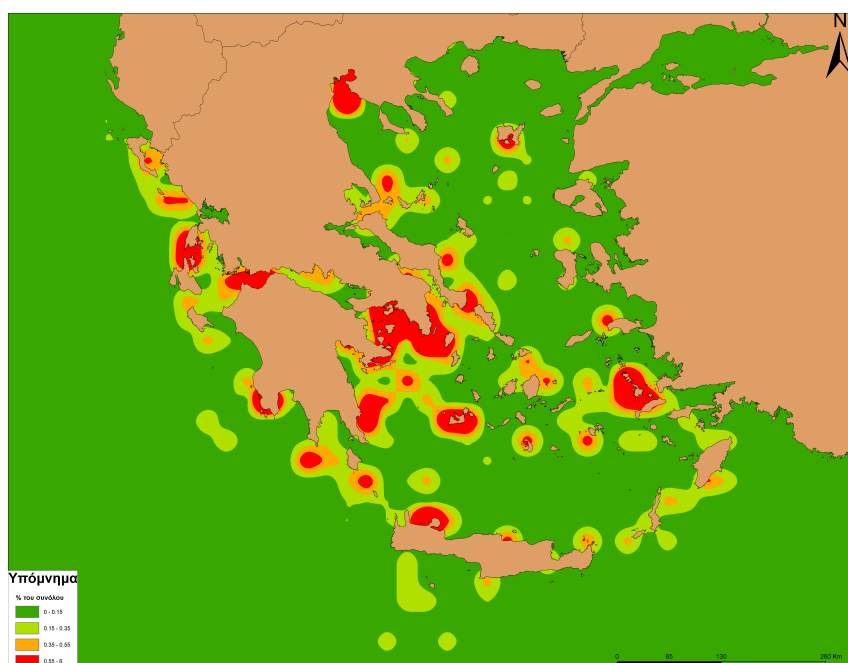
Σχήμα 6.28.: Περιοχές με παρόμοια επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου



Σχήμα 6.29.: Σύγκριση κατά γεωγραφική περιοχή για την επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου

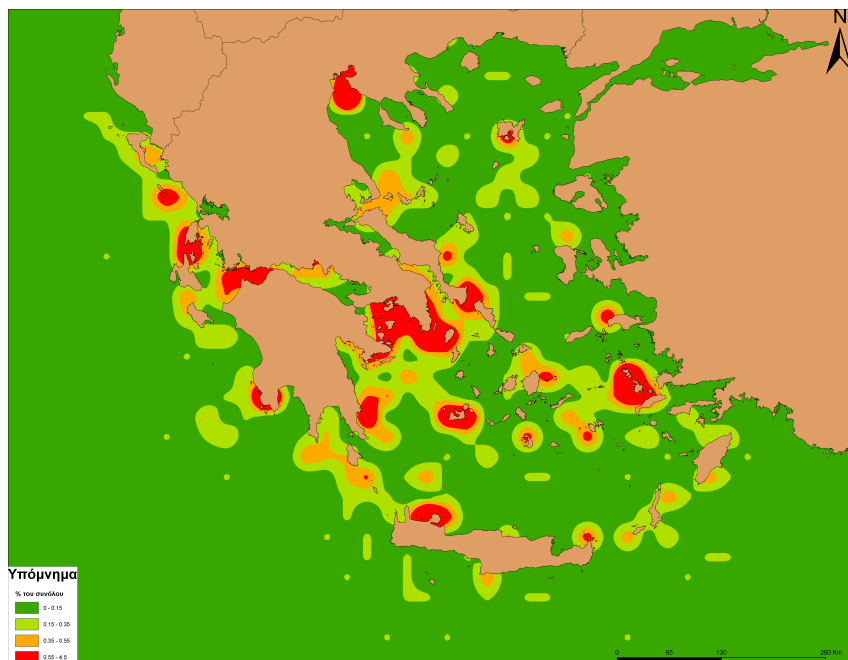


(α') Κάτω όριο

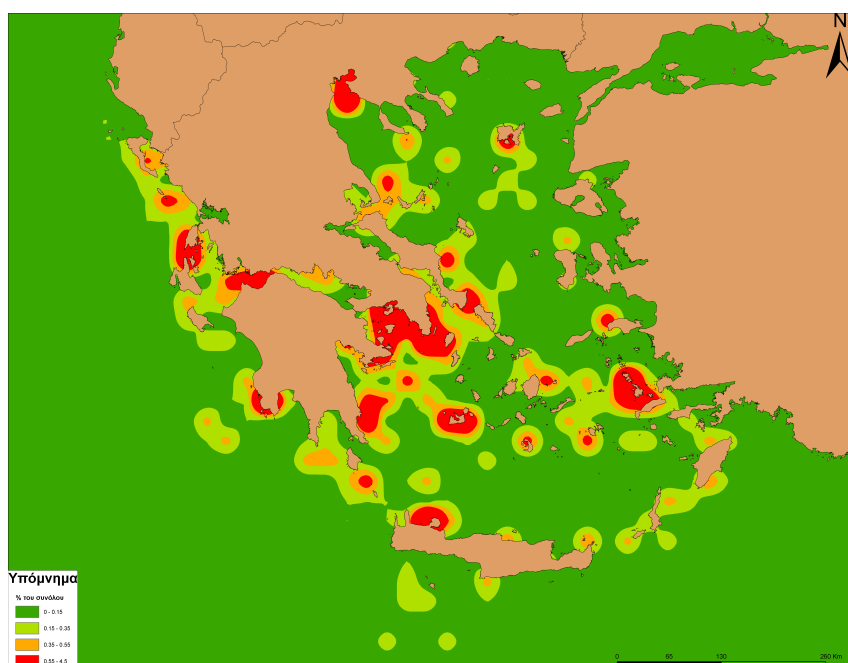


(β') Άνω όριο

Σχήμα 6.30.: Σύγκριση κατά γεωγραφική περιοχή για την ένταση των συνεπειών

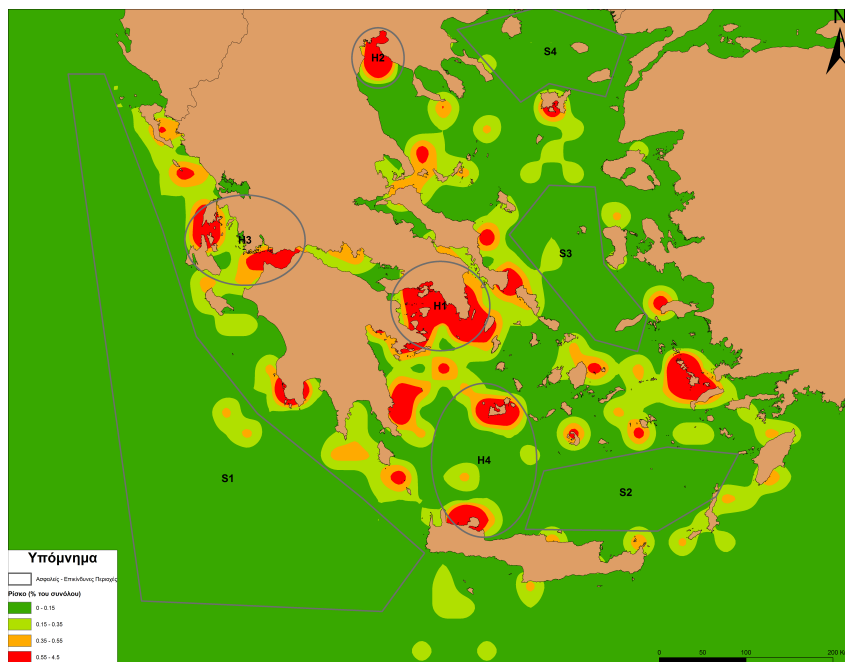


(α') Κάτω όριο



(β') Άνω όριο

Σχήμα 6.31.: Σύγκριση κατά γεωγραφική περιοχή για το περιβαλλοντικό ρίσκο



Σχήμα 6.32.: Ασφαλείς και επικίνδυνες περιοχές σε σχέση με τη συγκέντρωση του περιβαλλοντικού ρίσκου

6.4. Δοκιμή μοντέλου

Η επαλήθευση του υπολογιστικού μοντέλου γίνεται με την εφαρμογή του σε περιπτώσεις ναυαγίων που δεν καταγράφονται στη βάση δεδομένων, και από τις οποίες είναι γνωστό ότι διαρρέουν ποσότητες πετρελαίου. Στόχος είναι να προσδιοριστεί εάν η συμπεριφορά του μοντέλου είναι η αναμενόμενη και επιπλέον εάν τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι λογικά. Τα πλοία που επιλέχθηκαν για την εφαρμογή είναι το θωρηκτό USS Arizona, και το πετρελαιοφόρο ανεφοδιασμού USS Mississinewa. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν εκτενείς αναφορές στα ναυάγια αυτά [46, 31, 21, 65, 10].

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αξιολογείται μόνο το αποτέλεσμα που αφορά την επικινδυνότητα της διαρροής πετρελαίου. Το αποτέλεσμα που αφορά την ένταση των συνεπειών δεν είναι δυνατό να αξιολογηθεί εξαιτίας της έλλειψης πληροφοριών, όπως για παράδειγμα το κόστος της απορρύπανσης, και δεδομένων για φυσικούς πόρους που βρίσκονται κοντά στο ναυάγιο. Επομένως, για το αποτέλεσμα του περιβαλλοντικού ρίσκου, δεν μπορεί παρά να δοθεί μια εμπειρική αξιολόγηση, βασισμένη στα διαθέσιμα δεδομένα.

Ακολουθεί η παρουσίαση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου, για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

USS Arizona

Τοποθεσία. Το ναυάγιο βρίσκεται βυθισμένο στο Pearl Harbor, Hawaii (Σχ. 6.33).



Σχήμα 6.33.: Pearl Harbor, Hawai - Τοποθεσία του ναυαγίου USS Arizona

Ιστορικό. Το USS Arizona, ένα θωρηκτό κλάσης Pennsylvania, κατασκευάστηκε το 1914, με εκτόπισμα 31,400 tons και μήκος 185 m και υπηρέτησε τόσο στον Α΄ όσο και στον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο. Βυθίστηκε κατά τη διάρκεια της Ιαπωνικής επίθεσης στο Pearl Harbor, Hawai την 7. Δεκεμβρίου 1941. Στην ίδια επίθεση βυθίστηκαν και άλλα οκτώ θωρηκτά του Αμερικανικού Ναυτικού. Όταν το πλοίο βυθίστηκε έφερε περίπου 4,000 ton καυσίμων.

