



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

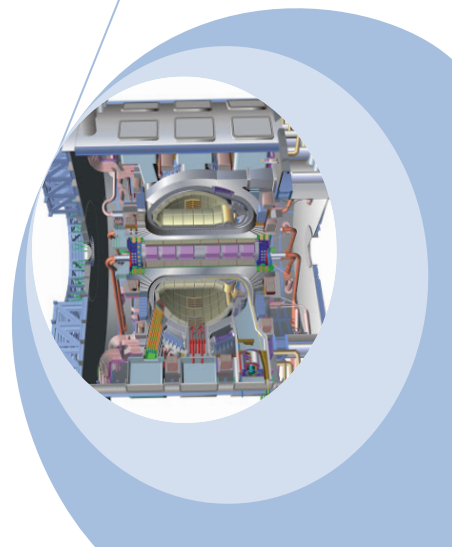
**Μελέτη ασφάλειας  
για πλοία που  
χρησιμοποιούν  
πυρηνική πρόωση.  
Η περίπτωση της  
σύγκρουσης και της  
προσάραξης**



Διπλωματική Εργασία

Εμμανουήλ Ε. Μιχαλέτος

Επιβλέπων:  
Δρ Νικόλαος Π. Βεντικός  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ



ΑΘΗΝΑ 2014



## Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων .....	3
Κατάλογος Σχημάτων.....	6
Κατάλογος Πινάκων.....	9
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ .....	12
ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑ.....	14
ΣΥΝΟΨΗ .....	16
SYNOPSIS .....	17
ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	24
1.1 Εισαγωγή.....	24
1.2 Η Πυρηνική ενέργεια και η χρήση της - Περιβαλλοντικές παράμετροι.....	24
1.3 Γενικές αρχές λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα σχάσης. Διαφορές με συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής .....	27
1.4 Σχεδιασμός, είδη και ασφάλεια πυρηνικών αντιδραστήρων .....	30
1.5 Ιστορική Εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων.....	35
1.6 Πυρηνικά ατυχήματα.....	38
1.7 Διαβάθμιση πυρηνικών ατυχημάτων.....	43
1.8 Η ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας και οι κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης..	45
1.9 Βιβλιογραφία 1 <sup>ο</sup> Κεφαλαίου .....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ. Η ΜΕΘΟΔΟΣ PSA – ΔΕΝΤΡΑ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ.....	50
2.1 Βασικές έννοιες από τη θεωρία του Ρίσκου και του Ανθρώπινου Παράγοντα .....	50
2.2 Ασφάλεια και χρήση της πυρηνικής ενέργειας .....	54
2.3 Η απαρχή της μεθόδου PSA .....	55
2.4 Ορισμός της Μεθόδου PSA.....	55
2.5 Σκοπός της Μεθόδου PSA.....	56
2.6 Επίπεδα Εφαρμογής της Μεθόδου .....	56
2.7 Αβεβαιότητα της Μεθόδου.....	61
2.8 Event Tree Analysis .....	61
2.9 Περιγραφή της μεθόδου ETA.....	62
2.10 Εφαρμογή της μεθόδου ETA σε πυρηνικό ατύχημα .....	64
2.11 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου ETA.....	67
2.12 Βιβλιογραφία 2 <sup>ο</sup> κεφαλαίου .....	67

<ul style="list-style-type: none"> <li>• «Probabilistic Safety Assessment: An analytical tool for assessing Nuclear Safety », International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Puerto Rico, USA, June 2002 .....</li> </ul>	68
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ.....</b>	<b>70</b>
3.1 Εισαγωγή .....	70
3.2 Ναυτικά ατυχήματα. Είδη, βασικά χαρακτηριστικά .....	70
3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τα ναυτικά ατυχήματα.....	73
3.4 Συνέπειες ναυτικών ατυχημάτων .....	79
3.5 Πρόσκρουση/Σύγκρουση Πλοίων (Collision).....	79
3.6 Προσάραξη Πλοίου .....	85
3.7 Η Μέθοδος FSA για τη μελέτη της ασφάλειας των πλοίων (Formal Safety Assesment) .....	88
3.8 Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> κεφαλαίου .....	93
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ / ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>95</b>
4.1 Εισαγωγή .....	95
4.2 Πυρηνική ενέργεια και θαλάσσιες μεταφορές.....	95
4.3 Χρήση πυρηνικής ενέργειας εν πλω.....	96
4.4 Ανεφοδιασμός των αντιδραστήρων και διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων .....	99
4.5 Μη πολεμικές θαλάσσιες εφαρμογές πυρηνοκίνητων πλοίων .....	101
4.6 Βασικά αρχές ασφάλειας πυρηνικών αντιδραστήρων σε πλοία – Παθητική ασφάλεια .....	107
4.7 Πυρηνικά ατυχήματα στο θαλάσσιο περιβάλλον - Πυρηνικά Υποβρύχια .....	109
4.8 Στοιχεία σχεδιασμού πλοίου με πυρηνική πρόωση.....	113
4.9 Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	124
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΑΞΗ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....</b>	<b>126</b>
5.1 Πορεία εργασίας.....	126
5.2 Σενάρια σύγκρουσης πλοίων.....	127
5.3 Σενάρια προσάραξης πλοίων.....	132
5.4 Βιβλιογραφία 5 <sup>ου</sup> Κεφαλαίου .....	137
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΈΚΤΟ: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΥΡΗΝΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΑΞΗ ΑΠΟ ΕΙΔΙΚΟΥΣ .....</b>	<b>139</b>
6.1 Ανάγκη αξιολόγησης.....	139
6.2 Η επιλογή των ειδικών .....	140

6.3 Τα ερωτηματολόγια για τη σύγκρουση και την προσάραξη .....	140
6.4 Επεξεργασία απαντήσεων .....	141
6.4.1. Η περίπτωση της σύγκρουσης.....	141
6.4.2 Η περίπτωση της προσάραξης.....	149
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΈΒΔΟΜΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	159
7.1 Γενικά.....	159
7.2 Γενικά συμπεράσματα για την περίπτωση ενός σύγκρουσης.....	159
7.3 Γενικά συμπεράσματα για την περίπτωση ενός προσάραξης.....	160
7.4 Η γνώμη των πυρηνικών επιστημόνων .....	161
7.5 Συμπεράσματα και εκτιμήσεις για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στις θαλάσσιες μεταφορές.....	162
7.6 Πρόταση επιλογής προωστήριας εγκατάστασης.....	164
7.7 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	164
7.8 Επίλογος .....	165
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣ ΕΙΔΙΚΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΑΞΗΣ ΠΥΡΗΝΟΚΙΝΗΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ .....	168
QUESTIONNAIRE FOR COLLISION ACCIDENTS INVOLVING NUCLEAR POWER SHIP(S).....	168
QUESTIONNAIRE FOR GROUNDING ACCIDENTS INVOLVING NUCLEAR POWER SHIP(S).....	186

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1 Share in Electricity Generation in European Union (Eurostat, 2010).....	26
Σχήμα 2 Nuclear chain reactions ( <a href="http://www.atomicarchive.com/">http://www.atomicarchive.com/</a> , access June 2014) .....	27
Σχήμα 3 Simplified example of conventional and nuclear power station (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ) .....	30
Σχήμα 4 A typical Pressurized Water Reactor (PWR) (World Nuclear Association, 2013)...	32
Σχήμα 5 A typical Boiling Water Reactor (BWR) (World Nuclear Association, 2013).....	32
Σχήμα 6 A simplified diagram showing whether a reactor is critical ( $\alpha$ ), subcritical ( $\beta$ ) or hypercritical ( $\gamma$ ) (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ) .....	33
Σχήμα 7 The inner of a nuclear reactor (World Nuclear Association, 2013) .....	34
Σχήμα 8 Nuclear reactors' Generations (US Department of Energy, access June 2014).....	38
Σχήμα 9 Simplified Diagram of Reactor 2 and the nuclear station at Three Mile Island (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ) .....	39
Σχήμα 10 Nuclear Reactor RBMK of Chernobyl (International Atomic Energy Agency. Int. Conference: One decade after Chernobyl, Summing up the consequences of the accident, 1996).....	40
Σχήμα 11 BWR at Fukushima Daiichi (Antonopoulos-Domis, 2011) .....	41
Σχήμα 12 INEX Climax for nuclear accidents(International Atomic Energy Agency, 2011)	45
Σχήμα 13 Total number of operating reactors by country (International Atomic Energy Agency - Power Reactor Information System, 2014).....	46
Σχήμα 14 Number of Power Reactors by Country and Status (International Atomic Energy Agency - Power Reactor Information System, 2014).....	46
Σχήμα 15 Acceptance of Risk – ALARP REGION (Tzatzakis, 2009) .....	52
Σχήμα 16 Probability Consequence Diagram (International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 2002) .....	54
Σχήμα 17 Overall Procedure of PSA (Joo Ha, access 2014).....	57
Σχήμα 18 Six major steps of Level 1 PSA (Jae-Joo Ha, access 2014).....	58
Σχήμα 19 Major Procedural Steps for a Level 2 PSA (Jae-Joo Ha, access 2014).....	59
Σχήμα 20 Major steps of Level 3 PSA (Joo Ha, access 2014) .....	60
Σχήμα 21 Event Tree example with calculation of probabilities (Kalinsky, 2005).....	64
Σχήμα 22 Event Tree for an hypothetical accident on a nuclear power station (Παρούσα εργασία).....	66
Σχήμα 23 Standard event tree for loss of main feed water in a PWR. (Minarick et al., 1982)	66
Σχήμα 24 Distribution of first and last casualties per accident type (Nomikos, 2012) .....	75
Σχήμα 25 Rates of raw events per 1000 ships by type of ship and accident (Nomikos, 2012)	75
Σχήμα 26 Rate of last events per 1000 ships by type of ship and accident (Nomikos, 2012).	76
Σχήμα 27 Distribution of accidents by 1000 ships per ship age (Psarraftis et al, 1998) .....	78
Σχήμα 28 Distribution of accidents per 100 ships, by type and size of vessel (Psarraftis et al, 1998).....	78
Σχήμα 29 Diagram of Collision (Zhang, 1999).....	82
Σχήμα 30 Type of collisions depending on the angle of a collision accident (IMO, 2002b) ..	82
Σχήμα 31 Crossing Collision (Pedersen, 2010) .....	83
Σχήμα 32 Typical intersecting waterways (Samuelides et al, 2001) .....	84
Σχήμα 33 Collision of <i>Alexia</i> and <i>Enif</i> - Gulf of Mexico, 1995 (Michel et al, 2013) .....	84

Σχήμα 34 The grounding of the M/V Sea Empress (ITOPF, access 2014).....	85
Σχήμα 35 The bottom of the M/V Sea Empress after the grounding (Samuelides et al, 2007).....	86
Σχήμα 36 Grounding in different types of bottom and under different conditions (Simonsen et al, 2000).....	88
Σχήμα 37 Accident Frequency Analysis (Otto et al, 2011).....	89
Σχήμα 38 Step 4 of FSA for ship collision (Sormunen, 2011).....	90
Σχήμα 39 The five steps of the FSA method (Goerland et al, 2011).....	91
Σχήμα 40 Outline of a PWR marine mechanically-driven propulsion plant – the primary and the secondary circuit (Carlton et al, 2011) .....	97
Σχήμα 41 The propulsion system of a nuclear – powered ship with a HTR using liquid salt as coolant (Hill et al, 2012) .....	99
Σχήμα 42 Minimum required propulsion SMCR power for average size bulk carriers with Finnish-Swedish ice-class notation for Controllable Pitch propellers (Fixed Pitch propellers add +11%). The red lines represent the power requirements of ice-class vessels. (Haas, 2014) .....	103
Σχήμα 43 Russian icebreaker LENIN. The first nuclear – powered surface ship (constructed at 1957).....	103
Σχήμα 44 Schematic of Russian Nuclear Icebreaker Arktika showing emplacement of nuclear reactor at its centre (Ragheb, 2014).....	104
Σχήμα 45 The NS SAVANNAH (IMO 5314793).....	105
Σχήμα 46 The NS Otto Han (Ragheb, 2014).....	105
Σχήμα 47 Russian Lash – Carrier Sevmorput (Constructed at 1988) .....	106
Σχήμα 48 The design of the first floating nuclear power station - longitudinal section of a FNPP (ROSATOM, 2007) .....	107
Σχήμα 49 The number of malfunctions during the period 1994-2002 on board atomic icebreakers which is alarming (www.marinebuzz.com, 2009).....	110
Σχήμα 50 Gen4Energy SMR Power Generation core Module (Hirdaris et al, 2014) .....	115
Σχήμα 51 Impact energy versus temperature curves for ASTM 203grade D steel (Carlton et al, 2011).....	119
Σχήμα 52 The nuclear fuel cycle (Carlton et al, 2011).....	120
Σχήμα 53 Concept General arrangement of a NS Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014) .....	122
Σχήμα 54 Plan view of SMR concept vessel Machinery Arrangement for a Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014).....	123
Σχήμα 55 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της σύγκρουσης.....	129
Σχήμα 56 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της σύγκρουσης.....	130
Σχήμα 57 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της σύγκρουσης.....	130
Σχήμα 58 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της σύγκρουσης.....	130
Σχήμα 59 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της προσάραξης.....	135
Σχήμα 60 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της προσάραξης.....	135
Σχήμα 61 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της προσάραξης.....	136

Σχήμα 62 Ranking the parameters of collision in relation with the median.....	144
Σχήμα 63 Ranking the parameters of collision in relation with the average .....	145
Σχήμα 64 Πίνακας βαθμονόμησης της συσχέτισεως των παραμέτρων μεταξύ τους από τους ειδικούς για την περίπτωση της σύγκρουσης.....	146
Σχήμα 65 Βαθμονόμηση από τους ειδικούς των κρίσιμων μεγεθών της σύγκρουσης.....	149
Σχήμα 66 Ranking the parameters of grounding in relation with the median .....	153
Σχήμα 67 Ranking the parameters of collision in relation with the average .....	153
Σχήμα 68 Πίνακας βαθμονόμησης της συσχέτισεως των παραμέτρων μεταξύ τους από τους ειδικούς για την περίπτωση της προσάραξης.....	154
Σχήμα 69 Βαθμονόμηση κρίσιμων μεγεθών προσάραξης πλοίου κατά τους ειδικούς κατά το διάμηκες του πλοίου.....	157
Σχήμα 70 Βαθμονόμηση των κρίσιμων μεγεθών κατά ενός ειδικούς κατά την εγκάρσια τομή του πλοίου .....	157