Κατάσταση ναυαγίου. Το USS Arizona είναι τοποθετημένο με μικρή κλίση προς την αριστερή πλευρά του (port side) και σε βάθος από το κύριο κατάστρωμα έως την τρύπιδα 9.1 m. Η γάστρα του ναυαγίου έχει καλυφθεί από 7.6 m λάσπης. Από το ναυάγιο διαρρέει πετρέλαιο, με μικρούς ρυθμούς, από τότε που βυθίστηκε το 1941. Μια ξαφνική όμως διαρροή μεγάλης ποσότητας, η οποία είναι βέβαιο ότι θα συμβεί κάποια στιγμή στο μέλλον, μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες για το τοπικό οικοσύστημα. Η πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου εκτιμάται ότι είναι περίπου 2,300 ton καυσίμου πετρελαίου, τύπου Bunker C.

Ενέργειες απορρύπανσης και απάντλησης. Μέχρι σήμερα δεν έχουν γίνει ενέργειες για την απάντληση του εγκλωβισμένου πετρελαίου από το ναυάγιο, κυρίως λόγω του χαρακτηρισμού της τοποθεσίας ως μνημείο (Memorial) αλλά και του γεγονότος ότι αποτελεί νεκροταφείο πεσόντων (war grave). Ο ρυθμός της διαρροής καθώς και τα σημεία όπου αυτή παρατηρείται, παρακολουθούνται στενά. Τα τελευταία χρόνια, καθώς η αντοχή της γάστρας του ναυαγίου μειώνεται, παρατηρούνται αυξανόμενοι ρυθμοί διαρροής πετρελαίου.

Εφαρμογή μοντέλου. Στον Πιν. 6.3 δίνονται οι τιμές των μεταβλητών εισόδου για την συγκεκριμένη περίπτωση. Οι αντίστοιχες μεταβλητές του μοντέλου, για τις οποίες δεν υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες, πήραν την τιμή -1^2 . Στον Πιν. 6.4 δίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου, για τις μεταβλητές «επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου», «ένταση συνεπειών» και «περιβαλλοντικό ρίσκο». Η επικινδυνότητα της διαρροής πετρελαίου χαρακτηρίζεται ως Major. Αυτό το αποτέλεσμα συμφωνεί με το γεγονός ότι διαρρέει, στην πραγματικότητα, πετρέλαιο από το ναυάγιο. Στο Σχ. 6.34 δίνεται η βηματική απεικόνιση³ των αποτελεσμάτων, όπου παρατηρείται ότι οι μεταβλητές που συνεισφέρουν στις υψηλές τιμές του περιβαλλοντικού ρίσκου είναι η ηλικία του ναυαγίου, ο τύπος του φορτίου, η πιθανή ποσότητα καυσίμων, και η απόσταση από την ακτή.

USS Mississinewa

Τοποθεσία. Το ναυάγιο βρίσκεται βυθισμένο στην περιοχή Ulithi Lagoon, Yap, Federated States of Micronesia.

Ιστορικό. Το USS Mississinewa (AO-59) ήταν πετρελαιοφόρο ανεφοδιασμού στην υπηρεσία του Αμερικανικού Ναυτικού. Χτυπήθηκε στις 20 Νοεμβρίου του 1944 από μια επανδρωμένη торπίλη αυτοκτονίας (Kaiten) του Ιαπωνικού ναυτικού. Μετά το χτύπημα ξέσπασε πυρκαγιά στο πλοίο, το οποίο ακολούθως βυθίστηκε. Πολλές από τις πρωαίες δεξαμενές καυσίμων υπέστησαν βλάβες από την έκρηξη και την πυρκαγιά και άγνωστη ποσότητα καυσίμου διέρρευσε κατά την ανατροπή του. Το πλοίο ήταν φορτωμένο με 12,900 ton πετρελαιοειδών, όπως καύσιμα, κηροζίνη και πετρέλαιο diesel.

² Η τιμή -1 σημαίνει την έλλειψη της αντίστοιχης πληροφορίας.

³ Η βηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων έχει προκύψει εισάγοντας, με τη σειρά, μία μία τις μεταβλητές, έως το τελευταίο τρέξιμο οπότε εισάγονται όλες οι μεταβλητές. Οι υπόλοιπες μεταβλητές, για κάθε τρέξιμο, θεωρείται ότι δεν είναι διαθέσιμες, οπότε τους ανατίθεται η τιμή -1 . Η απεικόνιση έχει ως στόχο να δείξει τον τρόπο με τον οποίο διαμορφώνεται το τελικό αποτέλεσμα με τη σταδιακή «ενεργοποίηση» των μεταβλητών εισόδου.

Πίνακας 6.3.: Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο ασαφούς λογικής

Μεταβλητή εισόδου	Τιμή	Μονάδες
Ηλικία ναυαγίου	70	έτη
Βάθος	10	m
Λειτουργική ζωή	26	έτη
Κατασκευαστικές ενισχύσεις γάστρας	πολεμικό πλοίο	-
Βλάβες γάστρας από το ατύχημα	απώλεια πολέμου	-
Κατάσταση φόρτωσης	έμφορτο	-
Μέγεθος πλοίου	185	m
Τύπος γάστρας	απλή	-
Πιθανή τοποθεσία πετρελαίου	διασκορπισμένο και σε δεξαμενές	-
Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου καυσίμου	1,805	tons
Τύπος κοντινότερης ακτής	ανθρωπογενής κατασκευή	-
Τοπική θαλάσσια κυκλοφορία	προς την ακτή	-
Απόσταση από την κοντινότερη ακτή	0.05	nm
Απόσταση από τον κοντινότερο στόχο οικονομικού ενδιαφέροντος	0.3	nm.

Κατάσταση ναυαγίου. Το ναυάγιο βρίσκεται σε βάθος 38 m, σε περιοχή όπου τα θαλάσσια ρεύματα έχουν μικρή έως μεσαία ένταση. Η ποσότητα του πετρελαίου που παραμένει εγκλωβισμένο στο ναυάγιο εκτιμάται (2002) ότι είναι περίπου 6,600 - 9,300 ton και αποτελείται κυρίως από καύσιμο Navy Special Fuel Oil, τύπου Bunker B. Η περιοχή Ulithi Lagoon, όπου βρίσκεται βυθισμένο το πλοίο, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη με πλήθος φυσικών και κοινωνικοοικονομικών πόρων. Χρόνιες ή ξαφνικές διαρροές πετρελαίου μπορεί να έχουν σοβαρές βιολογικές και κοινωνικοοικονομικές επιδράσεις. Το ναυάγιο θεωρείται νεκροταφείο πεσόντων (war grave).

Ενέργειες απορρύπανσης και απάντλησης. Τον Αύγουστο 2001 παρατηρήθηκε διαρροή πετρελαίου από το ναυάγιο. Επιχειρήσεις του Αμερικανικού Ναυτικού, που έγιναν τον Σεπτέμβριο του 2001 αλλά και τον Φεβρουάριο του 2002, επεδίωξαν να περιορίσουν τις διαρροές. Για να αποφευχθούν περαιτέρω διαρροές πετρελαίου, αποφασίστηκε να διεξαχθούν επιχειρήσεις απάντλησης του εγκλωβισμένου πετρελαίου. Μετά το πέρας αυτών των επιχειρήσεων εκτιμάται ότι παραμένει, στις σωληνώσεις του πλοίου καθώς και σε κάποιους χώρους και δεξαμενές, μια ποσότητα πετρελαίου μικρότερη από 50 ton. Το συνολικό κόστος των επιχειρήσεων απάντλησης κυμάνθηκε μεταξύ \$4 - 5 εκ.

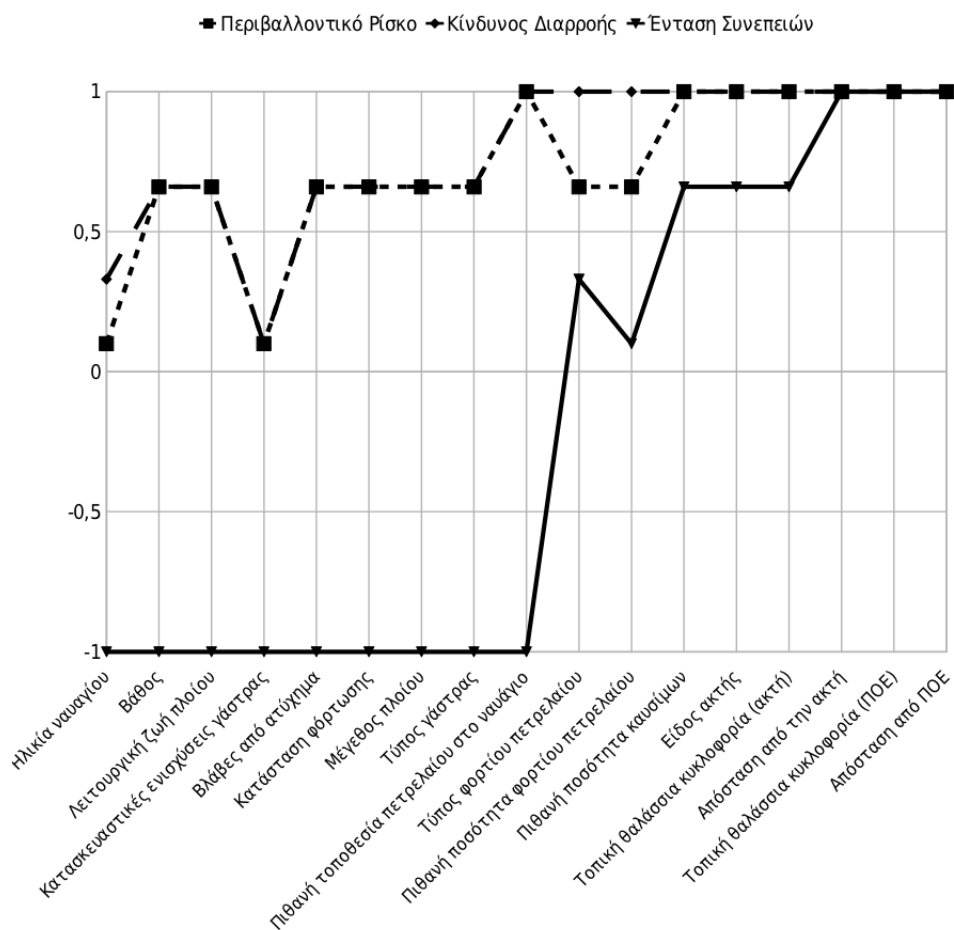
Πίνακας 6.4.: Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου

Μεταβλητή	Τιμή	Κατηγορία
Επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου	0.66	Major
Ένταση συνεπειών	1	Catastrophic
Περιβαλλοντικό ρίσκο	1	Severe

Εφαρμογή μοντέλου. Για την περίπτωση του USS Mississinewa το υπολογιστικό μοντέλο έτρεξε δύο φορές ώστε να προκύψει το κάτω και το άνω όριο του διαστήματος εκτίμησης. Στον Πιν. 6.6 δίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα δεν μεταβάλλονται κατά τη μεταβολή της πιθανής ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου. Αυτό συμβαίνει επειδή και οι δύο εκτιμήσεις για την ποσότητα του πετρελαίου ανήκουν στην ίδια κατηγορία, από αυτές που έχουν οριστεί για την αντίστοιχη ασαφή μεταβλητή (Ενότητα 5.4). Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τόσο οι 6,600 όσο και οι 9,300 ton πετρελαίου ανήκουν κατά 100% στην ίδια κατηγορία (μεγάλη ποσότητα πετρελαίου). Στο Σχ. 6.35 δίνεται η βηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την επικινδυνότητα διαρροής, την ένταση των συνεπειών και το περιβαλλοντικό ρίσκο. Παρατηρείται ότι οι μεταβλητές που συνεισφέρουν στις υψηλές τιμές του περιβαλλοντικού ρίσκου είναι η ηλικία του ναυαγίου, ο τύπος του φορτίου, και η απόσταση από την ακτή.

Πίνακας 6.5.: Δεδομένα εισόδου για το υπολογιστικό μοντέλο

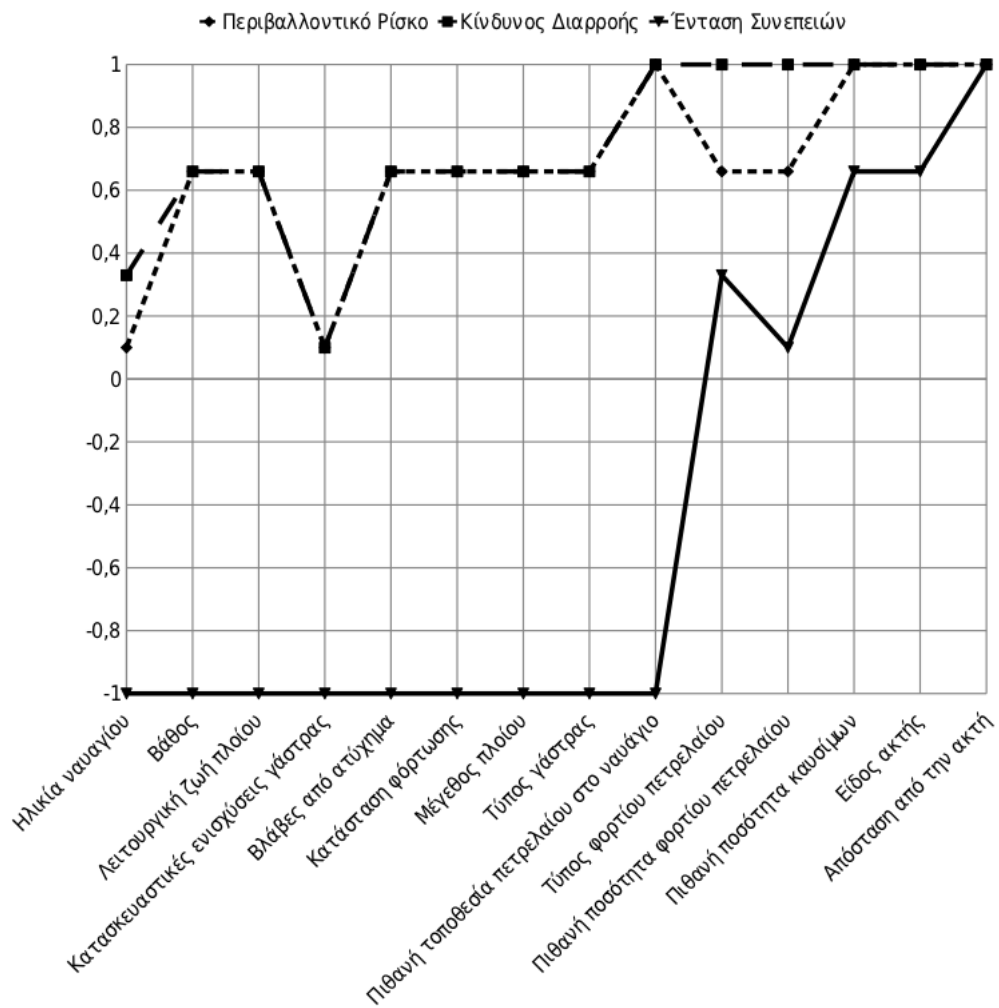
Μεταβλητή εισόδου	Τιμή	Μονάδες
Ηλικία ναυαγίου	67	έτη
Βάθος	38	m
Λειτουργική ζωή	1	έτη
Κατασκευαστικές ενισχύσεις γάστρας	πολεμικό πλοίο	-
Βλάβες γάστρας από το ατύχημα	απώλεια πολέμου	-
Κατάσταση φόρτωσης	έμφορτο	-
Μέγεθος πλοίου	169	m
Τύπος γάστρας	απλή	-
Πιθανή τοποθεσία πετρελαίου	διασκορπισμένο και σε δεξαμενές	-
Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου καυσίμου	6,600 - 9,300	tons
Τύπος κοντινότερης ακτής	αμμώδεις ακτές	-
Απόσταση από την κοντινότερη ακτή	0.7	nm.



Σχήμα 6.34.: Βηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου

Πίνακας 6.6.: Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου

Μεταβλητή	Τιμή Κάτω όριο	Τιμή Άνω όριο	Περιγραφή
Επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου	1	1	Severe
Ένταση συνεπειών	1	1	Catastrophic
Περιβαλλοντικό ρίσκο	1	1	Severe.



Σχήμα 6.35.: Βηματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου

6.5. Ανάλυση Αβεβαιότητας

Ο συνολικός αριθμός ναυαγίων, ο οποίος περιλαμβάνει τα πετρελαιοφόρα και τα μη-πετρελαιοφόρα πλοία που πήραν μέρος στην ανάλυση, είναι 295 από τα 402 που καταγράφονται στη βάση δεδομένων. Ο αριθμός αντιστοιχεί περίπου στο 73% των περιπτώσεων της βάσης δεδομένων. Από την ανάλυση αποκλείστηκαν ναυάγια για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμες πληροφορίες είτε για τις χωρητικότητες ή για τις μεταφερόμενες ποσότητες πετρελαίου. Το υποσύνολο των πετρελαιοφόρων πλοίων, που θα εξεταστεί για τον προσδιορισμό της σχετικής επίδρασης των μεταβλητών, αποτελείται από 18 πλοία. Το υποσύνολο των μη-πετρελαιοφόρων πλοίων αποτελείται αντίστοιχα από 267 πλοία. Από την προσομοίωση προέκυψε μια κατανομή συχνότητας για κάθε ναυάγιο. Η διασπορά της κάθε κατανομής ρίσκου χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της επαγόμενης αβεβαιότητας στο ρίσκο, λόγω της αβεβαιότητας στην είσοδο του μοντέλου.

Αποτελέσματα για το υποσύνολο των πετρελαιοφόρων πλοίων. Ο μέσος IQV, όταν γίνεται δειγματοληψία μόνο για τη μεταβλητή «φορτίο πετρέλαιο», είναι 5.49% για την προσομοίωση του κάτω ορίου και 2.47% του άνω ορίου της εκτίμησης. Αντίστοιχα στην περίπτωση όπου γίνεται δειγματοληψία μόνο για τη μεταβλητή «καύσιμα» ο μέσος IQV τείνει στο 0%. Αυτό σημαίνει ότι όταν μεταβάλλεται η ποσότητα των καυσίμων, σύμφωνα με την αντίστοιχη κατανομή πιθανότητας, τότε το περιβαλλοντικό ρίσκο για κάθε ναυάγιο είναι σταθερό και επομένως δεν επάγεται ουσιαστικά κάποια αβεβαιότητα σε αυτό. Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα ότι, η μεταβλητή «φορτίο πετρέλαιο» έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην αβεβαιότητα του περιβαλλοντικού ρίσκου. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι στα πετρελαιοφόρα πλοία, η ποσότητα του εγκλωβισμένου φορτίου είναι συνήθως μεγαλύτερη από την εγκλωβισμένη ποσότητα καυσίμων. Επομένως, η μεταβολή της ποσότητας του φορτίου πετρελαίου επηρεάζει πολύ περισσότερο το περιβαλλοντικό ρίσκο. Στην περίπτωση όπου γίνεται ταυτόχρονη δειγματοληψία των δύο μεταβλητών ο μέσος IQV ισούται με 8.94% για το κάτω όριο, και 3.76% για το άνω όριο της εκτίμησης.

Οι τιμές του μέσου IQV για το κάτω όριο είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για το άνω όριο της εκτίμησης. Επομένως, οι κατανομές του περιβαλλοντικού ρίσκου, οι οποίες προκύπτουν για κάθε ναυάγιο, για το άνω όριο είναι, κατά μέσο όρο, περισσότερο συγκεντρωμένες γύρω από μια συγκεκριμένη κατηγορία ρίσκου. Αυτό οφείλεται στις μεγαλύτερες ποσότητες πετρελαίου του άνω ορίου, οι οποίες επάγουν μικρότερη μεταβλητότητα στην κατανομή του ρίσκου. Επιπλέον, αποτελεί μια ένδειξη για το ότι το άνω όριο της εκτίμησης επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από την αβεβαιότητα στις ποσότητες του πετρελαίου.