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Σύγκριση ορυκτών και πυρηνικών καυσίμων ως προς την ενεργειακή τους πυκνότητα (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/TKM όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ).....	25
Πίνακας 2 Nuclear Accidents (International Atomic Energy Agency, 2011).....	42
Πίνακας 3 Αριθμός και ποσοστό ναυτικών ατυχημάτων ανά κατηγορία βάσει της έρευνας σε ατυχήματα δεξαμενοπλοίων από 1980 έως το 2009 (Νομικός, 2012).....	72
Πίνακας 4 Κατηγορίες γεγονότων που συνοδεύουν ένα ναυτικό ατύχημα (Νομικός, 2012) .	74
Πίνακας 5 Τύπος του τελευταίου γεγονότος δεδομένου του τύπου του πρώτου γεγονότος (Νομικός, 2012).....	76
Πίνακας 6 Κατανομή ατυχημάτων από το 1980-2009 της κατηγορίας Collision (Νομικός, 2012).....	83
Πίνακας 7 Κατανομή ατυχημάτων από το 1980-2009 της κατηγορίας Grounding (Νομικός, 2012).....	86
Πίνακας 8 Κατανομή ατυχημάτων προσάραξης ανά είδος δεξαμενοπλοίου (Νομικός, 2012)	86
Πίνακας 9 Επιλογές πρόωσης – ηλεκτρική και μηχανική περιστροφή του άξονα και σχόλια για Suezmax tanker με πρόωση μέσω αντιδραστήρα 70 MW (Hirdaris et al, 2014).....	114
Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά και προτερήματα της επιλογής της ερευνητικής ομάδας Χειρδάρη για σχεδίαση πλοίου Suezmax tanker με πρόωση μέσω αντιδραστήρα 70 MW (Hirdaris et al, 2014).....	115
Πίνακας 11 Μελέτη αναγνώρισης κινδύνων για πλοίο τύπου Suezmax tanker με πρόωση μέσω αντιδραστήρα 70 MW(Hirdaris et al, 2014).....	117
Πίνακας 12 Συσχετισμός θέσης στο πλοίο του πυρηνικού αντιδραστήρα με διάφορους κινδύνους (Hirdaris et al, 2014).....	118
Πίνακας 13 Principal Particulars and Details of General arrangement of a NS Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014).....	121
Πίνακας 14 Details of the plan view of SMR concept vessel Machinery Arrangement for a Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014).....	123
Πίνακας 15 The classification of the barriers/event gates of the generic event tree for collision accidents (i.e. Hazards, identity of collision, impacts and consequences).....	129
Πίνακας 16 The classification of the barriers/event gates of the generic event tree for grounding accidents (i.e. Hazards, identity of grounding, impacts and consequences).....	134
Πίνακας 17 Αποτελέσματα βαθμονόμησης παραμέτρων σύγκρουσης από τους ειδικούς κατά αύξουσα διάμεσο και το αντίστοιχο μέσο όρο.....	143
Πίνακας 18 Κοινές βάσει της διαμέτρου και του μέσου όρου σημαντικοί παράμετροι της σύγκρουσης όπως προέκυψαν από τις απαντήσεις των ειδικών.....	144
Πίνακας 19 Κριτική συσχέτιση των κινδύνων με τα χαρακτηριστικά της σύγκρουσης βάσει των απαντήσεων των ειδικών.....	147
Πίνακας 20 Κριτική συσχέτιση των χαρακτηριστικών της σύγκρουσης με τα αποτελέσματα του ατυχήματος βάσει των απαντήσεων των ειδικών.....	147
Πίνακας 21 Κριτική συσχέτιση αποτελεσμάτων – συνεπειών ατυχήματος σύγκρουσης βάσει των απαντήσεων των ειδικών.....	148
Πίνακας 22 Αποτελέσματα βαθμονόμησης παραμέτρων προσάραξης από τους ειδικούς κατά αύξουσα διάμεσο και το αντίστοιχο μέσο όρο.....	151
Πίνακας 23 Κοινές βάσει της διαμέτρου και του μέσου όρου σημαντικοί παράμετροι της προσάραξης όπως προέκυψαν από τις απαντήσεις των ειδικών.....	152

Πίνακας 24 Κριτική συσχέτιση των κινδύνων και των χαρακτηριστικών της προσάραξης βάσει των απαντήσεων των ειδικών.....	156
Πίνακας 25 Κριτική συσχέτιση χαρακτηριστικών της προσάραξης και αποτελεσμάτων βάσει των απαντήσεων των ειδικών.....	156
Πίνακας 26 Κριτική συσχέτιση των αποτελεσμάτων και των συνεπειών βάσει των απαντήσεων των ειδικών στην περίπτωση της προσάραξης.....	156

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

## **ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ**

Copyright © Εμμανουήλ Ε. Μιχαλέτος , 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: «ΜΕΛΕΤΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ  
ΓΙΑ ΠΛΟΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΠΡΟΩΣΗ-Η  
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΑΞΗΣ»**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

→ ΔΡ. Ε. ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

→ ΔΡ. Δ. ΛΥΡΙΔΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

→ ΔΡ. Ν.Π. ΒΕΝΤΙΚΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση ή διανομή της παρούσας εργασίας (ή τμήματος αυτής) για εμπορικούς σκοπούς. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπούς μη κερδοσκοπικούς, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση της αναφοράς της πηγής προέλευσης και της διατήρησης του παρόντος μηνύματος. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό, πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

*Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο, εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.*

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑ

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ **Δρ Νικόλαο Π. Βεντίκο** για το ανύστακτο ενδιαφέρον του και την συνολική πλουσιοπάροχη βοήθεια προς το πρόσωπό μου για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και των σπουδών μου γενικότερα.

Ως επιβλέπων της διπλωματικής αυτής εργασίας, διέθεσε χρόνο για να βοηθήσει σε κάθε πρόβλημα που προέκυπτε και προσπάθησε να δώσει τις δέουσες συμβουλές για τη λύση του.

Θερμές ευχαριστίες, επίσης, στον Καθηγητή ΕΜΠ **Δρ Εμμανουήλ Σαμουηλίδη** για την παντοειδή βοήθεια που προσέφερε κατά τη διάρκεια της έρευνας και κυρίως για την ευκαιρία που μου δόθηκε να είμαι ένας κρίκος από την αλυσίδα μίας όμορφης ερευνητικής προσπάθειας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, καπετάν Βαγγέλη και Αιμιλία, τον αδερφό μου Γιάννη για τη συμπαράσταση που μου επέδειξαν και το κουράγιο που μου έδωσαν για την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου.

***Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στον πατέρα μου,  
Ευάγγελο Μιχαλέτο, συνταξιούχο πλοίαρχο του Εμπορικού Ναυτικού.***

Άλιμος, Ιούλιος 2014,

**Εμμανουήλ Ε. Μιχαλέτος**

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

## ΣΥΝΟΨΗ

Η έννοια της ναυτικής ασφάλειας αποτελεί αναμφίβολα μία κρίσιμη παράμετρο στην εμπορική ναυτιλία. Το ενδιαφέρον για τις ασφαλείς θαλάσσιες μεταφορές είναι παγκόσμιο και δεν περιορίζεται μόνο σε όσους ασχολούνται με την εμπορική ναυτιλία, αλλά έχει προεκτάσεις σε κάθε τομέα της ανθρώπινης ζωής. Ο συνδυασμός ναυτικής ασφάλειας και ασφάλειας στις πυρηνικές εγκαταστάσεις των πλοίων είναι ο σκοπός αυτής της διπλωματικής.

Στόχος της εργασίας, είναι η πρόβλεψη των συνεπειών από τυχόν ατυχήματα σε πυρηνοκίνητα πλοία κι εξέταση των ασφαλιστικών δικλείδων του εκάστοτε αρνητικού σεναρίου ατυχήματος που μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές συνέπειες.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στα ατυχήματα της σύγκρουσης και της προσάραξης πλοίων που χρησιμοποιούν πυρηνική πρόωση. Η πυρηνική πρόωση προς το παρόν δεν είναι διαδεδομένη ως προς τη χρήση της στη ναυτιλία και τα στοιχεία για να πραγματοποιηθεί μία έρευνα δεν είναι επαρκή. Η έρευνα έγινε μέσω ανάλυσης ατυχημάτων από τη βάση IHS SEA WEB για συμβατικά πλοία και σε συνδυασμό με την έρευνα από το σύνολο των πυρηνικών ατυχημάτων – βάσει των στοιχείων της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας – σε πυρηνικούς σταθμούς ισχύος, εξετάστηκαν πιθανά σενάρια ατυχημάτων σύγκρουσης και προσάραξης σε πλοία με πυρηνική πρόωση.

Η παραγωγή των σεναρίων έγινε μέσω της ανάλυσης με δέντρα γεγονότων και δόθηκε έμφαση στα σενάρια υψηλής επικινδυνότητας ως προς τις συνέπειες του εκάστοτε ατυχήματος, που προέκυπτε από αυτά. Κατόπιν, αξιολογήθηκαν τα σενάρια από ειδικούς διαφόρων ειδικοτήτων, που σχετίζονται είτε με τη ναυτιλία είτε με την ατομική ενέργεια και δημιουργήθηκε μία σειρά από συμπεράσματα πάνω στα ατυχήματα της σύγκρουσης και της προσάραξης ενός πυρηνοκίνητου πλοίου αλλά και στην γενικότερη ασφάλεια που μπορεί να έχει αυτός ο τύπος πλοίων.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας που αφορούν και διαπιστώσεις γενικότερου ενδιαφέροντος για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στις θαλάσσιες μεταφορές και γίνεται παρουσίαση κάποιων προτάσεων για πιο ενδελεχή μελέτη στο μέλλον.

### Λέξεις κλειδιά

Πυρηνική Ενέργεια, Πυρηνικός Αντιδραστήρας, Ναυτικά ατυχήματα, Σύγκρουση, Προσάραξη, Ναυτικό Πυρηνικό Ατύχημα.



## SYNOPSIS

The concept of maritime security is undoubtedly a critical parameter in commercial shipping. The concern for the safe in shipping industry is worldwide and it is not limited only to those who are involved in the shipping trade, but has ramifications in every area of human life. The combination of maritime safety and security in nuclear installations of ships is the purpose of this dissertation.

The aim of the work is the prediction of the consequences of accidents in nuclear – powered ships and the examination of the safeguards of individual negative scenarios that can lead to serious consequences.

This paper focuses on accidents of collision and grounding of ships using nuclear propulsion. Nuclear propulsion is not currently widespread in the use of maritime and data to perform an investigation is not sufficient. The research was conducted by analyzing accidents from the base SEA WEB for conventional vessels, and in conjunction with the investigation of all nuclear accidents happened – based on the data of the International Atomic Energy Association – of nuclear power stations, possible accident scenarios of collision and grounding for ships with nuclear power propulsion were examined.

The scenarios were produced via the Event Tree Analysis and emphasis was placed on high-risk scenarios with regards of the consequences of each accident that are resulting from. Then, the scenarios evaluated by experts of various disciplines associated with either shipping or atomic energy and created a series of conclusions on the accidents of collision and grounding of a nuclear-powered ship and on the overall safety that this type of ships can have.

Finally, the findings and the conclusions related to the general interest in the use of nuclear energy in shipping are presented along with some proposals for more detailed study in the future.

### **Keywords**

Nuclear Energy, Nuclear Reactor, Maritime accidents, Collision, Grounding, Maritime Nuclear Accident.

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο 20<sup>ος</sup> αιώνας χαρακτηρίστηκε από τους σύγχρονους επιστήμονες και ιστορικούς ως ο αιώνας της πυρηνικής ενέργειας, χωρίς αυτός ο χαρακτηρισμός να έχει πάντα θετική χροιά, αφού δεν είναι λίγοι αυτοί που θεωρούν την πυρηνική ενέργεια επικίνδυνη και καταστρεπτική. Δεν είναι τυχαία εξάλλου τα λόγια του ίδιου του μεγάλου Αϊνστάιν που είχε πει και τις δύο εξής φράσεις: «ο κόσμος δεν είναι ακόμη έτοιμος για την ατομική ενέργεια» και «η άρνηση ορισμένων ανθρώπων να θέσουν εκτός νόμου την ατομική βόμβα δε συγχωρείται εύκολα».

Παρόλα αυτά ο 21<sup>ος</sup> αιώνας διαφαίνεται ο αιώνας της άνθησης της πυρηνικής ενέργειας. Ήδη στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), το 15% περίπου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από την πυρηνική βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής και παγκόσμια γύρω στο 11%. Πέρα από της εφαρμογές στην στεριά, η πυρηνική ενέργεια βρίσκει συνεχώς έδαφος και σε θαλάσσιες εφαρμογές: σε πλωτά πυρηνικά εργοστάσια για εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και σε πολεμικές εφαρμογές, όπως είναι τα πολεμικά υποβρύχια. Επιπλέον, στη Ρωσία πολλά παγοθραυστικά πλοία έχουν συστήματα πρόωσης μέσω της πυρηνικής ενέργειας, ενώ η έρευνα για μαζική κατασκευή εμπορικών πλοίων με πυρηνική πρόωση είναι σε εξέλιξη.

Η παρούσα εργασία είναι μία μελέτη ναυτικής ασφάλειας, με έμφαση στα πυρηνοκίνητα πλοία. Η ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές αποτελεί το μεγαλύτερο στοιχείο για το σύνολο του κόσμου της ναυτιλίας, με ένα πλήθος επιστημόνων να εργάζονται προς την κατεύθυνση της ασφάλειας των θαλασσιών μεταφορών. Η παρούσα διπλωματική έχει σκοπό τη μελέτη ναυτικών ατυχημάτων σε πλοία που χρησιμοποιούν την πυρηνική ενέργεια. Το ενδιαφέρον πολλαπλασιάζεται στην περίπτωση που η πρόωση του πλοίου οφείλεται στην πυρηνική ενέργεια, όπου ένα ενδεχόμενο ατύχημα μπορεί να προκαλέσει τεράστια οικολογική καταστροφή. Οπότε, στο πλαίσιο της έρευνας για την μελέτη και κατασκευή πλοίων με χρήση πυρηνικής ενέργειας για την πρόωσή τους, εξετάσαμε δύο είδη ναυτικών ατυχημάτων που ενδεχομένως συμβούν, την σύγκρουση μεταξύ δύο πλοίων και την προσάραξη ενός πλοίου.

Στόχος της εργασίας, είναι η πρόβλεψη των συνεπειών από τυχόν ατυχήματα σε πυρηνοκίνητα πλοία κι εξέταση των ασφαλιστικών δικλίδων του εκάστοτε αρνητικού σεναρίου ατυχήματος που μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές συνέπειες.

Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η δομή της εργασίας και τα βήματα που ακολουθήθηκαν.