Αποτελέσματα για το υποσύνολο των μη-πετρελαιοφόρων πλοίων. Ο μέσος IQV, όταν γίνεται δειγματοληψία μόνο για την ποσότητα των καυσίμων, ισούται με 3.83%, για το κάτω όριο, και 20.56% για το άνω όριο. Η ποσότητα του φορτίου πετρελαίου δεν συνεισφέρει στην αβεβαιότητα του ρίσκου, εφόσον τα μη-πετρελαιοφόρα πλοία δεν μεταφέρουν πετρέλαιο ως φορτίο. Όταν δεν υπάρχει ποσότητα φορτίου πετρελαίου, η ποσότητα των καυσίμων επάγει μεγαλύτερη αβεβαιότητα στο ρίσκο, συγκρινόμενη με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το υποσύνολο των πετρελαιοφόρων πλοίων.

Οι τιμές του μέσου IQV για το κάτω όριο είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες για το άνω όριο της εκτίμησης. Επομένως, οι κατανομές του περιβαλλοντικού ρίσκου, οι οποίες προκύπτουν για κάθε ναυάγιο, για το άνω όριο είναι, κατά μέσο όρο, λιγότερο συγκεντρωμένες γύρω από μια συγκεκριμένη κατηγορία ρίσκου. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το αντίστοιχο αποτέλεσμα για το υποσύνολο των πετρελαιοφόρων πλοίων. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμων στο άνω όριο της εκτίμησης

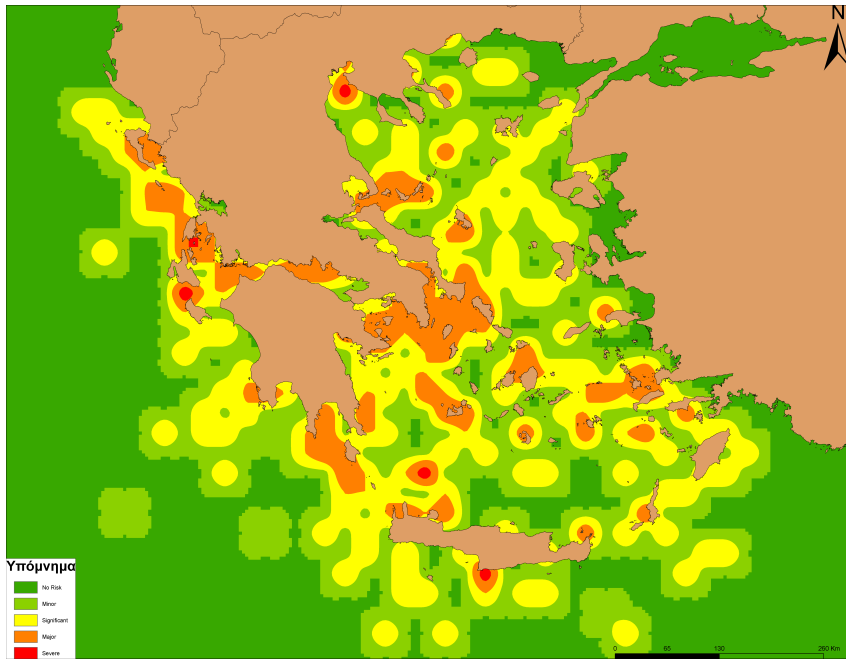
δεν είναι τόσο μεγάλες όσο οι αντίστοιχες για το φορτίο και επομένως οι τιμές του ρίσκου έχουν μεγαλύτερη διασπορά στις διαθέσιμες κατηγορίες. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι, στην περίπτωση των μη-πετρελαιοφόρων πλοίων, το άνω όριο επηρεάζεται περισσότερο από τη μεταβλητότητα στις ποσότητες των καυσίμων.

Γενικές παρατηρήσεις. Η συνολική μεταβλητότητα του αποτελέσματος, όταν λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες τόσο για τα καύσιμα όσο και για το φορτίο πετρελαιο, διαφέρει από το αλγεβρικό άθροισμα των τιμών της μεταβλητότητας όταν λαμβάνεται υπόψη μόνο η μία εκ των δύο μεταβλητών. Αυτό είναι μια ένδειξη του μη γραμμικού χαρακτήρα του υπολογιστικού μοντέλου.

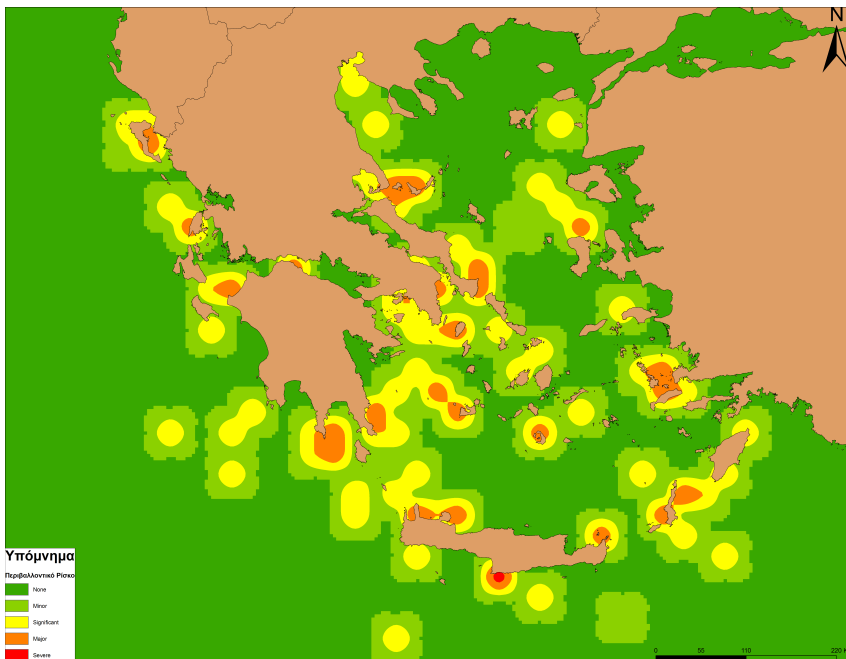
Επιπλέον, για τον προσδιορισμό του μεγέθους της επίδρασης της πιθανής εναπομένουσας ποσότητας πετρελαίου στην αβεβαιότητα του ρίσκου, εξετάζεται αν η συχνότερη τιμή (mode) της κατανομής ρίσκου που προκύπτει διαφέρει από το αρχικό αποτέλεσμα του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, είτε για το υποσύνολο των πετρελαιοφόρων ή αυτό των μη-πετρελαιοφόρων πλοίων, υποδηλώνουν ότι αυτό ισχύει για ένα πολύ μικρό ποσοστό των ναυαγίων, περίπου 0.5%. Αυτό σημαίνει ότι μεταβάλλοντας την πιθανή εναπομένουσα ποσότητα πετρελαίου, σύμφωνα με κάποια κατανομή πιθανότητας, το επίπεδο του περιβαλλοντικού ρίσκου για κάθε ναυάγιο δεν επηρεάζεται σημαντικά. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η συνεισφορά της ποσότητας πετρελαίου⁴ στην αβεβαιότητα του περιβαλλοντικού ρίσκου είναι γενικά μικρή.

Η αβεβαιότητα του περιβαλλοντικού ρίσκου, η οποία μελετάται στην ανάλυση αβεβαιότητας, μπορεί να μεταβάλλει τα αποτελέσματα της ανάλυσης στην περίπτωση που η αβεβαιότητα στις ποσότητες των καυσίμων και του φορτίου πετρελαίου μειωθεί, για παράδειγμα μέσω ακριβέστερων εκτιμήσεων ή απόκτηση πληρέστερης πληροφόρησης. Στα Σχ. 6.36 και 6.37, κάτω και άνω όριο της εκτίμησης αντίστοιχα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα για όλα τα ναυάγια με τα αποτελέσματα των ναυαγίων για τα οποία υπήρχε πληροφορία για τις ποσότητες των καυσίμων ή του φορτίου πετρελαίου. Στην εικόνα που εμφανίζεται στη δεύτερη περίπτωση κάποιες περιοχές που εμφανίζονταν με υψηλές τιμές φαίνεται ότι έχουν τώρα χαμηλότερες τιμές ρίσκου. Η διαφορά που εμφανίζεται ανάμεσα στις δύο εικόνες είναι ένδειξη του μεγέθους της μεταβολής των αποτελεσμάτων για το ρίσκο κάθε ναυαγίου, όταν αυξάνεται η ποιότητα της πληροφορίας που είναι διαθέσιμη.

⁴ Η ποσότητα πετρελαίου περιλαμβάνει την ποσότητα τόσο των καυσίμων όσο και του φορτίου πετρελαίου.

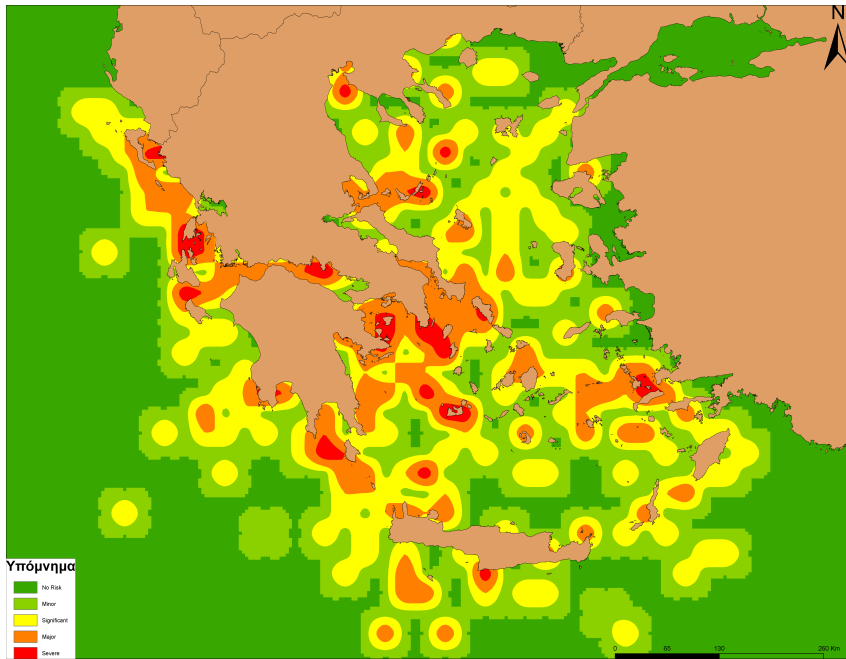


(α) Αποτελέσματα με όλα τα ναυάγια

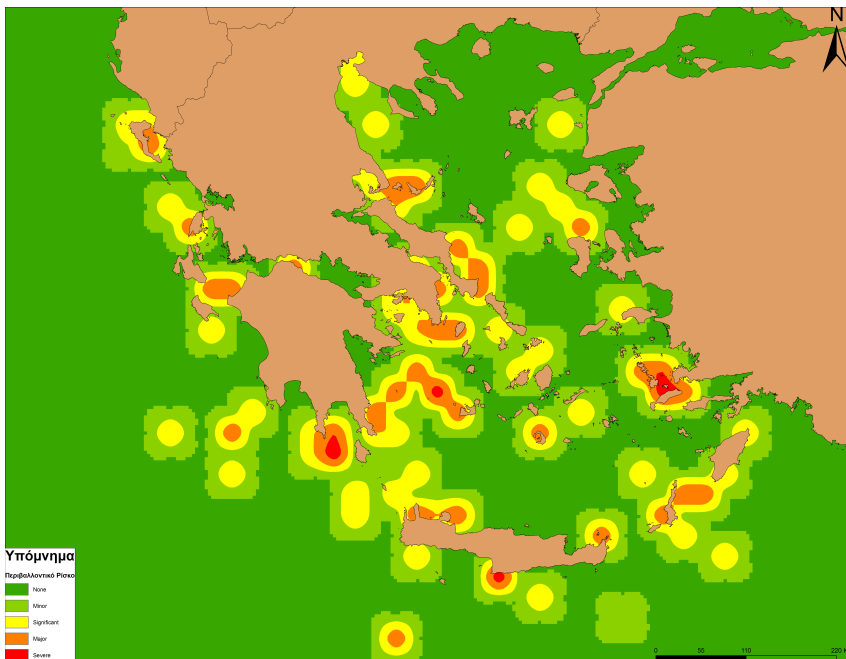


(β') Αποτελέσματα με τα ναυάγια με πληρέστερη πληροφόρηση

Σχήμα 6.36.: Σύγκριση περιοχών με παρόμοιο περιβαλλοντικό ρίσκο (χάτω όριο)



(α) Αποτελέσματα με όλα τα ναυάγια



(β') Αποτελέσματα με τα ναυάγια με πληρέστερη πληροφόρηση

Σχήμα 6.37.: Σύγκριση περιοχών με παρόμοιο περιβαλλοντικό ρίσκο (άνω όριο)

7. Συμπεράσματα

Η ξαφνική ή χρόνια διαρροή εγκλωβισμένου πετρελαίου από πλήρως βυθισμένα ναυάγια έχει τραβήξει το ενδιαφέρον διεθνώς, ιδιαίτερα με την παρατήρηση διαρροών πετρελαίου από συγκεκριμένα ναυάγια. Οι χαρακτηριστικότερες αναφορές σε αυτό το πρόβλημα στη διεθνή βιβλιογραφία είναι οι εργασίες της Etkin [46], του Dr. Ida-Maja Hasselov [26] και αυτή του Monfils [48].

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αναγνώριση και η εκτίμηση του μεγέθους του προβλήματος για την Ελλάδα. Αυτό επιτυγχάνεται με τα ακόλουθα βήματα: την κατάρτιση μιας βάσης δεδομένων με ναυάγια, την εκτίμηση των εγκλωβισμένων ποσοτήτων πετρελαίου για κάθε ναυάγιο και τέλος την εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου που προκύπτει για το κάθε ναυάγιο, χρησιμοποιώντας μια σειρά κριτηρίων.

Η βάση δεδομένων που καταρτίστηκε περιέχει 402 περιπτώσεις ναυαγίων που βυθίστηκαν μετά το 1940 και είναι σημαντικού μεγέθους¹. Αυτός ο αριθμός αποτελεί περίπου το 40% των συνολικών καταγεγραμμένων ναυτικών απωλειών στην Ελλάδα την ίδια περίοδο. Περίπου το 50% αυτών των περιπτώσεων βυθίστηκαν κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, ενώ τα πολεμικά πλοία αποτελούν μόνο το 15% της βάσης δεδομένων. Η πλειοψηφία των ναυαγίων βρίσκονται βυθισμένα για περισσότερα από 40 χρόνια και άρα χαρακτηρίζονται ως παλαιά ναυάγια. Τα πετρελαιοφόρα πλοία αποτελούν το 7% της βάσης δεδομένων ενώ τα μη-πετρελαιοφόρα το 93%. Επιπλέον, τα περισσότερα ναυάγια βρίσκονται σε μικρά και μεσαία βάθη (έως 500 m) και σε αποστάσεις μικρές και μεσαίες από τις κοντινότερες ακτές (έως 10 nm).

Η έλλειψη πληροφοριών για τις πιθανώς εγκλωβισμένες ποσότητες πετρελαίου στα ναυάγια οδήγησαν σε σχετικές εκτιμήσεις. Αυτές βασίζονται σε κάποιες υποθέσεις που είναι τμήμα μιας ευρύτερης μεθοδολογίας που διακρίνει τα πλοία ανάλογα με τον τύπο τους και υπολογίζει τελικά ένα διάστημα εκτίμησης. Η συνολική ποσότητα εγκλωβισμένου πετρελαίου στις ελληνικές θάλασσες εκτιμάται ότι είναι από 18,000 έως 133,000 tons. Ποσοστό μεγαλύτερο του 50% αυτών των ποσοτήτων πιθανότατα βρίσκεται εγκλωβισμένο σε πετρελαιοφόρα πλοία. Επίσης, συγκρίνοντας αυτές τις εκτιμήσεις με αντίστοιχες που έχουν γίνει για ολόκληρη τη Μεσόγειο [46] εκτιμάται ότι η Ελλάδα συγκεντρώνει περίπου το 13.5% της συνολικής ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου. Η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει την εκτίμηση των εγκλωβισμένων ποσοτήτων πετρελαίου οδηγεί στην εκτίμηση ενός διαστήματος τιμών με αρκετά μεγάλο εύρος, και επομένως είναι σημαντική η βελτίωση των εκτιμήσεων.

Η εκτίμηση του περιβαλλοντικού ρίσκου, για κάθε ναυάγιο, επιτυγχάνεται μέσω ενός ασαφούς συστήματος με ιεραρχική δομή (Hierarchical Fuzzy Inference System), το οποίο συνδυάζει τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί. Η εφαρμογή του υπολογιστικού μοντέλου δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα για το κάθε ναυάγιο: την επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου, την ένταση των συνεπειών από μια πιθανή διαρροή και το περιβαλλοντικό ρίσκο. Τα περισσότερα ναυάγια της βάσης δεδομένων έχουν μεγάλη (Major) επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου, ενώ εμφανίζουν Marginal ένταση συνεπειών στο κάτω άκρο και Critical στο άνω άκρο της εκτίμησης. Συνδυάζοντας αυτά τα αποτελέσματα, οι περισσότερες περιπτώσεις έχουν

¹ Υπενθυμίζεται ότι σημαντικό μέγεθος ορίζεται με βάση την ολική χωρητικότητα, άνω των 150 GT για τα πετρελαιοφόρα και άνω των 400 GT για τα μη-πετρελαιοφόρα πλοία.

σημαντικό περιβαλλοντικό ρίσκο (Significant Risk), τόσο για το κάτω όσο και για το άνω άκρο του διαστήματος εκτίμησης. Η γεωγραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι μεγάλη επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου εμφανίζεται σε περιοχές όπου βρίσκονται παλαιά ναυάγια σε μικρά βάθη, και μεγάλη ένταση συνεπειών εμφανίζεται σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση της εκτιμώμενης ποσότητας εγκλωβισμένου πετρελαίου, και τα ναυάγια βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τις ακτές και τις προστατευόμενες περιοχές NATURA 2000.

Συγκρίνοντας το περιβαλλοντικό ρίσκο των διαφόρων γεωγραφικών περιοχών προκύπτει ότι η μεγαλύτερη συγκέντρωση εμφανίζεται στις περιοχές του Σαρωνικού, του Θερμαϊκού, και του Πατραϊκού Κόλπου, όπου βρίσκονται τα κύρια λιμάνια της Ελλάδας. Αυτές οι περιοχές συνδυάζουν μεγάλη συγκέντρωση ναυαγίων και ποσοτήτων εγκλωβισμένου πετρελαίου, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις.

Η αβεβαιότητα που υπάρχει στις εκτιμήσεις των πιθανών ποσοτήτων εγκλωβισμένου πετρελαίου μοντελοποιήθηκε στα πρώτα στάδια της ανάλυσης μέσω ενός διαστήματος τιμών. Διεξήχθη μια ανάλυση αβεβαιότητας, για να εξεταστεί περαιτέρω η σχετική επίδραση των μεταβλητών «Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένων καυσίμων» και «Πιθανή ποσότητα εγκλωβισμένου φορτίου πετρελαίου» στην αβεβαιότητα του περιβαλλοντικού ρίσκου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η αβεβαιότητα του φορτίου πετρελαίου επηρεάζει αποκλειστικά την αβεβαιότητα του ρίσκου, καθότι οι ποσότητες του φορτίου πετρελαίου είναι, σχεδόν για όλες τις περιπτώσεις, κατά πολύ μεγαλύτερες από αυτές των καυσίμων.

Οι πιο σημαντικές μεταβλητές που συμμετέχουν στον προσδιορισμό του περιβαλλοντικού ρίσκου κάθε ναυαγίου είναι η ποσότητα του πετρελαίου που εκτιμάται ότι έχει παγιδευτεί στο ναυάγιο (είτε ως καύσιμο ή φορτίο), η τοποθεσία του πετρελαίου στο ναυάγιο (μέσα σε δεξαμενές ή και διάσπαρτο εντός των ορίων της γάστρας), και η απόσταση του ναυαγίου από πόρους, οικονομικούς ή περιβαλλοντικούς, που βρίσκονται κοντά σε αυτό.