Το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει κάποια γενικά στοιχεία για την πυρηνική ενέργεια και τη χρήση της. Πιο συγκεκριμένα, πέρα από τον ορισμό της πυρηνικής ενέργειας δίνονται κάποιες περιβαλλοντικές παράμετροι της χρήσης της και γίνεται μία σύγκριση με άλλες πηγές ενέργειας όσον αφορά την απόδοσή της. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας ενός πυρηνικού

αντιδραστήρα και οι διαφορές μίας πυρηνικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σε σχέση με τις συμβατικές ομάδες. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται αναλυτικά η δομή κι ο σχεδιασμός ενός πυρηνικού αντιδραστήρα, τα είδη και γίνεται μία μικρή αναφορά στην ασφάλεια ενός αντιδραστήρα. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται επίσης η τεχνολογική εξέλιξη των πυρηνικών αντιδραστήρων στο πέρασμα των ετών καθώς και η έρευνα που γίνεται στον τομέα αυτό για το μέλλον. Ακολούθως, γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση όλων των πυρηνικών ατυχημάτων που έχουν συμβεί σε μη πολεμικές εγκαταστάσεις, ενώ παρουσιάζονται πιο αναλυτικά τα τρία σημαντικά. Τέλος, δίνεται η κλίμακα διαβάθμισης των συνεπειών των πυρηνικών ατυχημάτων βάσει της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας και γίνεται μία αναφορά στη χρήση της σήμερα και στις κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στην εκτίμηση ασφάλειας μίας πυρηνικής κατασκευής. Αρχικά, δίνονται οι κατάλληλοι ορισμοί από τη θεωρία του ρίσκου και του ανθρώπινου παράγοντα, όπως είναι η έννοια του ρίσκου, η έννοια του ανθρώπινου παράγοντα, η έννοια της διαχείρισης ρίσκου και άλλα. Στη συνέχεια, γίνεται μία σύντομη αναφορά στην αποδοχή ρίσκου που αφορά μία πυρηνική εγκατάσταση και κατόπιν στο κύριο μέρος του κεφαλαίου αναπτύσσεται η μέθοδος PSA για την εκτίμηση ασφάλειας μίας πυρηνικής κατασκευής. Δίνονται ιστορικά στοιχεία, ο ορισμός, ο σκοπός, τα βήματα – επίπεδα μελέτης καθώς και τα στοιχεία αβεβαιότητας της μεθόδου. Στο τέλος του κεφαλαίου αναπτύσσονται τα βασικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου ανάλυσης μέσω δέντρων γεγονότων, η οποία αλληλοσυμπληρώνει τη μέθοδο PSA κι αποτελεί έναν μεθοδικό τρόπο για παραγωγή σεναρίων ενός ατυχήματος. Στο δεύτερο κεφάλαιο, υπάρχουν και παραδείγματα ανάπτυξης σεναρίων πυρηνικών ατυχημάτων μέσω δέντρων γεγονότων, ένα εκ των οποίων είναι καρπός της προσπάθειας που έγινε για παραγωγή σεναρίων μέσα από δέντρα στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής.

Το τρίτο κεφάλαιο παρέχει ορισμένα στοιχεία για τη ναυτική ασφάλεια. Εξετάζεται η έννοια του ναυτικού ατυχήματος, τα είδη και τα βασικά χαρακτηριστικά, οι παράγοντες που τα επηρεάζουν και οι συνέπειες βάσει των οδηγιών του IMO. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο ατύχημα της σύγκρουσης και στο ατύχημα της προσάραξης όπου γίνεται ιδιαίτερη περιγραφή της «γεωμετρίας» των συγκεκριμένων ατυχημάτων. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου FSA, που αποτελεί τη βάση των σύγχρονων κωδικών και κανονισμών για την ασφάλεια στη ναυτιλία. Η FSA (Formal Safety Assessment) αποτελεί μία εξελίξιμη μέθοδο για την ανάλυση ασφάλειας στη ναυτιλία, μία εξέλιξη της PSA, αλλά για εφαρμογές στις θαλάσσιες μεταφορές που βοηθά τους μελετητές να εξαγάγουν ασφαλή συμπεράσματα για την πορεία ενός ατυχήματος αλλά και να σχεδιάσουν καλύτερα ένα δίκτυο μεταφορών ή να δώσουν έμφαση στον ανθρώπινο παράγοντα και την εκπαίδευσή του και γενικότερα να υπάρξει πρόληψη για την αποφυγή ατυχημάτων στη θάλασσα.

Στο επόμενο κεφάλαιο, το τέταρτο, γίνεται μία σύζευξη: πυρηνική ενέργεια από τη μία και θαλάσσιες μεταφορές από την άλλη. Εδώ, αξίζει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία που αφορούν τα πυρηνοκίνητα πλοία είναι ελάχιστα και η έρευνα καθίσταται ορισμένες φορές δυσχερής. Πέραν του γεγονότος, ότι οι περισσότερες εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον είναι πολεμικές, οι ελάχιστες εφαρμογές για μη πολεμικούς σκοπούς έγιναν είτε στη Ρωσία κυρίως κατά τη διάρκεια της Σοβιετικής Ένωσης είτε σε άλλες χώρες αλλά με λίγα στοιχεία ευρύτερα γνωστά προς το κοινό, καθώς οι εφαρμογές ήταν πειραματικού χαρακτήρα. Επιπλέον, η καχυποψία της κοινής γνώμης απέναντι στην ευρεία χρήση της πυρηνικής ενέργειας, ιδιαίτερα μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, δημιούργησε ένα «φράγμα» μετάδοσης των σχετικών πληροφοριών για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται το σύστημα πρόωσης ενός πλοίου που διαθέτει πυρηνικό αντιδραστήρα και γίνεται μία αναφορά στα είδη των ναυτικών πυρηνικών αντιδραστήρων και στην τεχνολογική τους εξέλιξη. Επίσης, γίνεται μία σύντομη αναφορά στα πυρηνικά απόβλητα από τον αντιδραστήρα ενός πλοίου. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι λόγοι αποτυχίας χρήσης της πυρηνικής ενέργειας σε ευρεία κλίμακα στην εμπορική ναυτιλία και παρουσιάζονται όλες οι εφαρμογές μέχρι σήμερα και κάποια σχέδια πλοίων και πλωτών πυρηνικών σταθμών που πρόκειται να πραγματοποιηθούν στο άμεσο μέλλον. Στο κεφάλαιο, επίσης, παρουσιάζονται κάποια στοιχεία ασφάλειας των πυρηνοκίνητων πλοίων και γίνεται μία εκτενής αναφορά στα μέχρι τώρα ατυχήματα που έχουν συμβεί. Τέλος, αν και σε πρώιμο κι ερευνητικό στάδιο, παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία και βασικά χαρακτηριστικά σχεδίασης ενός πυρηνοκίνητου πλοίου. Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται διάφορες επιλογές, οι οποίες αιτιολογούνται ανάλογα και εξετάζονται πολλοί παράγοντες, όπως πχ η θέση του αντιδραστήρα στο πλοίο, η επιλογή χάλυβα λόγω του επηρεασμού των ιδιοτήτων του υλικού από τη ραδιενέργεια και πολλές ακόμη παράμετροι. Διαπιστώνεται μέσα από το τελευταίο τμήμα του κεφαλαίου ότι υπάρχουν επιλογές σχεδίασης ενός πυρηνοκίνητου πλοίου, αλλά ο σωστός σχεδιασμός περιλαμβάνει και τη σωστή αναγνώριση των κινδύνων καθώς το ζήτημα της ασφάλειας ενός πυρηνοκίνητου πλοίου είναι κρίσιμο και η πιθανότητα ενός ατυχήματος πρέπει να είναι όσο ελάχιστη γίνεται πρακτικά.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται κατόπιν εξέταση μιας σειράς ατυχημάτων σύγκρουσης και προσάραξης πλοίων, παραγωγή σεναρίων σε πλοία που χρησιμοποιούν την πυρηνική ενέργεια για την πρόωσή τους. Η εξέταση των ατυχημάτων περιελάμβανε την εξέταση μέσα από ένα πλήθος ναυτικών ατυχημάτων σε συμβατικά πλοία (σς: όπου ως συμβατικά πλοία στο πλαίσιο της έρευνας θεωρούμε τα πλοία χωρίς την χρήση πυρηνικής ενέργειας για την πρόωσή τους) των παραγόντων που οδηγούν στο ατύχημα, καθώς επίσης και των συνεπειών που προκύπτουν από το συνδυασμό των διαφόρων παραγόντων. Οι συνέπειες, όπως είναι φυσικό, διαβαθμίστηκαν με κριτήρια αστοχίας της κατασκευής. Η παραγωγή των σεναρίων έγινε μέσω της ανάλυσης με δέντρα γεγονότων (event trees). Από τα σενάρια που προέκυψαν, επιλέχθηκαν τα σενάρια υψηλής επικινδυνότητας, βάσει των συνεπειών που

προέκυπταν από το κάθε σενάριο, με σκοπό την δημιουργία ερωτηματολογίων και την ανάλυση τους από μία ομάδα ειδικών.

Στο έκτο κεφάλαιο, και γίνεται μία ανάλυση των απαντήσεων των ειδικών και διαφαίνονται τα πρώτα συμπεράσματα της έρευνας. Τα ερωτηματολόγια παρατίθενται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρατίθενται αναλυτικά τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής καθώς επίσης και κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα πάνω στο αντικείμενο της πυρηνικής ενέργειας και της ασφάλειας στις θαλάσσιες μεταφορές.

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# 1

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 1.1 Εισαγωγή

Δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε πλοία με σύστημα πρόωσης με χρήση της πυρηνικής ενέργειας, δέον να εξεταστεί τι είναι η πυρηνική ενέργεια, πώς χρησιμοποιείται και σε τι διαφέρουν οι συμβατικές μονάδες από τις μονάδες παραγωγής με χρήση της πυρηνικής ενέργειας, ποια είναι η δομή, τα είδη και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού και ασφάλειας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα καθώς και την ιστορική τεχνολογική εξέλιξη των αντιδραστήρων, και να παρουσιαστούν ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα ατυχημάτων σε πυρηνικές εγκαταστάσεις καθώς και η διαβάθμιση με βάση τις συνέπειες των πυρηνικών ατυχημάτων. Στο τέλος, δίνονται κάποια στοιχεία για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας σήμερα και τις κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το μέλλον.

### 1.2 Η Πυρηνική ενέργεια και η χρήση της - Περιβαλλοντικές παράμετροι

**Πυρηνική ενέργεια ή ατομική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες.** Είναι δηλαδή η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλεισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται κατά τη σχάση ή σύντηξη των πυρήνων και εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

Όπως γράφτηκε και στην εισαγωγή, το 11% περίπου της ηλεκτρικής ενέργειας παγκόσμια παράγεται από την πυρηνική ενέργεια καθώς και το 13,6% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη. Συνολικά, 31 χώρες διαθέτουν 435 σε πλήρη λειτουργία πυρηνικούς αντιδραστήρες, με τη Γαλλία να είναι πρωταθλήτρια σε αυτό τον τομέα που διαθέτει 58 πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Η πυρηνική ενέργεια θεωρείται μία καθαρή μορφή ενέργειάς, αφού δεν συμβάλλει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου μέσω της παραγωγής διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Στο πλαίσιο μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου και της περιβαλλοντικής ρύπανσης, η επιστημονική κοινότητα προτάσσει τις εξής τρεις διεξόδους για αυτό το σκοπό:

- ✓ Η εξοικονόμηση ενέργειας.



- ✓ Η χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική, βιομάζα, γεωθερμία κτλ).
- ✓ Η χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας.
- ✓ Συνδυασμός των παραπάνω

Το κύριο χαρακτηριστικό των εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι η μικρή πυκνότητα ενέργειας. Η μέγιστη ηλιακή ισχύς που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης είναι της τάξης των 10 kW/m<sup>2</sup>. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό απόδοσης, την ασυνέχεια των ανανεώσιμων πηγών και λοιπούς παράγοντες, η διαθέσιμη ενέργεια ανά m<sup>2</sup> επιφάνειας γης είναι:

- Φωτοβολταϊκά – θερμοηλιακά: 3 -15 W/m<sup>2</sup>
- Βιομάζα: 0.5 – 1.5 W/m<sup>2</sup>
- Άνεμος: 3 W/m<sup>2</sup>

Συγκριτικά τα ορυκτά και τα πυρηνικά καύσιμα έχουν τεράστια ενεργειακή πυκνότητα.

**Πίνακας 1 Σύγκριση ορυκτών και πυρηνικών καυσίμων ως προς την ενεργειακή τους πυκνότητα (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ)**

\*(σσ: Δεν είναι εφικτή η σχάση όλου του U-235 του φυσικού ουρανίου. Αναφέρεται εδώ για να γίνει αντιληπτή η κολοσσιαία τάξη μεγέθους της διαθέσιμης ενέργειας).

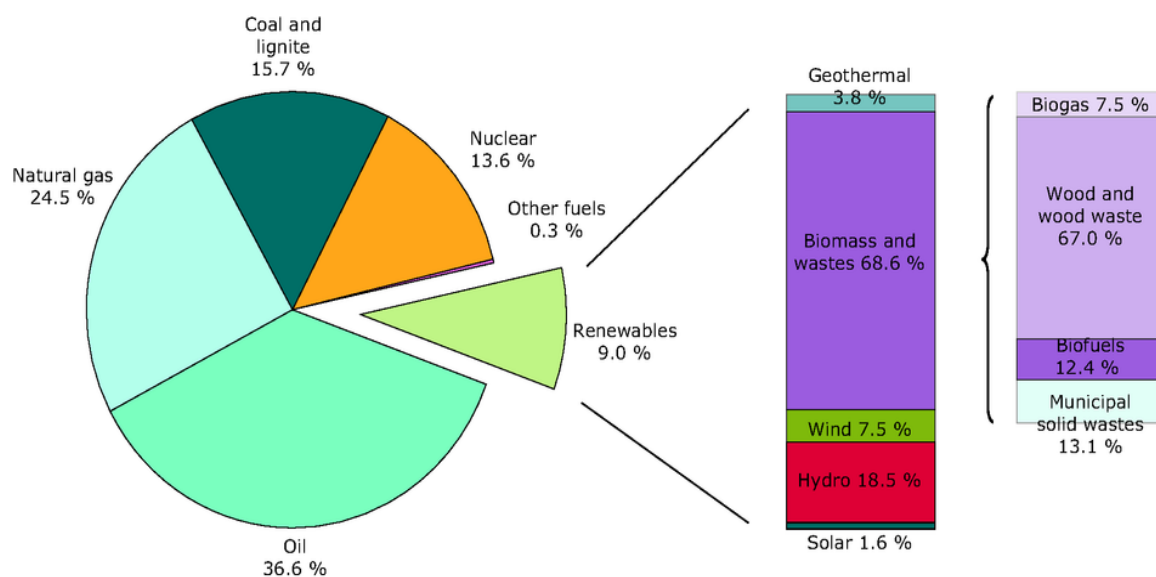
<b><u>Καύσιμο</u></b>	<b><u>Ενεργειακή πυκνότητα</u></b> MJ/kg	<b><u>Λόγος προς άνθρακα</u></b>
άνθρακας	28	1
Πετρέλαιο	42	1.5
φυσικό ουράνιο (σχάση μόνο U-235)	574 10 <sup>3</sup>	20 10 <sup>3</sup>
φυσικό ουράνιο (σχάση όλου του U-235 σε αναπαραγωγικό αντιδραστήρα) *	82 10 <sup>6</sup>	3 10 <sup>6</sup>

Είναι προφανές ότι, μολονότι η ανάπτυξη των εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι αναγκαία, αυτές οι πηγές ενέργειας, λόγω της ασυνέχειάς των και της μικρής πυκνότητας ισχύος που παρέχουν, δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες βάσης της σύγχρονης κοινωνίας και οικονομίας. Η πυρηνική ενέργεια από σχάση μπορεί να καλύψει τις αναπτυξιακές ανάγκες της ανθρωπότητας επί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, πράγμα που δεν είναι δυνατό με καμία άλλη διαθέσιμη πηγή ενέργειας. Η δε πυρηνική ενέργεια από σύντηξη, εάν και όταν επιτευχθεί αυτοσυντηρούμενη,

οικονομικά αποδοτική, αντίδραση σύντηξης, μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας εις το διηνεκές.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ανακοίνωσε στις 10 Ιανουαρίου 2007 το λεγόμενο «πακέτο ενέργεια και κλιματική αλλαγή» που αποτελεί στην ουσία μία νέα μεσοπρόθεσμη ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική, όπου περιέχεται πληθώρα υποχρεώσεων των χωρών-μελών σε θέματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), Εξοικονόμησης Ενέργειας, Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) και εν τέλει συσχέτισης της διείσδυσης των τεχνολογιών αυτών στα ενεργειακά συστήματα, με τη συγκράτηση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο θερμοκηπίου. Στο «πακέτο ενέργεια και κλιματική αλλαγή» περιέχονται τρεις ευρωπαϊκοί ποσοτικοί στόχοι μέχρι το 2020 που αφορούν σε 20% συγκράτηση των αερίων (κυρίως CO<sub>2</sub>), σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, σε 20% διείσδυση των ΑΠΕ και 20% εξοικονόμηση ενέργειας. Πριν λίγα χρόνια προσδιορίστηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή οι ποσοτικοί στόχοι που πρέπει να επιτύχουν τα κράτη-μέλη στα πλαίσια εφαρμογών για τις ΑΠΕ (Μάρτιος 2008) και τις εκτός ΕΕ / ETS εκπομπές ρύπων.