Η ραγδαία ανάπτυξη της ναυτιλιακής βιομηχανίας, συνοδευόμενη από ανεπιθύμητες επιπτώσεις όπως η λειτουργική ή η ατυχηματική διαρροή πετρελαίου στη θάλασσα, πρέπει να δώσει προτεραιότητα στην αντιμετώπιση αυτών και άλλων προβλημάτων. Η πιθανή διαρροή πετρελαίου από πλήρως βυθισμένα ναυάγια, που συχνά υπερκαλύπτεται από τα προβλήματα που προκύπτουν από τις εκπομπές ρύπων ή τις ατυχηματικές διαρροές πετρελαίου, είναι ένας πραγματικός κίνδυνος για το περιβάλλον αλλά και για διάφορες οικονομικές δραστηριότητες - όπως για παράδειγμα ο τουρισμός, η αλιεία, και η βιομηχανία - των τοπικών κοινωνιών, ο οποίος πρέπει να αντιμετωπιστεί με προληπτικό τρόπο. Η αντιμετώπιση αυτού του κινδύνου μπορεί να υποστηριχθεί από το σύστημα ασαφούς λογικής, που αναπτύχθηκε, ως τμήμα μιας ευρύτερης διαδικασίας λήψεως αποφάσεων για την ιεράρχηση των ναυαγίων ανάλογα με το περιβαλλοντικό ρίσκο που προβάλλουν και στη συνέχεια τον εντοπισμό των επιχειρήσεων απάντλησης πετρελαιοειδών και αδρανοποίησης των ναυαγίων καταρχήν στις περιοχές και κατόπιν στα ναυάγια που συνδυάζουν μεγάλη επικινδυνότητα διαρροής πετρελαίου με μεγάλες συνέπειες. Αυτό είναι απαραίτητο για την κατάλληλη κατανομή των περιορισμένων διαθέσιμων οικονομικών πόρων, αφού πολλές φορές οι επιχειρήσεις εξουδετέρωσης των επικινδύνων ναυαγίων έχουν εξαιρετικό κόστος για τους εμπλεκόμενους.

Η σημαντική έκταση των πιθανών συνεπειών για το περιβάλλον καθώς και το μεγάλο κόστος των επιχειρήσεων απορρύπανσης, κατόπιν μιας διαρροής πετρελαίου στο θαλάσσιο περιβάλλον, τονίζουν τη σημασία της προληπτικής αντιμετώπισης μιας πιθανής διαρροής από τα πλήρως βυθισμένα ναυάγια. Τέλος, ο κίνδυνος που προκύπτει από τα πλήρως βυθισμένα ναυάγια και σχετίζεται με τη διαρροή πιθανώς εγκλωβισμένων ποσοτήτων πετρελαίου, μπορεί να είναι τόσο υψηλός ώστε να χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση, για την οποία μια λεπτομερέστερη ανάλυση του ρίσκου μπορεί να αποδειχθεί ένα χρήσιμο εργαλείο.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τα προκαταρ-

κτικά στάδια μιας ανάλυσης του ρίσκου από τη διαρροή πετρελαίου από ναυάγια. Μελλοντική επέκταση του μοντέλου θα μπορούσε να περιλαμβάνει περισσότερους παράγοντες, όπως για παράδειγμα την μοντελοποίηση της κίνησης μιας πιθανής κηλίδας πετρελαίου για την ακριβέστερη εκτίμηση των συνεπειών που προκύπτουν από αυτή και τη λεπτομερέστερη μελέτη της διάβρωσης των ναυαγίων για την πρόβλεψη της κατάρρευσης της μεταλλικής κατασκευής αυτού οπότε θα προκύψει και η διαρροή του εγκλωβισμένου πετρελαίου.

Α'. Παράρτημα

Α'.1. Γεωγραφικά Δεδομένα και Μέθοδος Ανάλυσης

Στα Σχ. Α'.1-Α'.2 δίνονται οι χάρτες με τα γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ρίσκου και στην εφαρμογή του μοντέλου. Για το βασικό γεωγραφικό χάρτη της Ελλάδας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που διατίθενται από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (European Environment Agency) στα πλαίσια του προγράμματος CORINE Land Cover [15]. Για τη βαθυμετρία στα Ελληνικά χωρικά ύδατα χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία από Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) [44]. Τα δεδομένα για τις παράκτιες περιοχές στην Ελλάδα διατίθενται στην ιστοσελίδα «Δημόσια, Ανοικτά Δεδομένα» από το Ελληνικό Κράτος [60]. Ο χάρτης με τους τύπους των ακτών προέκυψε από τη σύνθεση στοιχείων που διατίθενται στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος CORINE Land Cover [15] και την εξέταση φωτογραφιών που βρίσκονται στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών Google Earth. Τα όρια των προστατευμένων περιοχών που ανήκουν στο δίκτυο NATURA 2000 διατίθενται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής [17]. Ο χάρτης που απεικονίζει την επιφανειακή θαλάσσια κυκλοφορία στα Ελληνικά χωρικά ύδατα είναι σύνθεση δεδομένων από ωκεανογραφικές μελέτες που έχουν γίνει για την περιοχή [53, 61, 37] και κάποιες πληροφορίες από την ιστοσελίδα για τη Μεσόγειο στην Wikipedia [78].

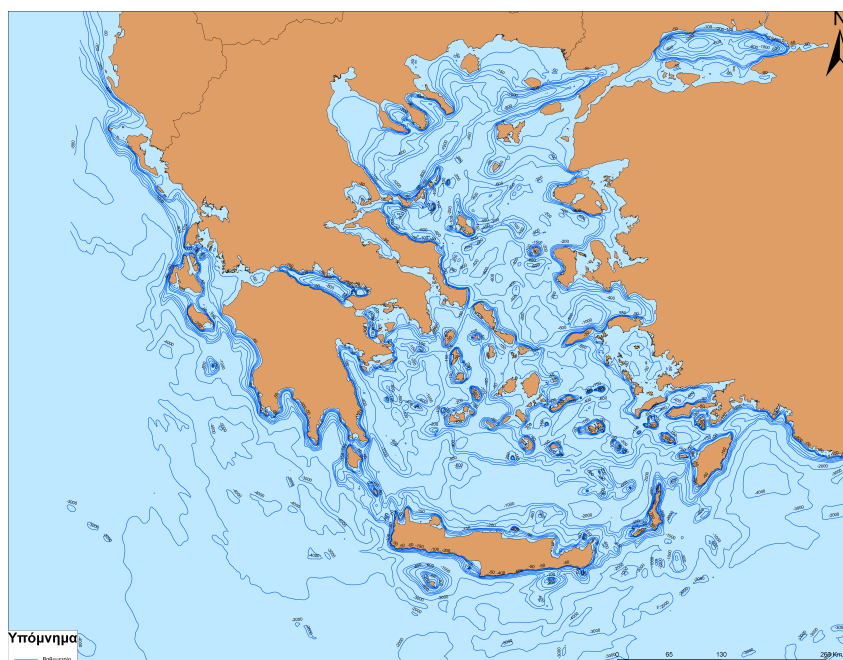
Η γεωγραφική ανάλυση των αποτελεσμάτων βασίστηκε σε ένα ομοιόμορφο κάναβο (grid) που αποτελείται από τετραγωνικά κελιά. Το μέγεθος του κάθε κελιού επιλέχθηκε έτσι ώστε ένα μόνο κελί να μην περιέχει μια ολόκληρη γεωγραφική περιοχή. Η διάσταση που επιλέχθηκε για τα τετραγωνικά κελιά είναι 25 km (Σχ. Α'.6).

Η γεωγραφική ανάλυση, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, έχει δύο στόχους: 1) να χαρακτηρίσει μια περιοχή (κελί) ανάλογα με τις σημειακές τιμές που βρίσκονται μέσα σε αυτή, και 2) να απεικονίσει τον ανθρωπιστικό χαρακτήρα των αποτελεσμάτων, δηλαδή της επικινδυνότητας, των συνεπειών, και του ρίσκου, κατά γεωγραφική περιοχή.

Οι τιμές που περιέχονται σε κάθε κελί «αθροίζονται» με δύο τρόπους. Ο πρώτος αναθέτει σε κάθε κελί την τιμή που εμφανίζεται συχνότερα μέσα σε αυτό. Με αυτό τον τρόπο προέκυψε η απεικόνιση των περιοχών που χαρακτηρίζονται από παρόμοιες τιμές. Ο δεύτερος τρόπος αναθέτει σε κάθε κελί το άθροισμα των τιμών που περιέχονται σε αυτό. Κατόπιν, οι τιμές κάθε κελιού κανονικοποιήθηκαν με το συνολικό άθροισμα όλων των κελιών ώστε να προκύψουν απεικονίσεις όπου διαφορετικές περιοχές μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους.

Για την εξαγωγή των επιφανειών χρησιμοποιήθηκε χωρική παρεμβολή μεταξύ των τιμών του κάθε κελιού. Η μέθοδος της παρεμβολής που επιλέχθηκε είναι η μέθοδος της φυσικής γειτνίασης (natural neighbor interpolation). Η παρεμβολή με τη μέθοδο της φυσικής γειτνίασης (natural neighbor interpolation) βρίσκει το υποσύνολο δεδομένων με τη μικρότερη απόσταση από ένα δεδομένο σημείο και αναθέτει σε αυτά βάρη ανάλογα με την περιοχή που καταλαμβάνει το καθένα ώστε να προσδιοριστεί η τιμή της παρεμβολής για αυτό το σημείο. Οι βασικές ιδιότητες της μεθόδου είναι ο τοπικός χαρακτήρας, εφόσον χρησιμοποιεί μόνο ένα υποσύνολο από όλες τις διαθέσιμες τιμές για τον προσδιορισμό της τιμής παρεμβολής, και το ότι οι τιμές που παρεμβάλλονται βρίσκονται σίγουρα μέσα στο εύρος των διαθέσιμων τιμών. Η μέθοδος δεν δείχνει τάσεις ή κορυφές και κοιλάδες που δεν υπάρχουν ήδη στις

διαθέσιμες τιμές. Επιπλέον λειτουργεί εξίσου καλά τόσο με κανονικά όσο και ακανόνιστα διατεταγμένες τιμές στο χώρο.



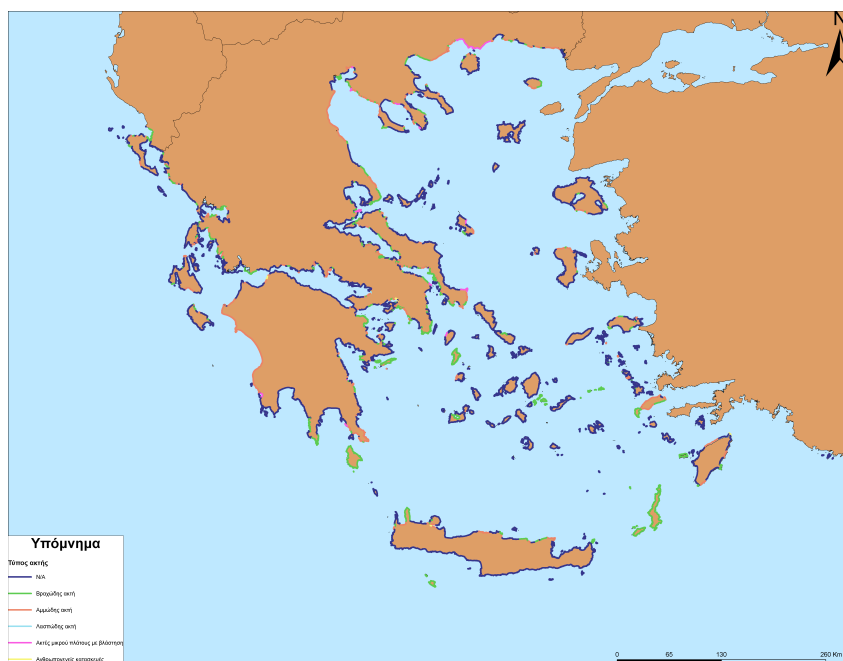
Σχήμα Α'.1.: Στοιχεία βαθυμετρίας για την Ελλάδα



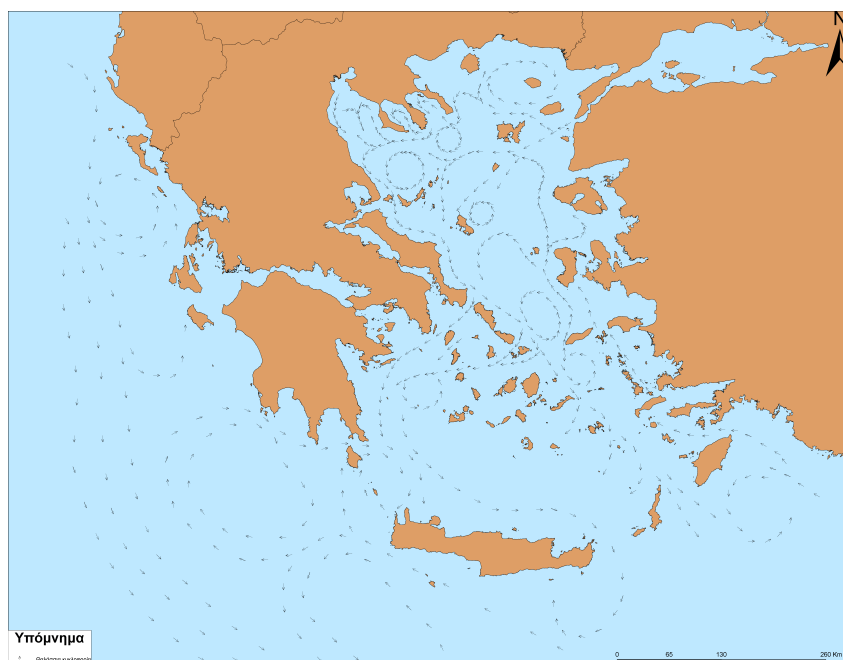
Σχήμα Α'.2.: Γεωγραφική έκταση προστατευόμενων περιοχών NATURA 2000



Σχήμα Α'.3.: Γεωγραφική έκταση των παράκτιων περιοχών



Σχήμα Α'.4.: Κατάταξη των Ελληνικών ακτών κατά τύπο



Σχήμα Α'.5.: Επιφανειακή θαλάσσια κυκλοφορία



Σχήμα Α'.6.: Γεωγραφικός κάναβος ανάλυσης

Βιβλιογραφία

- [1] Aa, T.J., A. Voie Øyvind, L. Marita, M. Opstad Aase, B.L. Haldor, and H. Fatima: *Investigation and risk assessment of ships loaded with chemical ammunition scuttled in skagerrak*. Technical report, FFI/RAPPORT-2002/04951, 2002.
- [2] Αλμπανάκης, Κωνσταντίνος: *Μαθήματα Ωκεανογραφίας*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2007.
- [3] Anderson, Caryn: *Persistent vs non-persistent oils: What you need to know*. Beacon (Skuld Newsletter), July 2001.
- [4] Bainbridge, J., H. Christensen, W. Hensel, P.C. Sames, R. Skjong, M.P. Sobrino, T. Strang, and D. Vassalos: *Design/operation/regulation for safety-safedor*. In *International Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures (PRADS)*, pages 98–117, 2004.
- [5] Balmat, Jean François, Frédéric Lafont, Robert Maifret, and Nathalie Pessel: *Maritime risk assessment (marisa), a fuzzy approach to define an individual ship risk factor*. *Ocean Engineering*, 36(15-16):1278–1286, November 2009, ISSN 00298018. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801809001607>.
- [6] Balmat, J.F., F. Lafont, R. Maifret, and N. Pessel: *A decision-making system to maritime risk assessment*. *Ocean Engineering*, 2010, ISSN 0029-8018.
- [7] Barrett, M.J.: *Potentially Polluting Shipwrecks*. PhD thesis, School of the Environment, Duke University, 2011.
- [8] Bedford, T. and R.M. Cooke: *Probabilistic risk analysis: foundations and methods*. Cambridge Univ Pr, 2001, ISBN 0521773202.
- [9] Brown, Hugh: *International registry of sunken ships*, 1995. <http://www.shipwreckregistry.com/>.
- [10] Carkin, Brad: *Long-term management strategies for uss arizona, a submerged cultural resource in pearl harbor*. Technical report, Department of Defense Legacy Resource Management Program, September 2008.
- [11] Darbra, RM and J Casal: *Environmental risk assessment of accidental releases in chemical plants through fuzzy logic*. *Chemical Engineering*, 17:287, 2009. <http://www.aidic.it/cet/09/17/049.pdf>.
- [12] Deru, W and J Eloff: *Risk analysis modelling with the use of fuzzy logic*. *Computers & Security*, 15(3):239–248, 1996, ISSN 01674048. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0167404896000089>.
- [13] Dikmen, I, M Birgonul, and S Han: *Using fuzzy risk assessment to rate cost overrun risk in international construction projects*. *International Journal of Project Management*, 25(5):494–505, July 2007, ISSN 02637863. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263786306001827>.

- [14] Doctors, Corrosion: *Variations of seawater properties with depth*. <http://corrosion-doctors.org/Seawater/depth.htm>.
- [15] EEA: *Corine land cover*. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps>.
- [16] Elordui-Zapatarietxe, Saioa, Antoni Rosell-Melé, Núria Moraleda, Imma Tolosa, and Joan Albaigés: *Phase distribution of hydrocarbons in the water column after a pelagic deep ocean oil spill*. *Marine Pollution Bulletin*, 60(10):1667 – 1673, 2010, ISSN 0025-326X. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X10002936>.
- [17] Environment, Energy & Climatic Change Ministry for: *Natura 2000 network and protected areas*. <http://www.minenv.gr/1/12/121/12103/g1210300.html>.
- [18] Etkin, D.S., J.A.C.H. van Rooij, G.M.S. BV, and D.F. McCay: *Risk assessment modeling approach for the prioritization of oil removal operations from sunken wrecks*, 2009.
- [19] Everitt, B. and A. Skrondal: *The Cambridge dictionary of statistics*. Cambridge University Press, 2002, ISBN 052181099X.
- [20] Fairplay, IHS: *Casualty database*, 2010. <http://www.sea-web.com/>.
- [21] Foecke, T., L. Ma, M.A. Russell, D.L. Conlin, and L.E. Murphy: *Investigating archaeological site formation processes on the battleship uss arizona using finite element analysis*. *Journal of Archaeological Science*, 37(5):1090–1101, 2010.
- [22] Gallego, L: *Lightning risk assessment using fuzzy logic*. *Journal of Electrostatics*, 60(2-4):233–239, March 2004, ISSN 03043886. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304388604000282>.
- [23] Gardiner, R., S. Chumbley, and P. Budzbon: *Conway's all the world's fighting ships, 1947-1995*. Naval Institute Press (Annapolis, Md.), 1995.
- [24] Garzke, W. H., R. O. Dulin, D. K. Brown, and K. Prince: *Marine forensics for naval architects and marine engineers*. *Naval Engineers Journal*, 112(4):249–264, 2000, ISSN 1559-3584. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1559-3584.2000.tb03335.x>.
- [25] Hansson, Sven Ove: *Risk*. In Zalta, Edward N. (editor): *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Winter 2008 edition, 2008.
- [26] Hasselov, Dr. Ida Maja: *Pre-study of ship wreck assessment and remediation*. Technical report, CHALMERS INDUSTRIOTEKNIK, Goteborg, 2007.
- [27] Huang, Chongfu: *Risk analysis with information described in natural language*. *Computational Science–ICCS 2007*, pages 1016–1023, 2007. <http://www.springerlink.com/index/m063wj2790522r66.pdf>.
- [28] Hubbard, D.W.: *The failure of risk management: why it's broken and how to fix it*. John Wiley & Sons Inc, 2009, ISBN 0470387955.
- [29] IMO: *Nairobi international convention on the removal of wrecks, 2007*. IMO Publishing, 2008.
- [30] Θ. Σκουλικίδης, Π. Βασιλείου: *Διάβρωση και Προστασία Υλικών*. Συμμένων, Αθήνα, β' έκδοση, 2007.