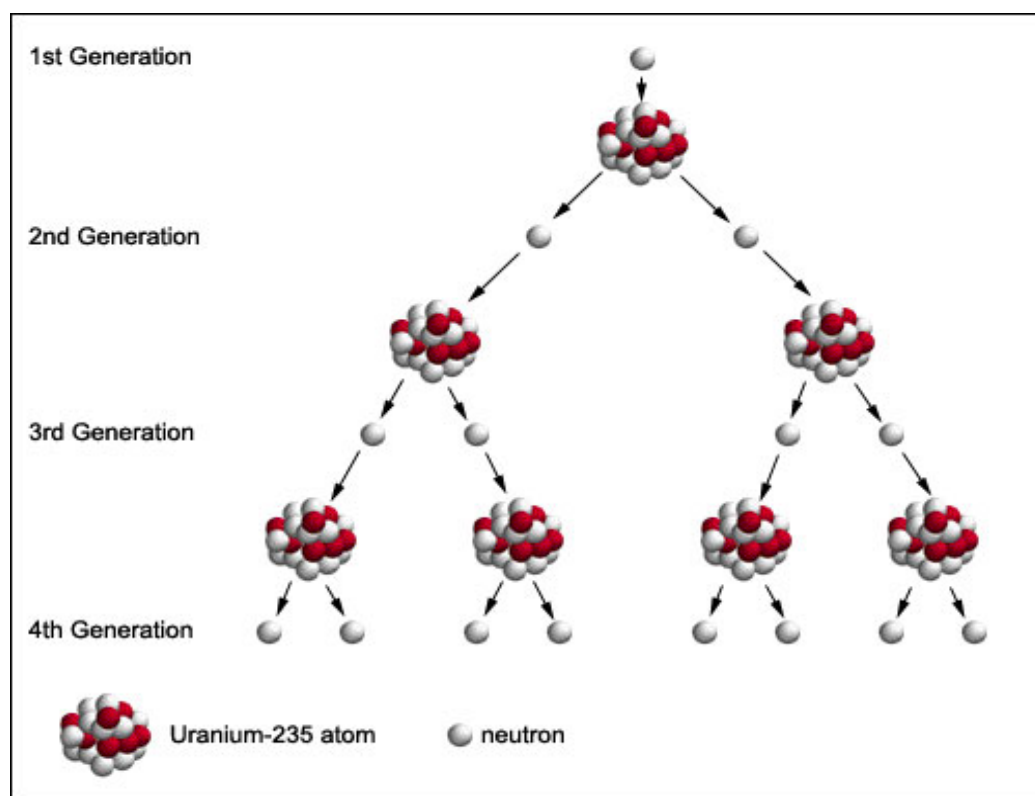
Η πυρηνική βιομηχανία ηλεκτροπαραγωγής συμμετέχει σχεδόν κατά το ένα έκτο στην τροφοδοσία με ηλεκτρική ενέργεια στην ΕΕ (Σχήμα 1) με επακόλουθο η πυρηνική ενέργεια να αποτελεί αντικείμενο ευρύτερων συζητήσεων και ζυμώσεων για την ασφάλεια τροφοδοσίας της ΕΕ, την ανταγωνιστικότητα, την ενιαία αγορά ενέργειας, τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και την επίτευξη των στόχων σχετικά με την κλιματική αλλαγή. Η απόφαση αν θα χρησιμοποιήσει ή όχι πυρηνική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή είναι στη διακριτική ευχέρεια του κράτους-μέλους. Ο ρόλος της ΕΕ είναι η περαιτέρω βελτίωση, σύμφωνα με το κοινοτικό δίκαιο, του πλαισίου για την πυρηνική ενέργεια στα κράτη-μέλη που επιλέγουν την ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση πυρηνικής τεχνολογίας, ώστε να πληροί τα υψηλότερα πρότυπα ασφαλείας, προστασίας και μη διάδοσης πυρηνικών όπλων, όπως απαιτείται από τη Συμφωνία EURATOM.



Σχήμα 1 Share in Electricity Generation in European Union (Eurostat, 2010)

### 1.3 Γενικές αρχές λειτουργίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα σχάσης. Διαφορές με συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής

Όταν ένα νετρόνιο συγκρουσθεί με πυρήνα U-235, το πιθανότερο αποτέλεσμα είναι η σχάση: ο πυρήνας τεμαχίζεται σε δύο κομμάτια, ελευθερώνοντας ενέργεια (κατά μέσο όρο περίπου 200 eV) και 2 έως 3 νετρόνια. Το μέγιστο ποσοστό αυτής της ενέργειας εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με τη σχάση ως θερμότητα, πρακτικά στη θέση που έγινε η σχάση. Έστω τώρα ότι το επεισόδιο αυτό της σχάσης πραγματοποιήθηκε μέσα σε υλικό που περιέχει αξιόλογη ποσότητα U-235. Τότε τα νετρόνια της σχάσης προκαλούν και αυτά σχάσεις πυρήνων U-235, που παράγουν και άλλα νετρόνια, που προκαλούν νέες σχάσεις κ.ο.κ.(Σχήμα 2). Μπορούμε να πούμε ότι η σχάση, εκτός από την ενέργεια που απελευθερώνει, παράγει το μέσο της αναπαραγωγής της, τα νετρόνια. Προκύπτει έτσι αλυσωτή αντίδραση σχάσεων που μπορεί να είναι αυτοσυντήρητη. Πολλά από τα νετρόνια απορροφώνται σε υλικά που δεν μπορούν να πάθουν σχάση, που δεν μπορούν να παράγουν άλλα νετρόνια. Οι απορροφήσεις αυτές αποτελούν απώλεια όσο αφορά στην συντήρηση της αλυσωτής αντίδρασης σχάσης.



Σχήμα 2 Nuclear chain reactions (<http://www.atomicarchive.com/>, access June 2014)

Διάταξη σχεδιασμένη έτσι ώστε να πραγματοποιείται ελεγχόμενη αυτοσυντήρητη αντίδραση σχάσης, ονομάζεται **Πυρηνικός Αντιδραστήρας Σχάσης**. Πυρηνικό καύσιμο, ή απλά καύσιμο ονομάζεται το υλικό που περιέχει τους σχάσιμους πυρήνες. Στους περισσότερους σύγχρονους αντιδραστήρες το καύσιμο τοποθετείται σε μεταλλικό κυλινδρικό περίβλημα με σκοπό τον περιορισμό των ραδιενεργών

προϊόντων της σχάσης εντός του περιβλήματος και την ελαχιστοποίηση της διαρροής ραδιενεργών υλικών στο κύκλωμα του αντιδραστήρα.

Το περίβλημα μαζί με το καύσιμο που περιέχει ονομάζεται ράβδος καυσίμου. Οι σχάσεις πραγματοποιούνται στο σχάσιμο υλικό μέσα στη ράβδο. Το μέγιστο ποσοστό της ενέργειας των σχάσεων εμφανίζεται ως θερμότητα, πρακτικά στις θέσεις όπου γίνονται οι σχάσεις, δηλαδή μέσα στις ράβδους καυσίμου, πρακτικά ταυτόχρονα με τη σχάση. Γύρω από τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου ρέει ψυκτικό (στη μεγάλη πλειοψηφία των σύγχρονων αντιδραστήρων αυτό είναι  $H_2O$ , σε αντιδραστήρες γραφίτη-φυσικού ουρανίου  $CO_2$ , στους αναπαραγωγικούς αντιδραστήρες ταχέων νετρονίων υγρό Na) που απάγει την θερμότητα που παράγεται από τις σχάσεις.

Η πίεση λειτουργίας του ψυκτικού νερού ρυθμίζεται έτσι, ώστε μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα, με τη μεταφορά της θερμότητας των σχάσεων στο ψυκτικό νερό αυτό να βράζει και έτσι να παράγεται ατμός. Με αυτόν τον τρόπο στη έξοδο της καρδιάς έχουμε ατμό υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Ο ατμός οδηγείται στον αμοστρόβιλο και το υπόλοιπο κύκλωμα είναι πανομοιότυπο με το αντίστοιχο της συμβατικής εγκατάστασης. Από την έξοδο του στροβίλου ο ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή, όπου, ψυχόμενος, γίνεται υγρό νερό, το οποίο οδηγείται στην είσοδο της καρδιάς για τη συνέχιση της ψύξης της καρδιάς και για την συνέχιση της παραγωγής ατμού.

Κατά συνέπεια, όσον αφορά στο κύκλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ πυρηνικής και συμβατικής μονάδος ηλεκτροπαραγωγής. Εδώ τελειώνουν οι ομοιότητες τους. Οι διαφορές των δύο αυτών μηχανών μετατροπής ενέργειας έχουν αφετηρία στους διαφορετικούς μηχανισμούς με τους οποίους παράγεται η θερμότητα.

Στη συμβατική μονάδα η θερμική ενέργεια παράγεται από εξώθερμες χημικές αντιδράσεις άνθρακα και υδρογόνου με οξυγόνο (καύση). Ο περιοριστικός παράγοντας είναι ο ρυθμός διάχυσης οξυγόνου προς την επιφάνεια του καυσίμου και ο ρυθμός απομάκρυνσης των προϊόντων της καύσης ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ) από την επιφάνεια του καυσίμου. Υπάρχει λοιπόν ανώτατο όριο της ισχύος που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα όγκου του λέβητα, άρα υπάρχει ανώτατο όριο της συνολικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί σε λέβητα ορισμένου όγκου. Αν προσθέσουμε περισσότερο όγκο καυσίμου και οξυγόνου, το περίσσειμα πάνω από το ανώτατο όριο θα φύγει από το λέβητα χωρίς να καεί.

Στον πυρηνικό αντιδραστήρα δεν υπάρχει, κατ' αρχήν, πρακτικά, ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί στο πυρηνικό καύσιμο. Τούτο δε διότι το ανώτατο όριο της πυκνότητας ισχύος, που μπορεί να παραχθεί, είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από τη μέγιστη ικανότητα απαγωγής του από το καύσιμο, με τη σύγχρονη τεχνολογία. Το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο παραγωγής θερμικής ισχύος στον αντιδραστήρα, καθορίζεται:

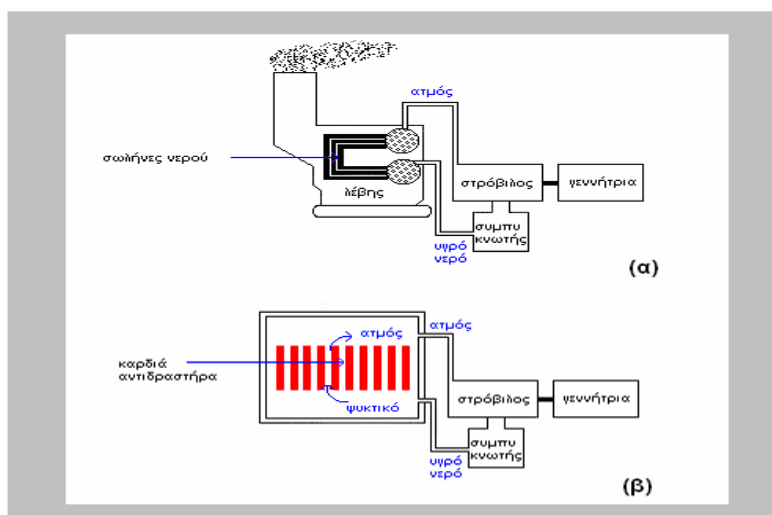
*(α) από την ανώτατη επιτρεπόμενη θερμοκρασία του υλικού του περιβλήματος των ράβδων καυσίμου και*

*(β) από το όριο θερμικής ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από το καύσιμο στο ψυκτικό.*

Ωστε, σε αντίθεση με τους λέβητες, στον πυρηνικό αντιδραστήρα η πυκνότητα ισχύος πρέπει να συγκρατηθεί κάτω από ορισμένα επιτρεπόμενα όρια. Η επόμενη σημαντική διαφορά αφορά στην ασφάλεια των δύο συστημάτων και συνδέεται άμεσα με το μηχανισμό μεταφοράς της θερμότητας. Στο λέβητα, η μέγιστη θερμοκρασία είναι στη φλόγα των αερίων και έχει κάποιο ανώτατο όριο, που υπολογίζεται εύκολα από τη θερμότητα της καύσης και από την ειδική θερμότητα των προϊόντων της καύσης. Στην πράξη, η θερμοκρασία της φλόγας είναι πάντα μικρότερη από αυτό το μέγιστο. Αν η ροή του ρευστού διακοπεί (π.χ. με κάποιο έμφραγμα) σε μια από τις σωλήνες, ο σωλήνας θα υπερθερμανθεί και το χειρότερο που μπορεί να συμβεί είναι θραύση του σωλήνα και σταμάτημα της μονάδος, με σοβαρές βέβαια οικονομικές συνέπειες.

Στον αντιδραστήρα, η θερμότητα παράγεται μέσα στις **ράβδους καυσίμου** και πρακτικά δεν υπάρχει ανώτατο όριο της θερμικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί. Έτσι, κάποια αθέλητη μεγάλη αύξηση της ισχύος του αντιδραστήρα, ή σημαντική μείωση της ροής του ψυκτικού, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το σημείο τήξης του περιβλήματος της ράβδου και εισαγωγή στο ψυκτικό των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Ακόμα και μετά την παύση της λειτουργίας του αντιδραστήρα εξακολουθεί να παράγεται θερμότητα, από τη διάσπαση των ραδιενεργών προϊόντων της σχάσης. Οι συνέπειες ενός τέτοιου ατυχήματος μπορεί να είναι πολύ σοβαρές. Οι απαιτήσεις αξιοπιστίας του συστήματος ψύξης και των υλικών, είναι, λοιπόν, ιδιαίτερα αυστηρές. Ακόμα και αν δεν συμβεί ρύπανση του περιβάλλοντος, οι οικονομικές συνέπειες ενός ατυχήματος μπορεί να είναι μεγάλες.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει η τελευταία ουσιαστική διαφορά των δύο συστημάτων. Στην πυρηνική μονάδα η ανάγκη για εξαιρετικά προηγμένη τεχνολογία ψύξης, ασφάλειας, συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης, θωράκισης από τις ακτινοβολίες κ.λπ., οδηγούν σε **μεγάλο κόστος κατασκευής της μονάδος. Το κόστος καυσίμου πάει αντίστροφα.** Στη συμβατική μονάδα είναι μεγάλο, στην πυρηνική είναι μικρό. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι 1kg άνθρακα ή πετρελαίου δίνει περίπου 10 kWh θερμότητα, 1kg U-235 περίπου  $20 \cdot 10^6$  kWh θερμότητα και 1kg φυσικού ουρανίου περίπου  $14 \cdot 10^4$  kWh θερμότητα. Έτσι συνοψίζονται οι βασικές διαφορές, συμβατικής - πυρηνικής μονάδος, που φαίνονται διαγραμματικά και στο Σχήμα 3 παρακάτω:



Σχήμα 3 Simplified example of conventional and nuclear power station (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ)

## 1.4 Σχεδιασμός, είδη και ασφάλεια πυρηνικών αντιδραστήρων

Η παραγωγή ενέργειας στον αντιδραστήρα βρίσκεται σε απόλυτη συνάρτηση με των ρυθμό των σχάσεων. Σε πρώτη προσέγγιση μπορούμε να θεωρήσουμε τον ρυθμό των σχάσεων (αριθμό σχάσεων ανά δευτερόλεπτο) ανάλογο προς τον συνολικό αριθμό των νετρονίων που βρίσκονται στην καρδιά του αντιδραστήρα κάθε στιγμή. Άρα και ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας (παραγόμενη ενέργεια ανά δευτερόλεπτο) είναι κάθε στιγμή ανάλογος προς τον νετρονικό πληθυσμό. Κάποια από τα νετρόνια απορροφούνται σε σχάσιμους πυρήνες όπως το U-235 και προκαλούν σχάσεις, από τις οποίες παράγονται εκτός από ενέργεια και νετρόνια (2 έως 3 από κάθε σχάση), τα οποία είναι διαθέσιμα για να προκαλέσουν νέες σχάσεις και να συντηρήσουν την αλυσωτή αντίδραση. Άλλα νετρόνια απορροφούνται σε μη σχάσιμους πυρήνες. Όσα νετρόνια απορροφούνται σε μη σχάσιμους, αλλά και σε σχάσιμους πυρήνες, δεν είναι πλέον διαθέσιμα για να προκαλέσουν σχάση και κατά συνέπεια αποτελούν απώλειες, ως προς τη διατήρηση της αλυσωτής αντίδρασης σχάσης. Απώλειες αποτελούν επίσης όσα νετρόνια διαφεύγουν έξω από τη συσκευή. Κατά συνέπεια ο ρυθμός απωλειών νετρονίων (αριθμός απωλειών νετρονίων ανά δευτερόλεπτο) είναι το άθροισμα του ρυθμού απορροφήσεων νετρονίων σε όλα τα υλικά και του ρυθμού διαφυγών νετρονίων από την καρδιά του αντιδραστήρα. Παράλληλα έχουμε και κάποιο ρυθμό παραγωγής νετρονίων από τις σχάσεις. Δίνονται οι εξής ορισμοί:

- **Κρίσιμος αντιδραστήρας**: όταν ο ρυθμός παραγωγής είναι ίσος με τον ρυθμό απωλειών νετρονίων, οπότε ο νετρονικός πληθυσμός, επομένως και ο ρυθμός σχάσεων, άρα και ο ρυθμός παραγωγής θερμικής ενέργειας, παραμένουν σταθεροί στον χρόνο.
- **Υπερκρίσιμος αντιδραστήρας**: όταν ο ρυθμός παραγωγής είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό απωλειών νετρονίων, οπότε ο νετρονικός πληθυσμός, επομένως και ο ρυθμός σχάσεων, άρα και ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας, αυξάνονται με τον χρόνο.

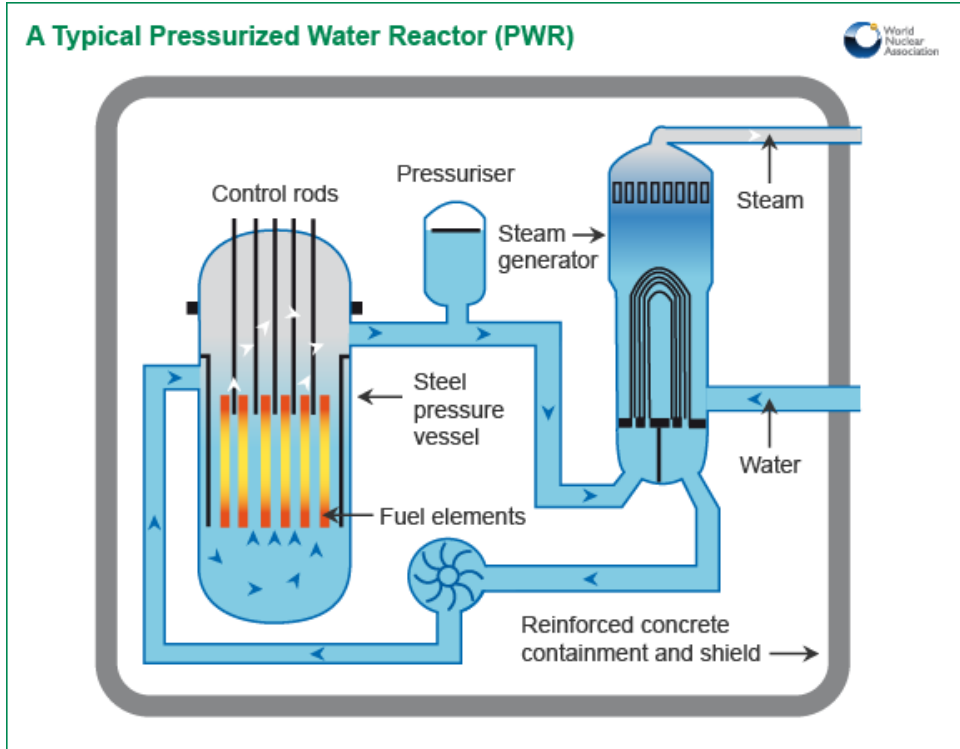
- **Υποκρίσιμος αντιδραστήρας:** όταν ο ρυθμός παραγωγής είναι μικρότερος από τον ρυθμό απωλειών νετρονίων, οπότε ο νετρονικός πληθυσμός, επομένως και ο ρυθμός σχάσεων, άρα και ο ρυθμός παραγωγής ενέργειας, μειώνονται με τον χρόνο.
- **Εμπλουτισμός καυσίμων:** η περιεκτικότητα σε U-235 ως ποσοστό της μάζας του συνολικού ουρανίου (δηλαδή του αθροίσματος των μαζών του U-235 και του U-238), π.χ. το φυσικό ουράνιο έχει εμπλουτισμό 0,7%, δηλαδή η μάζα του U-235 είναι 0,7% της συνολικής μάζας του φυσικού ουρανίου, και το υπόλοιπο είναι U-23.

Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, ονομάζονται και αντιδραστήρες ισχύος ή πυρηνικοί σταθμοί ισχύος. Χωρίζονται σε αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR) και σε αντιδραστήρες βαρέως ύδατος (HWR). Οι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος χωρίζονται σε αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος και αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος με τη σειρά τους ενώ οι βαρέως ύδατος σε πεπιεσμένου βαρέως ύδατος και σε ζέοντος βαρέως ύδατος. Το 72% των εγκατεστημένων πυρηνικών σταθμών ισχύος είναι οι αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος PWR και ζέοντος ύδατος BWR.

- **Αντιδραστήρας πεπιεσμένου ύδατος (PWR) –Αντιδραστήρας ζέοντος ύδατος (BWR)**

Το ψυκτικό της καρδιάς του αντιδραστήρα PWR είναι νερό. Το κύκλωμα του ψυκτικού της καρδιάς ονομάζεται πρωτεύον κύκλωμα. Το ψυκτικό βγαίνει από την καρδιά σε υψηλή θερμοκρασία(325°C). Η πίεση λειτουργίας του πρωτεύοντος είναι τόσο μεγάλη (150 atm) ώστε να μην επιτρέπεται βρασμός του ψυκτικού στην καρδιά. Από την έξοδο της καρδιάς το ψυκτικό οδηγείται σε εναλλάκτη θερμότητας. Εκεί μεταφέρει τη θερμότητα σε κύκλωμα νερού, στο «δευτερεύον κύκλωμα ψυκτικού». Με αυτόν τον τρόπο το νερό του δευτερεύοντος βράζει και παράγεται ατμός. Το ψυκτικό της καρδιάς, έχοντας δώσει τη θερμική του ενέργεια στο δευτερεύον, βγαίνει από τον εναλλάκτη σχετικά «ψυχρό» (290°C) και επιστρέφει στην είσοδο της καρδιάς για τη συνέχιση της ψύξης της καρδιάς. Το υπόλοιπο κύκλωμα είναι πανομοιότυπο με αυτό της συμβατικής μονάδας: ο ατμός που βγαίνει από το δευτερεύον οδηγείται και κινεί το στρόβιλο, στη συνέχεια υγροποιείται στον συμπυκνωτή και στη συνέχεια οδηγείται στην είσοδο του δευτερεύοντος κυκλώματος.

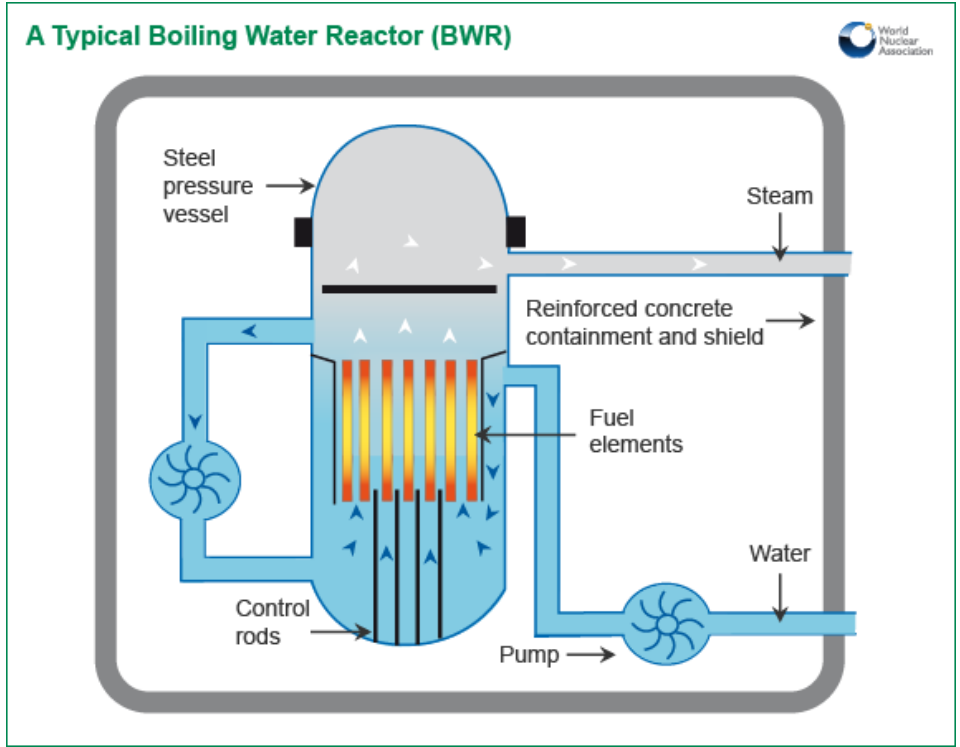
Παρακάτω, στο Σχήμα 4, βλέπουμε ένα τυπικό παράδειγμα μονάδας ηλεκτροπαραγωγής με χρήση πυρηνικού αντιδραστήρα σχάσης με αντιδραστήρα πεπιεσμένου ύδατος (Pressurized Water Reactor – PWR) :



Σχήμα 4 A typical Pressurized Water Reactor (PWR) (World Nuclear Association, 2013)

Στον αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος η ατμοποίηση του ψυκτικού νερού πραγματοποιείται μέσα στην καρδιά του αντιδραστήρα.

Στο Σχήμα 5 φαίνεται η τυπική διάταξη ενός αντιδραστήρα ζέοντος ύδατος (Boiling Water Reactor – BWR):



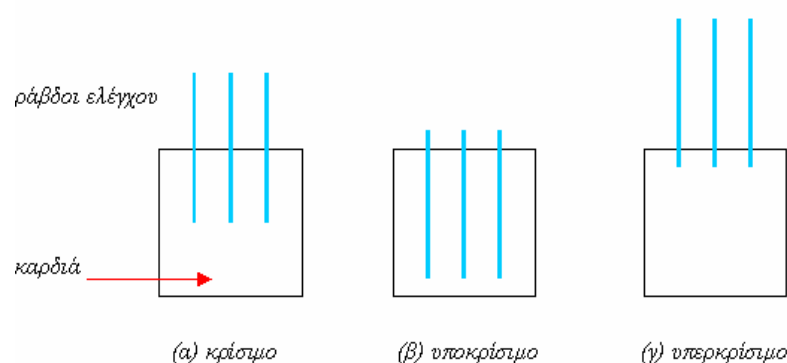
Σχήμα 5 A typical Boiling Water Reactor (BWR) (World Nuclear Association, 2013)



Στην πυρηνική βιομηχανία υπάρχουν εξαιρετικά προηγμένα συστήματα ελέγχου και ασφάλειας, πολύ περισσότερο αυστηρά σε σχέση με άλλες βιομηχανικές διεργασίες, π.χ. της χημικής βιομηχανίας.

Περιγράφεται παρακάτω ποιοτικά ο κύριος τρόπος ελέγχου της κρισιμότητας. Αυτό γίνεται σχεδόν σε όλους τους αντιδραστήρες με χρήση ράβδων ελέγχου. Οι μεταλλικές αυτές ράβδοι περιέχουν ικανή ποσότητα υλικών που είναι ισχυροί απορροφητές νετρονίων. Οι ράβδοι ελέγχου είναι εν μέρει βυθισμένες στην καρδιά του αντιδραστήρα. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο έτσι, ώστε όταν οι ράβδοι ελέγχου είναι βυθισμένες σε ένα ορισμένο βάθος της καρδιάς, το ισοζύγιο νετρονίων δίνει κρίσιμο σύστημα, δηλαδή ο ρυθμός παραγωγής ισούται με το ρυθμό απωλειών νετρονίων.