- [31] Johnson, D.L., B.M. Wilson, J.D. Carr, M.A. Russell, L.E. Murphy, and D.L. Conlin: *Corrosion of steel shipwreck in the marine environment: Uss arizona-part 1*. Materials performance, 45(10):40–44, 2006.
- [32] Kamm, N.: *An overview of pollution from shipwrecks*. 2008.
- [33] Kaplan, S. and B.J. Garrick: *On the quantitative definition of risk*. Risk analysis, 1(1):11–27, 1981.
- [34] Kelly-Gerreyn, B.A., D.J. Hydes, M.C. Hartman, J. Siddorn, P. Hyder, and M.W. Holt: *The phosphoric acid leak from the wreck of the mv ece in the english channel in 2006: Assessment with a ship of opportunity, an operational ecosystem model and historical data*. Marine pollution bulletin, 54(7):850–862, 2007.
- [35] Kester, Dana R.: *Sea water, gases in*. <http://www.waterencyclopedia.com/Re-St/Sea-Water-Gases-in.html>.
- [36] King, J.: *An inquiry into the causes of shipwrecks: Its implications for the prevention of pollution*. Marine Policy, 19(6):469–475, 1995.
- [37] Leitz, J.M.: *Ionian sea surface temperature: satellite and drifter observations, may to october, 1995*. Msc in physical oceanography thesis, DTIC Document, 1999.
- [38] MacLeoda, I., P. Morrisonb, V. Richardsa, and N. Westc: *Corrosion monitoring and the environmental impact of decommissioned naval vessels as artificial reefs*. In *Metal 04: Proceedings of the International Conference on Metals Conservation, Canberra, 4-8 October 2004*, pages 53–74, 2004.
- [39] Maeda, H.: *An investigation on the spread of fuzziness in multi-fold multi-stage approximation reasoning by pictorial representation - under sup-min composition and triangular type membership function*. Fuzzy Sets and Systems, 80:133–148, 1996.
- [40] Mahant, N.: *Risk assessment is fuzzy business-fuzzy logic provides the way to assess off-site risk from industrial installations*. Risk, 2004, 2004.
- [41] Malinowska, A.: *A fuzzy inference-based approach for building damage risk assessment on mining terrains*. Journal of Engineering Structures, 2010.
- [42] Μαμαλούκας Φραγκούλης Βασίλειος, Πανταζάκος Γιώργος, Βολάκης Στέλιος: *Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων: Ναυάγιο Μ/Σ Αβαντις ΙΙΙ στη Θάλασσα Περιοχή της Νήσου Αγκίστρι*. Τεχνική αναφορά, Απρίλιος 2007.
- [43] Mamdani, E.H. and S. Assilian: *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. International Journal of Man-Machine Studies, 7(1):1 – 13, 1975, ISSN 0020-7373. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WGS-4T73MHB-2/2/dbafdc3cee4f8c37f68b4d698b71728f>.
- [44] Marine Research, Hellenic Center for: *Marine geographic information systems*. <http://arch.her.hcmr.gr/>.
- [45] McGrath, G.G., H. Parker-Hall, A. Nack, and J. Tarpley: *The investigation to identify the ss jacob luckenbach-using technology to locate a hidden source of oil that caused years of impacts and the future implications of sunken shipwrecks*. In *Proceedings of the 2003 International Oil Spill Conference*, 2003.

- [46] Michel, J., G. Trevor, J. Waldron, CT Blocksisidge, DS Etkin, and R. Urban: *Potentially polluting wrecks in marine waters*. In *2005 International Oil Spill Conference*. Miami, Florida.[Links], pages 1–84, 2005.
- [47] Monfils, R.: *The global risk of marine pollution from wwii shipwrecks: Examples from seven seas*. In *International Oil Spill Conference*, 2005.
- [48] Monfils, R., T. Gilbert, and S. Nawadra: *Sunken wwii shipwrecks of the pacific and east asia: The need for regional collaboration to address the potential marine pollution threat*. *Ocean & coastal management*, 49(9-10):779–788, 2006.
- [49] NASA: *Ocean in motion: Ekman transport background*. <http://oceanmotion.org/html/background/ocean-in-motion.htm>.
- [50] Nascimento, L.F.C., P.M.S.R. Rizol, and L.B. Abiuzi: *Establishing the risk of neonatal mortality using a fuzzy predictive model*. *Cadernos de Saúde Pública*, 25(9):2043–2052, 2009, ISSN 0102-311X.
- [51] Nissen, V: *Management applications of fuzzy control*. In *Proceedings of the 52nd International Scientific Colloquium, Ilmenau*, number September, 2007. http://www3.tu-ilmenau.de/fakww/fileadmin/template/fakww/Institute_und_Fachgebiete/Wirtschaftsinformatik/Wirtschaftsinformatik_2/Dokumente/OnlinePublikationen/IWK-Ilmenau_Management_Applications_of_Fuzzy_Control.pdf.
- [52] Ντούνης, Χ.: *Ta Nauágia των Ελληνικών Θαλασσών*, τόμος Α, Β. Φινιατεκ Α.Ε., Αθήνα, 2001.
- [53] Olson, D.B., V.H. Kourafalou, W.E. Johns, G. Samuels, and M. Veneziani: *Aegean surface circulation from a satellite-tracked drifter array*. *Journal of physical oceanography*, 37(7):1898–1917, 2007.
- [54] Overfield, M.L.: *Resources and undersea threats (rust) database: An assessment tool for identifying and evaluating submerged hazards within the national marine sanctuaries*. *Marine Technology Society Journal*, 38(3):72–77, 2004.
- [55] Overfield, M.L. and M. Archaeologist: *Corrosion on deep gulf shipwrecks of world war ii*.
- [56] Prego, R. and A. Cobelo-Garci'a: *Cadmium, copper and lead contamination of the seawater column on the prestige shipwreck (ne atlantic ocean)*. *Analytica chimica acta*, 524(1-2):23–26, 2004.
- [57] Psarros, G., R. Skjong, and M.S. Eide: *Under-reporting of maritime accidents*. *Accident Analysis & Prevention*, 42(2):619–625, 2010, ISSN 0001-4575.
- [58] Raju, GVS and J. Zhou: *Adaptive hierarchical fuzzy controller*. *Systems, Man and Cybernetics*, *IEEE Transactions on*, 23(4):973–980, 1993, ISSN 0018-9472.
- [59] Rasmussen, N. *et al.*: *Reactor safety study*. WASH-1400 (Draft). National Technical Information Service, US Department of Commerce, Springfield, Virginia, 1974.
- [60] Republic, Hellenic: *Public, open data*. <http://geodata.gov.gr>.

- [61] Robinson, A.R., W.G. Leslie, A. Theocharis, and A. Lascaratos: *Mediterranean sea circulation*. Ocean Currents: A Derivative of the Encyclopedia of Ocean Sciences, page 283, 2009.
- [62] Rogowska, J., L. Wolska, and J. Namiesnik: *Impacts of pollution derived from ship wrecks on the marine environment on the basis of s/s stuttgart*. Science of the Total Environment, 2010.
- [63] Ross, T.J.: *Fuzzy logic with engineering applications*. Wiley, 2004, ISBN 0470860758.
- [64] Russell, M.A., D.L. Conlin, L.E. Murphy, D.L. Johnson, B.M. Wilson, and J.D. Carr: *A minimum-impact method for measuring corrosion rate of steel-hulled shipwrecks in seawater*. International Journal of Nautical Archaeology, 35(2):310–318, 2006.
- [65] Russell, M.A., L.E. Murphy, D.L. Johnson, T.J. Foecke, P.J. Morris, and R. Mitchell: *Science for stewardship: Multidisciplinary research on uss arizona*. Marine Technology Society Journal, 38(3):54–63, 2004.
- [66] Sherif, Y. *et al.*: *On risk and risk analysis*. Reliability Engineering & System Safety, 31(2):155–178, 1991, ISSN 0951-8320.
- [67] Sii, H: *A fuzzy-logic-based approach to qualitative safety modelling for marine systems*. Reliability Engineering & System Safety, 73(1):19–34, July 2001, ISSN 09518320. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951832001000230>.
- [68] Sii, HS, J Wang, T Ruxton, and JB Yang: *Application of fuzzy logic approaches to safety assessment in maritime engineering applications*. pages 1–22. http://php.portals.mbs.ac.uk/Portals/49/docs/jyang/SiiWangRuxtonYang_Fuzzy_Logic_in_JMET.pdf.
- [69] Sivanandam, SN, S. Sumathi, and SN Deepa: *Introduction to fuzzy logic using MATLAB*. Springer Verlag, 2007.
- [70] Talouli, A., T. Gilbert, R.M. Gilbert, and S. Australia: *Strategic environmental assessment and potential future shoreline impacts of the oil spill from wwii shipwreck hoyo maru chuuk lagoon - federated states of micronesia*.
- [71] The MathWorks, Inc.: *Fuzzy Logic Toolbox 2, User's Guide, MATLAB*. The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098, 2010a edition, March 2010.
- [72] Tsatalzinos, T., L. Iliadis, and S. Spartalis: *An intelligent fuzzy inference system for risk estimation using matlab platform: the case of forest fires in greece*. Artificial Intelligence Applications and Innovations III, 296:304–310, 2009. <http://www.springerlink.com/index/9W856M56PM6701VV.pdf>.
- [73] Tzafestas, S. G., A. N. Venetsanopoulos, and S. Terzakis: *Fuzzy sets and fuzzy reasoning: An introduction*. In *Fuzzy Reasoning in Information, Decision and Control Systems*, volume 11 of *Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering*, pages 3–29. Springer Netherlands, 1994, ISBN 978-0-585-34652-6. <http://www.springerlink.com/content/v1u104v544178k6r/>.
- [74] Ventikos, Nikolaos P.: *Ship source oil pollution: the problem, the synthesis and the environment*. Technical report, National Technical University of Athens, Athens, 2006.

- [75] Venugopal, C.: *Corrosion aspects of shipwreck metals of lakshadweep waters*. 1997.
- [76] Vose, D.: *Risk analysis: a quantitative guide*. John Wiley & Sons Inc, 2008, ISBN 0470512849.
- [77] Wang, X.J.Z. Di and J.A. Keane: *A survey of hierarchical fuzzy systems*. International Journal of Computational Cognition (HTTP://WWW.IJCC.US), 4(1):18, 2006. <http://www.yangsky.org/ijcc/pdf/ijcc412.pdf>, Invited Paper.
- [78] Wikipedia: *Mediterranean sea*. http://en.wikipedia.org/wiki/Mediterranean_Sea.
- [79] Wikipedia: *Thermohaline circulation — wikipedia, the free encyclopedia*, 2011. [\url{http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermohaline_circulation&oldid=430781933}](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermohaline_circulation&oldid=430781933), [Online; accessed 16-June-2011].
- [80] Wikipedia: *Vandal (tanker) — wikipedia, the free encyclopedia*, 2011. [\url{http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vandal_\(tanker\)&oldid=421577931}](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vandal_(tanker)&oldid=421577931), [Online; accessed 28-April-2011].
- [81] Zadeh, LA: *Fuzzy sets*. Information and Control, 8:338–353, January 1965. http://www.univ-savoie.fr/Portail/Groupes/listic2/busefal/Papers/69.zip/69_28.pdf.
- [82] Zadeh, LA: *The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems*. Fuzzy sets and Systems, 11:199–227, 1983. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165011483800815>.
- [83] Zeng, J., M. An, and N.J. Smith: *Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment*. International journal of project management, 25(6):589–600, 2007, ISSN 0263-7863.
- [84] Zeng, X.J. and J.A. Keane: *Approximation capabilities of hierarchical fuzzy systems*. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 13(5):659–672, 2005, ISSN 1063-6706.