Όταν οι ράβδοι βυθίζονται σε μεγαλύτερο βάθος από αυτό που αντιστοιχεί σε κρίσιμο σύστημα, εισάγεται στην καρδιά περισσότερο υλικό που απορροφά νετρόνια, οπότε ο ρυθμός απωλειών νετρονίων είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό παραγωγής νετρονίων και ο αντιδραστήρας είναι υποκρίσιμος. Όταν οι ράβδοι ελέγχου είναι βυθισμένες στην καρδιά σε βάθος μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί σε κρίσιμο σύστημα, τότε στην καρδιά βρίσκεται λιγότερο υλικό που απορροφά νετρόνια, οπότε ο ρυθμός απωλειών νετρονίων είναι μικρότερος από τον ρυθμό παραγωγής νετρονίων και ο αντιδραστήρας είναι υπερκρίσιμος (Σχήμα 6).

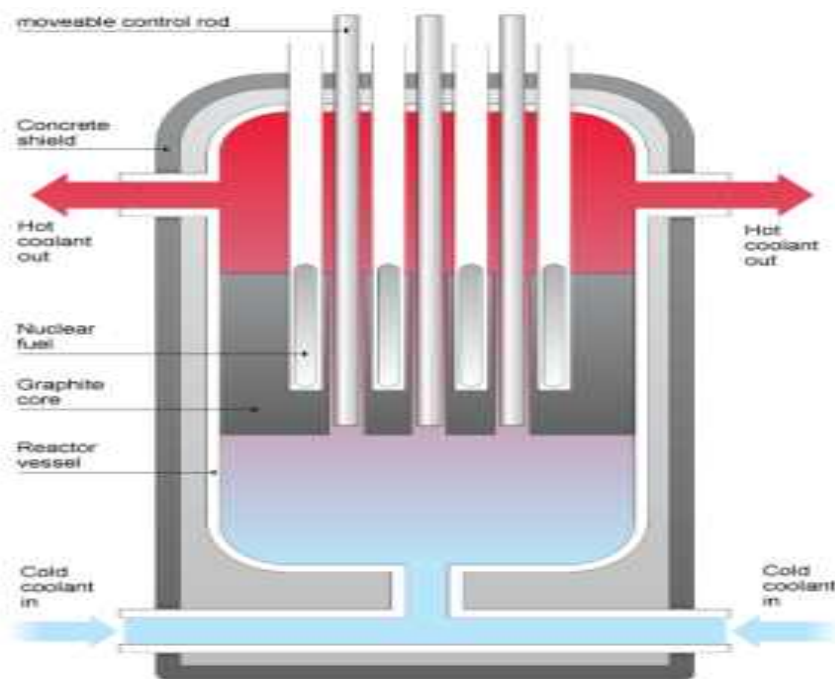


**Σχήμα 6** A simplified diagram showing whether a reactor is critical (α), subcritical (β) or hypercritical (γ) (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ)

Ο αντιδραστήρας καθίσταται: **κρίσιμος για λειτουργία σε σταθερή ισχύ, ελεγχόμενα υπερκρίσιμος για αύξηση της ισχύος και ελεγχόμενα υποκρίσιμος για μείωση της ισχύος**. Τα συστήματα ασφαλείας στοχεύουν στην αποτροπή μη ελεγχόμενης υπερκρισιμότητας.

Οι ράβδοι του πυρηνικού καυσίμου περιβάλλονται από τους επιβραδυντές που μετατρέπουν τα ταχέα νετρόνια που προκύπτουν από τις σχάσεις σε θερμικά, πριν εισέλθουν στις συστάδες καυσίμου, όπου θα συναντήσουν σχάσιμους πυρήνες και θα

προκαλέσουν σχάσεις και παραγωγή νέων ταχέων νετρονίων. Στους αντιδραστήρες PWR ή BWR το ψυκτικό που ρέει γύρω από τις ράβδους καυσίμου είναι ελαφρύ νερό και, περιβάλλοντας το καύσιμο, λειτουργεί και ως επιβραδυντής. Παρακάτω, στο Σχήμα 7, φαίνεται το εσωτερικό ενός πυρηνικού αντιδραστήρα:



Σχήμα 7 The inner of a nuclear reactor (World Nuclear Association, 2013)

Τα νετρόνια προκύπτουν από τη σχάση με μεγάλες ενέργειες (μέση τιμή 2 MeV, μέγιστη 20 MeV). Με αυτές τις ενέργειες τα νετρόνια κινούνται με μεγάλες ταχύτητες και γι' αυτό ονομάζονται ταχέα νετρόνια. Η ταχύτητα νετρονίου ενέργειας 2 MeV είναι περίπου  $20 \cdot 10^6 \text{ms}^{-1}$ . Νετρόνια των οποίων η κινητική ενέργεια είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την κινητική ενέργεια των ατόμων και των μορίων των υλικών της καρδιάς, ονομάζονται θερμικά νετρόνια. Η μέση τιμή της ενέργειας των θερμικών νετρονίων είναι περίπου 0,025 eV, που αντιστοιχεί σε ταχύτητα νετρονίου  $2200 \text{ms}^{-1}$ .

Τα θερμικά νετρόνια συμβαίνει να είναι πολύ πιο αποδοτικά ως προς την πρόκληση σχάσεων από ότι τα ταχέα. Δηλαδή η πιθανότητα να υποστεί σχάση σχάσιμος πυρήνας, αν συναντηθεί με θερμικό νετρόνιο, είναι εξαιρετικά μεγαλύτερη από την πιθανότητα να υποστεί σχάση αν συναντηθεί με ταχύ νετρόνιο. Ως εκ τούτου οι περισσότεροι τύποι αντιδραστήρων σχεδιάζονται έτσι, ώστε ικανό ποσοστό των ταχέων νετρονίων της σχάσης να επιβραδύνονται μέχρις ότου γίνουν θερμικά πριν εισέλθουν στις συστάδες καυσίμου, όπου θα συναντήσουν σχάσιμους πυρήνες και θα προκαλέσουν σχάσεις και παραγωγή νέων ταχέων νετρονίων. Η επιβράδυνση πραγματοποιείται με διαδοχικές σκεδάσεις των ταχέων νετρονίων με τους πυρήνες κατάλληλων υλικών, που ονομάζονται επιβραδυντές και περιβάλλουν τις ράβδους του πυρηνικού καυσίμου. Οι αντιδραστήρες αυτοί ονομάζονται θερμικοί αντιδραστήρες.

Για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας διαφυγής στο περιβάλλον των ραδιενεργών προϊόντων, χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα φράγματα εγκλωβισμού, που είναι το ίδιο το καύσιμο καθώς και το περίβλημα της ράβδου καυσίμου, το δοχείο πίεσης και το δοχείο εγκλωβισμού. Το ίδιο το καύσιμο υπό μορφή κυλινδρικών δισκίων εγκλωβίζει τα στερεά προϊόντα της καύσης, το περίβλημα της ράβδου καυσίμου τα αέρια προϊόντα και το δοχείο πίεσης, στο οποίο περιέχεται η καρδιά του αντιδραστήρα και το κύκλωμα του ψυκτικού, το οποίο είναι έτσι σχεδιασμένο για να αντέχει τις υπερπίεσεις σε περίπτωση ατυχήματος

Το σοβαρότερο ατύχημα που μπορεί να συμβεί σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα είναι η **Απώλεια Ψυκτικού ή LOCA (Loss of Coolant Accident)**. Σε τέτοιο ατύχημα, στο μέρος της καρδιάς που δεν ψύχεται, η παραγόμενη από τις σχάσεις θερμότητα δεν απάγεται, οπότε η θερμοκρασία των ράβδων του καυσίμου αυξάνεται. Ενδέχεται, η αύξηση της θερμοκρασίας να ξεπεράσει το όριο τήξης του καυσίμου και του περιβλήματός του, οπότε θα επέλθει τήξη του καυσίμου στην περιοχή της καρδιάς που δεν ψύχεται. Αν συμβεί αυτό, η επαφή του υψηλής θερμοκρασίας τηγμένου μεταλλικού καυσίμου με υγρό ψυκτικό, που έχει σχετικά με το καύσιμο χαμηλή θερμοκρασία, θα προκαλέσει έκρηξη η οποία ενδέχεται να προκαλέσει καταστροφή και τήξη μεγάλου μέρους ή και ολόκληρης της καρδιάς. Πέραν του ότι ο αντιδραστήρας στην περίπτωση αυτή καθίσταται οριστικά άχρηστος, η ανάπτυξη μεγάλων πιέσεων είναι πιθανόν να προκαλέσει περαιτέρω ρήξη του κυκλώματος του ψυκτικού και διαρροή μεγάλων ποσοτήτων ραδιενεργών υλικών στο περιβάλλον.

Πρόκειται για το μέγιστο δυνατό ατύχημα, οι συνέπειες του οποίου για το περιβάλλον μπορεί να είναι ιδιαίτερα σοβαρές. Το ατύχημα αυτό ονομάζεται «ατύχημα βάσει σχεδιασμού», διότι το σύστημα σχεδιάζεται έτσι, ώστε η πιθανότητα να συμβεί τέτοιο ατύχημα να είναι μικρότερη από κάποια προκαθορισμένη τιμή.

## 1.5 Ιστορική Εξέλιξη πυρηνικών αντιδραστήρων

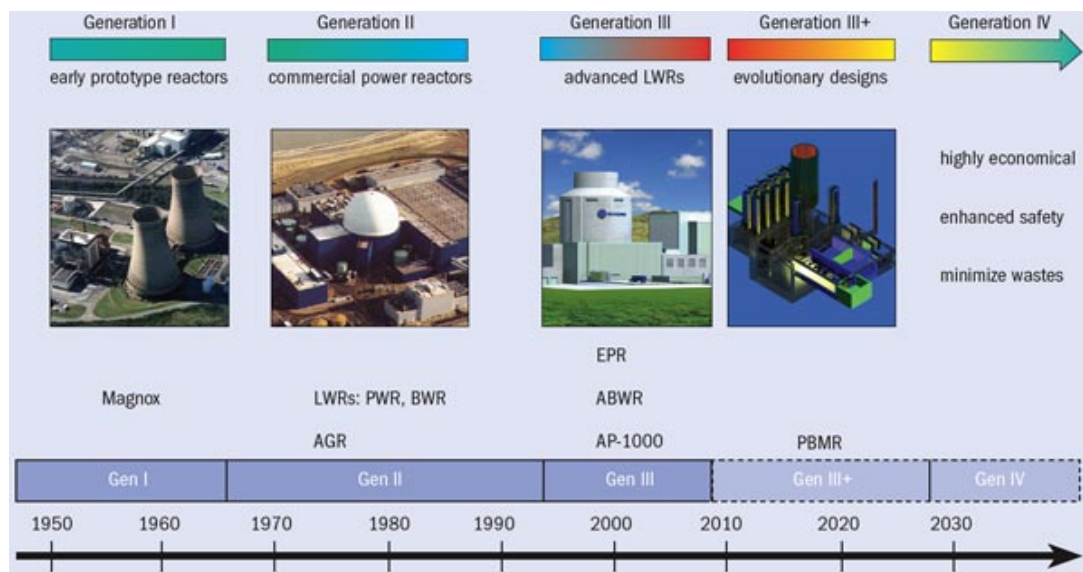
- **1ης γενιάς και τύπου Magnox.** Οι αντιδραστήρες αυτοί χρησιμοποιούσαν δοχείο μαγνησίου, το οποίο περιείχε το καύσιμο ουρανίου υπό μορφή ράβδων. Για τον έλεγχο της αλυσιδωτής αντίδρασης οι αντιδραστήρες Magnox χρησιμοποιούσαν γραφίτη ο οποίος απορροφά τα νετρόνια, και ως ψυκτικό και επιβραδυντικό των νετρονίων χρησιμοποιούσαν διοξείδιο του άνθρακα. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου αντιδραστήρα ήταν ότι δεν χρειαζόταν ο εμπλουτισμός του καυσίμου αλλά μόνο ουράνιο-235.
- **2<sup>ης</sup> γενιάς τύπου LWR και AGR.** Οι αντιδραστήρες LWR (Light Water Reactors) περιγράφηκαν πιο πάνω και βρίσκονται σε μεγάλη χρήση παγκόσμια ενώ είναι διαρκώς εξελιζόμενοι. Οι αντιδραστήρες τύπου AGR έχουν την ίδια περίπου κατασκευή με τους αντιδραστήρες Magnox μόνο που δουλεύουν σε μεγαλύτερη θερμοκρασία (600 βαθμοί Κελσίου αντί για 370 στους Magnox) και έτσι έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Χρησιμοποιούν για τον έλεγχο της αντίδρασης γραφίτη και σαν ψυκτικό μέσο το διοξείδιο του

άνθρακα. Χρησιμοποιούν όμως οξείδια του ουρανίου ως καύσιμο ενώ αναπτύχθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '70, και πολλοί από αυτούς λειτουργούν ακόμα. Και καθώς οι αντιδραστήρες τύπου Magnox γίνονται μαλακοί και μπορούν να αναφλεγούν στον αέρα στις θερμοκρασίες που δουλεύει ο AGR, γι αυτό χρησιμοποιείται ως επένδυση ο ανοξείδωτος χάλυβας. Επειδή ο ανοξείδωτος χάλυβας απορροφά περισσότερα νετρόνια από το Magnox, οι αντιδραστήρες AGR απαιτούν ουράνιο περιεκτικότητας λίγα τοις εκατό σε 235.

- **3<sup>ης</sup> γενιάς υπό κατασκευή σε πρώιμο στάδιο.** Σήμερα συζητούνται δύο κυρίως αντιδραστήρες της 3ης γενιάς. Ο Areva EPR (European pressurized water reactor) και Westinghouse AP-1000 με ισχύ 1000 MW (AP σημαίνει αυξημένη ασφάλεια). Υπάρχουν κι άλλοι τύποι αντιδραστήρων, όπως ο καναδικός Candu (ACR). Αυτές οι μονάδες είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούσαν βαρύ ύδωρ σαν επιβραδυντή, αλλά με δευτέριο αντί για πρώτιο στο νερό. Βέβαια το βαρύ ύδωρ δεν συλλαμβάνει σχεδόν κανένα από τα νετρόνια, αλλά χρησιμοποιείται για να τα επιβραδύνει. Αυτό σημαίνει ότι είναι διαθέσιμα περισσότερα νετρόνια από τις διασπάσεις, επιτρέποντας στους αντιδραστήρες ACR να λειτουργήσουν με καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων αυτών των μελλοντικών αντιδραστήρων της 3ης γενιάς είναι ότι λειτουργούν απλά: απαιτούν λιγότερη επέμβαση, λιγότερα καύσιμα και είναι ευκολότερα να συντηρηθούν από ότι οι προηγούμενοι. Έχουν επίσης προηγμένα, παθητικά χαρακτηριστικά ασφάλειας που στηρίζονται στις φυσικές δυνάμεις όπως είναι η βαρύτητα και η μεταφορά, με ελάχιστη ή καμία ανάγκη για μηχανικές συσκευές όπως είναι οι αντλίες. Εντούτοις, ορισμένες ομάδες όπως είναι η CND (για τον πυρηνικό αφοπλισμό) και η GREENPEACE έχουν αγνοήσει τέτοια χαρακτηριστικά και αντιθέτως έχουν επικεντρωθεί στις ανησυχίες του κόσμου για τα πυρηνικά απόβλητα, που θα παρήγαγε ένας νέος στόλος σταθμών πυρηνικής ενέργειας. Στη Φινλανδία και στη Γαλλία κατασκευάζονται ήδη της 3ης γενιάς, ενώ η Κίνα έχει παραγγείλει αρκετά AP-1000. Εδώ να προσθέσουμε την **3<sup>η</sup> ++ γενιά** αντιδραστήρων των οποίων η σημαντικότερη βελτίωση ασφάλειας, σε σχέση με τη δεύτερη γενιά, είναι ότι θα ενσωματώνουν παθητικά συστήματα ασφάλειας, στα οποία τα ενεργά συστήματα (π.χ. αντλίες) αντικαθίστανται με παθητικά συστήματα που βασίζονται σε φυσικές δυνάμεις (βαρύτητα, αποθηκευμένη ενέργεια, παθητική μεταφορά θερμότητας στο περιβάλλον, παθητική έκτακτη ψύξη καρδιάς κ.α.) και όχι σε λειτουργικότητα σχεδιασμένων μηχανισμών κατόπιν ηλεκτρικής ή μηχανικής εντολής. Θα έχουν καλύτερη ασφάλεια με πολύ ουσιαστική απλοποίηση του συστήματος.
- **4<sup>ης</sup> γενιάς υπό μελέτη.** Προς το τέλος της δεκαετίας του '90 το Αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας επέλεξε έξι σχέδια για τους αντιδραστήρες της 4ης γενιάς για να βελτιώσει τους ήδη υπάρχοντες με σκοπό την εξάπλωση της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Τρία από αυτά τα σχέδια είναι γρήγοροι αντιδραστήρες, οι οποίοι έχουν έναν βιώσιμο κύκλο καυσίμων στον οποίο το πλουτόνιο-239 παράγεται από το ουράνιο-238 με σύλληψη ενός νετρονίου, και επομένως να λειτουργήσουν για πολλές εκατοντάδες χρόνια με τα υπάρχοντα αποθέματα ουρανίου. Τα τρία σχέδια γρήγορων αντιδραστήρων διαφέρουν κυρίως στην επιλογή του ψυκτικού μέσου: δηλαδή υγρό νάτριο,

υγρός μόλυβδος και αέριο ηλίου, είναι μερικά ψυκτικά μέσα από τα οποία κάποια είναι καλύτεροι αγωγοί θερμότητας, ενώ μερικά είναι πιο προβληματικά εάν διαρρέουν. Ένα άλλο σχέδιο της 4ης γενιάς είναι ο εξαιρετικά κρίσιμος αντιδραστήρας ύδατος, στον οποίο χρησιμοποιείται το νερό στην εξαιρετικά κρίσιμη φάση του ως ψυκτικό μέσο. Το νερό σε αυτή την κατάσταση (δηλ. όπου δεν υπάρχει καμία διάκριση μεταξύ ενός υγρού και ενός αερίου) έχει μια πολύ υψηλή ειδική θερμότητα, και γι αυτό έχει μια πιο υψηλή θερμική αποδοτικότητα απ' ό,τι στα υπάρχοντα LWR. Τέλος υπάρχει ο αντιδραστήρας πολύ υψηλής θερμοκρασίας (VHTR), ο οποίος συσχετίζεται με τα τρέχοντα σχέδια αντιδραστήρων HTR που ακολουθείται από τη Νότια Αφρική. Αυτοί οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν ως επιβραδυντή γραφίτη και ως ψυκτικό μέσο αέριο, και έχουν υψηλή θερμική αποδοτικότητα. Επιπλέον, οι VHTR είναι απίστευτα ασφαλείς αντιδραστήρες, επειδή το ραδιενεργό περιεχόμενο των καυσίμων συγκρατείται ακόμα κι αν ο αντιδραστήρας φθάσει σε θερμοκρασίες παραπάνω από 1500 Κελσίου (δηλ. 500 βαθμούς περισσότερο από την κανονική θερμοκρασία λειτουργίας). Το τελικό σχέδιο της 4ης γενιάς - που ονομάζεται αντιδραστήρας τήξης άλατος - είναι το πιο ριζικό. Εδώ τα καύσιμα είναι υπό μορφή άλατος ουράνιου που κυκλοφορεί στο ψυκτικό μέσο, έτσι ώστε οποιαδήποτε απώλεια ψυκτικού μέσου θα διέκοπτε την αλυσιδωτή αντίδραση. Πώς θα γίνει στην πράξη αυτή διαδικασία ακόμα δεν έχει αποφασιστεί τυπικά, καθώς η έρευνα στο σχέδιο τήξης του άλατος ουρανίου - και κάθε άλλο σχέδιο της IV γενιάς στην πραγματικότητα - είναι σε ένα πολύ αρχικό στάδιο. Είναι απίθανο ότι και τα έξι σχέδια θα πετύχουν εμπορικά. Μερικά θα απορριφθούν τελικά όπως μερικοί αντιδραστήρες αποδεικνύονται πιο βιώσιμοι από κάποιους άλλους. σε μια άλλη φάση.

Παρακάτω, φαίνονται οι τέσσερις γενιές πυρηνικών αντιδραστήρων σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ. Οι πρώτες εγκαταστάσεις των Magnox (δεκαετία '50 και '60), πολλές από τις οποίες είναι ακόμα σε χρήση, είναι της γενιάς I, ενώ οι διάδοχοί τους στη δεκαετία του '70 και τη δεκαετία του '80 - οι αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος (LWR) - ονομάστηκαν γενιάς II. Είναι η πλειοψηφία των σημερινών σταθμών πυρηνικής ενέργειας. Τα σχέδια για τη γενιά III, που είναι παρόμοιοι αντιδραστήρες με τη γενιά II αλλά με ενισχυμένα χαρακτηριστικά ασφάλειας, είναι έτοιμα να χτιστούν, ενώ μερικές χώρες ακολουθούν την ελαφρώς πιο προηγμένη γενιά III+. Υπάρχουν πιο μακροπρόθεσμα σχέδια για τη γενιά IV - από τα οποία το Υπουργείο Ενέργειας έχει επιλέξει έξι - είναι στα αρχικά τους στάδια, αλλά υπόσχονται μια πολύ καθαρότερη και πιο οικονομική πυρηνική ενέργεια προς τα μέσα του αιώνα. Στο σχήμα 8, φαίνεται η εξέλιξη ανά γενιά των πυρηνικών αντιδραστήρων:



Σχήμα 8 Nuclear reactors' Generations (US Department of Energy, access June 2014)

## 1.6 Πυρηνικά ατυχήματα

Μολονότι ο σχεδιασμός των πυρηνικών εγκαταστάσεων γίνεται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να αποφευχθεί ένα ατύχημα, παρόλα αυτά έχουν συμβεί αρκετά ατυχήματα καθιστώντας τη μελέτη και το σχεδιασμό διαδικασίες με υψηλή ευθύνη για τον μελετητή. Το κόστος ασφάλειας ενός πυρηνικού εργοστασίου είναι περίπου κοντά στο 25% του κεφαλαίου.

Από τη δεκαετία του 1950, οπότε και οι πρώτες εμπορικές χρήσεις της πυρηνικής ενέργειας έως και σήμερα, συνέβησαν αρκετά ατυχήματα, μεγάλα και μικρά. Στα μεγάλα ατυχήματα που προκάλεσαν έντονες συζητήσεις στην κοινή γνώμη. Το πρώτο πυρηνικό ατύχημα με διαρροή ραδιενέργειας συνέβη στον Καναδά το 1952. Ήταν οστόσο μικρής κλίμακας και δεν προκάλεσε θύματα.

Μεγάλα ατυχήματα για τα οποία θα γίνει μία μικρή αναφορά είναι το ατύχημα το Μάρτιο του 1979 στη μονάδα 2 του πυρηνικού σταθμού στο Three Mile Island (TMI) στην Πενσυλβανία των ΗΠΑ, το ατύχημα τον Απρίλιο του 1986 στη μονάδα 4 του πυρηνικού σταθμού στο Τσερνομπίλ της Ουκρανίας και η σειρά ατυχημάτων το Μάρτιο του 2011 στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα. Αναλυτικά:

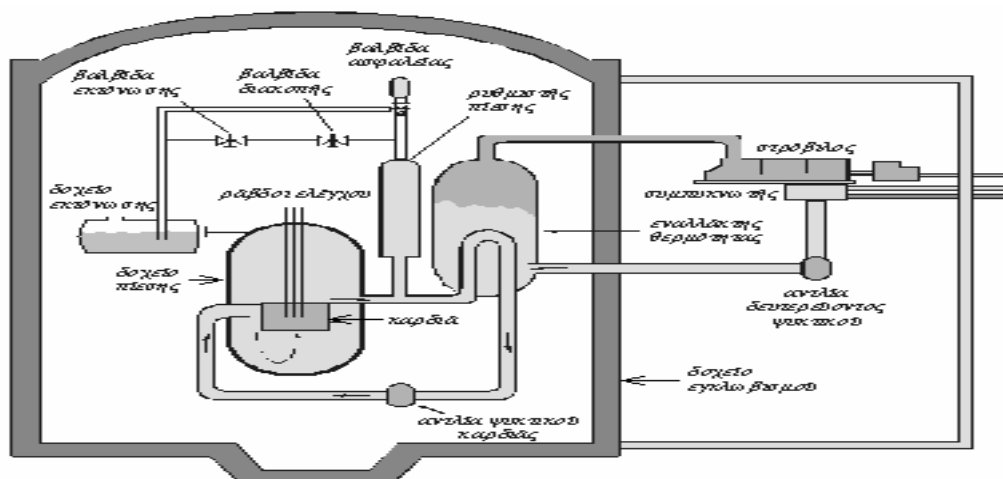
### ❖ Ατύχημα στη μονάδα 2 του πυρηνικού σταθμού Three Mile Island

Το πυρηνικό ατύχημα στο εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας στο Three Mile Island, στην Πενσυλβανία, τριακόσια χιλιόμετρα από τη Νέα Υόρκη στις 28 Μαρτίου 1979, αποτελεί το μεγαλύτερο και σοβαρότερο τέτοιο δυστύχημα στις ΗΠΑ. Έγινε στη μονάδα 2 του πυρηνικού σταθμού.

Η Μονάδα 2 ήταν το ήμισυ ενός ζεύγους αντιδραστήρων πεπιεσμένου ύδατος 1000 PW. Τη λειτουργία των δύο αυτών μονάδων είχε αναλάβει η πυρηνική μετοχική εταιρία GPU. Δύο κυκλώματα που περιείχαν νερό υπό πίεση, απέκτησαν θερμότητα

από την πυρηνική καρδιά του αντιδραστήρα και μ' αυτή έθεσαν σε κίνηση τους στροβίλους που παρήγαγαν ηλεκτρική ενέργεια. Η Μονάδα 2 ήταν σε λειτουργία λιγότερο από τρεις μήνες από τον καιρό του ατυχήματος. Το ατύχημα ξεκίνησε στις 4:00 το πρωί, όταν οι χειριστές συνάντησαν διακοπές στο στρόβιλο και τον αντιδραστήρα. Τέθηκε σε λειτουργία η κατευθυνόμενη βαλβίδα ανακούφισης, η οποία εν αγνοία των χειριστών, κόλλησε και προκάλεσε πτώση της πίεσης και αυτόματη αναστολή της λειτουργίας του αντιδραστήρα. Η δεξαμενή ξεχείλισε και το δοχείο συγκράτησης πλημμύρισε με ραδιενεργό νερό. Μετά από αλλεπάλληλα ανθρώπινα λάθη, η θέρμανση στον πυρήνα του αντιδραστήρα αυξήθηκε πάνω από τα όρια, οι ράβδοι των καυσίμων έσπασαν με αποτέλεσμα ραδιενεργά αέρια να διαχυθούν στο περιβάλλον.

Πρόκειται για μια σειρά από ανθρώπινα και τεχνικά σφάλματα που οδήγησαν ωστόσο στη μερική τήξη του καυσίμου του αντιδραστήρα, ο οποίος υπερθερμάνθηκε. Είχε μείνει επί τέσσερις ώρες χωρίς νερό, πριν αποκατασταθεί το κύκλωμα της ψύξης. Περίπου δέκα ώρες μετά την εκδήλωση του δυστυχήματος, περίπου 300 kg υδρογόνου από το καύσιμο το οποίο είχε υποστεί τήξη, εξερράγησαν στην μονάδα 2 όπου βρισκόταν ο αντιδραστήρας, χωρίς κανείς ωστόσο να χάσει τη ζωή του. Στο Σχήμα 9, παρακάτω φαίνεται διαγραμματικά ο αντιδραστήρας 2 και ο πυρηνικός σταθμός στο Three Mile Island:

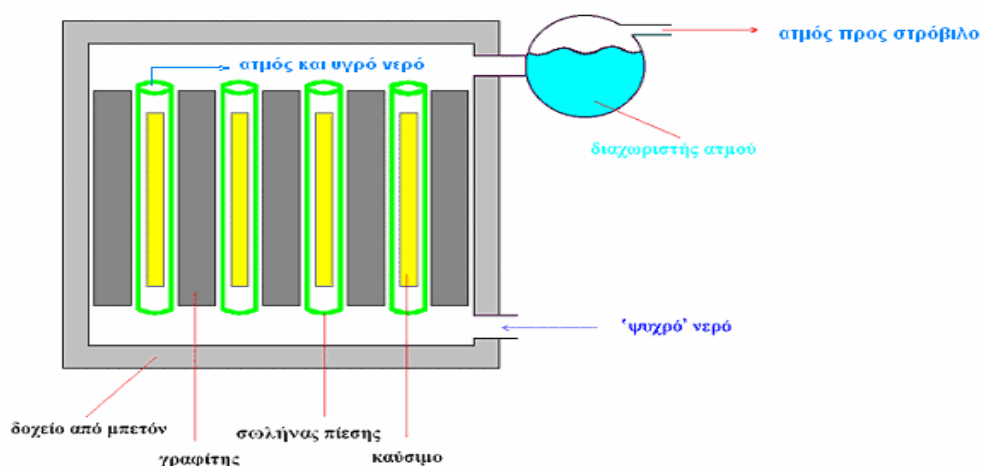


Σχήμα 9 Simplified Diagram of Reactor 2 and the nuclear station at Three Mile Island (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής του ΤΕΕ)

### ❖ Ατύχημα Τσερνομπίλ

Το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνομπίλ έλαβε χώρα στις 26 Απριλίου του 1986, στον αντιδραστήρα Nr 4 του Πυρηνικού Σταθμού Παραγωγής Ενέργειας του Τσερνομπίλ της Σοβιετικής Ένωσης, ο οποίος σήμερα βρίσκεται σε εδάφη της Ουκρανίας. Το ατύχημα ήταν της τάξης του μέγιστου προβλεπόμενου ατυχήματος στην Διεθνή Κλίμακα Πυρηνικών Γεγονότων, διατάραξε σοβαρότατα τις οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες που επικρατούσαν στις γύρω περιοχές και είχε σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην υγεία, με άμεσα από το ατύχημα νεκρούς 31 ανθρώπους. Το ατύχημα συνέβη ξημερώματα του Σαββάτου 26 Απριλίου 1986. Σημειώθηκαν δύο εκρήξεις στο κτίριο του αντιδραστήρα Νο 4. Το αποτέλεσμα τους ήταν η διάνοιξη μιας τρύπας στην οροφή του κτιρίου και η

εκτόξευση γραφίτη, σκυροδέματος και συντριμμιών. Ως αποτέλεσμα αυτών, ο πυρήνας του αντιδραστήρα βρέθηκε σε επαφή με το εξωτερικό περιβάλλον. Μεγάλο μέρος του ουρανίου που χρησιμοποιούνταν ως καύσιμο έφυγε στον αέρα μαζί με υπερουράνια στοιχεία και προϊόντα της σχάσης από τον πυρήνα του αντιδραστήρα, παρασυρόμενα από τον καπνό του οποίου η στήλη έφτασε σε ύψος το ένα χιλιόμετρο. Πυρκαγιά ξέσπασε στην οροφή πάνω από τον στρόβιλο του αντιδραστήρα. Επίσης φλόγες υπήρχαν στο εσωτερικό του κτιρίου μαζί με ατμούς και σκόνη. Ο γραφίτης που έπαιζε το ρόλο του επιβραδυντή του αντιδραστήρα, ανεφλέγη από τη θερμότητα και την έκρηξη. Τα αίτια του ατυχήματος επανεξετάστηκαν από τη Διεθνή Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας το 1992 κι από άλλους οργανισμούς κι αποτελούν πεδίο αντιπαραθέσεων μεταξύ των ειδικών ακόμη και σήμερα. Όλες οι απόψεις, όμως, συγκλίνουν σε μια σειρά ανθρώπινων λαθών. Αναλυτικά, μερικοί εργάτες θέλησαν να εκτελέσουν πείραμα στον πυρηνικό σταθμό, χωρίς να είναι οι αρμόδιοι, για να καθορίσουν σε έναν από τους αντιδραστήρες τη χρονική διάρκεια κατά την οποία μία μηχανή ατμού θα λειτουργούσε με τη μηχανική αδράνεια, καθώς και το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παρήγαγε χωρίς να μπουν σε λειτουργία οι γεννήτριες πετρελαίου. Μία σειρά από θεμελιώδεις κανόνες δεν τηρήθηκαν με αποτέλεσμα, η αύξηση της πίεσης να είναι τέτοια να ακολουθήσει η πρώτη έκρηξη. Πρόκειται για το χειρότερο ατύχημα σε πυρηνική εγκατάσταση όλων των εποχών που οι συνέπειές του καταγράφονται ακόμη και σήμερα. Στο Σχήμα 10, παρακάτω, φαίνεται ο αντιδραστήρας του Τσερνομπίλ:



Σχήμα 10 Nuclear Reactor RBMK of Chernobyl (International Atomic Energy Agency. Int. Conference: One decade after Chernobyl, Summing up the consequences of the accident, 1996)

### ❖ Ατυχήματα πυρηνικού σταθμού Φουκουσίμα

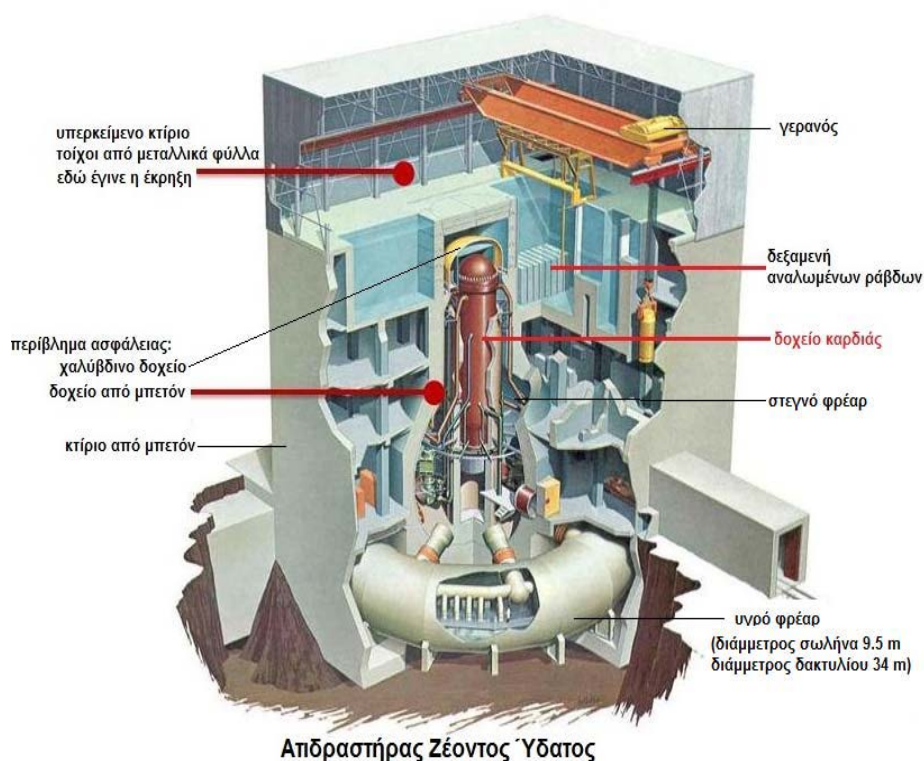
Τα ατυχήματα συνέβησαν στον πυρηνικό σταθμό της Φουκουσίμα την άνοιξη του 2011, μετά από έναν ισχυρό σεισμό και το τσουνάμι που ακολούθησε στις 11 Μαρτίου και είχε ως αποτέλεσμα τη μη λειτουργία του συστήματος ψύξης των αντιδραστήρων στις εγκαταστάσεις της μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Φουκουσίμα 1.

Επιπλέον παράγοντες που συνετέλεσαν στα πυρηνικά ατυχήματα ήταν η κακή κατάσταση των αντιδραστήρων, (παλαιότητα, ρωγμές, προηγούμενα ατυχήματα που συγκαλύφθηκαν) και η αύξηση της παραγωγής (καταπόνηση), με ταυτόχρονες



οικονομικές περικοπές (ανεπαρκής συντήρηση) εις βάρος της ασφάλειας. Το συγκεκριμένο εργοστάσιο ήταν προγραμματισμένο να τεθεί εκτός λειτουργίας στις αρχές του 2011 έχοντας ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του αλλά πήρε δεκαετή παράταση λειτουργίας ένα μήνα πριν την καταστροφή. Αυτό οδήγησε σε 4 εκρήξεις σε διάστημα 5 ημερών καθώς και σε πυρκαγιά ενός αντιδραστήρα, με αποτέλεσμα τη μεγάλη διαρροή ραδιενέργειας στο περιβάλλον και μία από τις μεγαλύτερες οικολογικές καταστροφές που τα αποτελέσματά της δεν έχουν ακόμη εκτιμηθεί ως προς την επικινδυνότητα απέναντι στην υγεία των έμβιων οργανισμών και την ισορροπία του περιβάλλοντος, καθώς οι επιπτώσεις από την έκθεση στη ραδιενέργεια δεν είναι ορατές μόνο άμεσα αλλά γίνονται αντιληπτές και σε βάθος χρόνου. 3-D σχέδιο του αντιδραστήρα της Φουκουσίμα, φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 11:

Σχήμα 11 BWR at Fukushima Baiichi (Antonopoulos-Domis, 2011)



Επί πλέον αυτών: Στο εργοστάσιο Tokaimura (Ιαπωνία), κατασκευής πυρηνικού καυσίμου για πειραματικούς αντιδραστήρες, συνέβη στις 30 Σεπτεμβρίου 1999 «**ατύχημα κρισιμότητας**», δηλαδή περιορισμένη μη-ελεγχόμενη αυτοσυντηρούμενη αντίδραση αλυσωτών σχάσεων. Το ατύχημα προκάλεσε το θάνατο δύο εργαζόμενων, καταγράφηκε μόλυνση 600 εργαζομένων και 320.000 κάτοικοι υποχρεώθηκαν να μετοικήσουν. Το ατύχημα αποδόθηκε σε ανθρώπινο λάθος.

Πολλά παρόμοια «**ατυχήματα κρισιμότητας**» έχουν συμβεί σε στρατιωτικές εγκαταστάσεις και εργαστήρια, κυρίως των ΗΠΑ και της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Όλα, εκτός από δύο, συνέβησαν πριν από τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Ένα από αυτά, παρόμοιο με αυτό της Ιαπωνίας, συνέβη σε εμπορικό εργοστάσιο πυρηνικού καυσίμου το 1964 και προκάλεσε ένα θάνατο. Τριάντα επτά συνέβησαν σε

στρατιωτικές εγκαταστάσεις πειραματικών αντιδραστήρων και εργαστηρίων και προκάλεσαν 10 θανάτους. Άλλα 22 συνέβησαν σε εγκαταστάσεις του κύκλου καυσίμου, 21 στρατιωτικές και 1 εμπορική, και προκάλεσαν 7 θανάτους. Σε κανένα από αυτά τα ατυχήματα δεν συνέβη αξιόλογη εκροή ραδιενεργών υλικών έξω από το κτήριο της εγκατάστασης.

Παρακάτω, στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται όλα τα πυρηνικά ατυχήματα με διαβάθμιση (όπως αναλύεται παρακάτω) με βάση στοιχεία που συλλέχτηκαν από το Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας:

**Πίνακας 2 Nuclear Accidents (International Atomic Energy Agency, 2011)**

Year <sup>a</sup>	Incident	INES level	Country	IAEA description
1952	Chalk River	5	Canada	A reactor shutoff rod failure, combined with several operator errors, led to a major power excursion of more than double the reactor's rated output at AECL's NRX reactor
1957	Kyshtym	6	Russia	Significant release of radioactive material to the environment from explosion of a high activity waste tank.
1957	Windscale Pile	5	UK	Release of radioactive material to the environment following a fire in a reactor core
1958	Vinča		Yugoslavia	During a subcritical counting experiment a power buildup went undetected - six scientists received high doses
1958	Chalk River		Canada	Due to inadequate cooling a damaged uranium fuel rod caught fire and was torn in two
1959	Santa Susana Field Laboratory		US	Partial core meltdown
1964	Charlestown		US	Error by a worker at a United Nuclear Corporation fuel facility led to an accidental criticality
1966	Monroe		US	Sodium cooling system malfunction
1967	Chapelcross		UK	Graphite debris partially blocked a fuel channel causing a fuel element to melt and catch fire
1969	Lucens		Switzerland	Total loss of coolant led to a power excursion and explosion of experimental reactor
1977	Jaslovské Bohunice	4	Czechoslovakia	Damaged fuel integrity, extensive corrosion damage of fuel cladding and release of radioactivity
1979	Three Mile Island	5	US	Severe damage to the reactor core
1980	Saint Laurent des Eaux	4	France	Melting of one channel of fuel in the reactor with no release outside the site
1981	Tsuruga	2	Japan	More than 100 workers were exposed to doses of up to 155 millirem per day radiation
1986	Hamm-Uentrop		Germany	Spherical fuel pebble became lodged in the pipe used to deliver fuel elements to the reactor
1986	Chernobyl	7	Ukraine (USSR)	Widespread health and environmental effects. External release of a significant fraction of reactor core inventory
1989	Greifswald		Germany	Excessive heating which damaged ten fuel rods
1989	Vandellos	3	Spain	Near accident caused by fire resulting in loss of safety systems at the nuclear power station
1993	Cadarache	2	France	Spread of contamination to an area not expected by design
1993	Tomsk	4	Russia	Pressure buildup led to an explosive mechanical failure

1999	Ishikawa	2	Japan	Control rod malfunction
1999	Ikitelli	3	Turkey	Loss of a highly radioactive Co-60 source
1999	Yanangio	3	Peru	Incident with radiography source resulting in severe radiation burns
1999	Tokaimura	4	Japan	Fatal overexposures of workers following a criticality event at a nuclear facility
2003	Paks	3	Hungary	Partially spent fuel rods undergoing cleaning in a tank of heavy water ruptured and spilled fuel pellets
2005	Braidwood		US	Nuclear material leak
2005	Atucha	2	Argentina	Overexposure of a worker at a power reactor exceeding the annual limit
2005	Sellafield	3	UK	Release of large quantity of radioactive material, contained within the installation
2006	Erwin		US	Thirty-five litres of a highly enriched uranium solution leaked during transfer
2006	Forsmark	2	Sweden	Degraded safety functions for common cause failure in the emergency power supply system at nuclear power plant
2006	Fleurus	4	Belgium	Severe health effects for a worker at a commercial irradiation facility as a result of high doses of radiation
2011	Onagawa		Japan	Reactor shutdown after the 2011 Sendai earthquake and tsunami caused a fire
2011	Fukushima	5	Japan	Reactor shutdown after the 2011 Sendai earthquake and tsunami; failure of emergency cooling caused an explosion

## 1.7 Διαβάθμιση πυρηνικών ατυχημάτων

Ο αρμόδιος οργανισμός για την πυρηνική ενέργεια είναι ο Διεθνής Οργανισμός Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency) και αποτελεί παράρτημα του ΟΗΕ με έδρα τη Βιέννη.

Ο ΔΟΑΕ συνέταξε μία επταβάθμια κλίμακα που συνεκτιμά και αποδίδει συνέπειες από γεγονότα σχετικά με τις ειρηνικές εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας, τη **Διεθνή Κλίμακα Πυρηνικών Γεγονότων INES (International Nuclear Event Scale)**.

Η κλίμακα INES είναι μια κλίμακα που έχει ως στόχο να ποσοτικοποιήσει κάπως τα αποτελέσματα και τους κινδύνους από ένα γεγονός ή ατύχημα που έχει σχέση με ραδιενεργά υλικά. Δηλαδή η κλίμακα δεν αφορά μόνο πυρηνικά ατυχήματα σε εργοστάσια ή τέτοιες εγκαταστάσεις, αλλά αφορά γενικά γεγονότα που έχουν σχέση με ραδιενεργά υλικά. Η κλίμακα έχει 7 βαθμίδες και τη μηδενική, ξεκινώντας από το μηδέν όπου καταχωρούνται περιστατικά που δεν παρουσιάζουν κανένα κίνδυνο και φτάνοντας στο 7 όπου κατατάσσονται τα πιο επικίνδυνα ατυχήματα. Η κλίμακα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι λογαριθμική, δηλαδή η μία βαθμίδα σε σχέση με την άλλη περιέχει περιστατικά με 10 φορές μεγαλύτερη ή μικρότερη επικινδυνότητα. Η κλίμακα εφαρμόζεται από όποιον αναφέρει γεγονότα στο ΔΟΑΕ, ο οποίος έχει και την τελική ευθύνη της αξιολόγησης και της συνακόλουθης διάχυσης. Στην κλίμακα, υπάρχουν 3 στοιχεία που εξετάζονται:

1. Κατά πόσο υπήρξαν επιπτώσεις στους ανθρώπους και στο περιβάλλον από ραδιενέργεια,
2. Κατά πόσο παρουσιάστηκαν προβλήματα διαρροής ραδιενέργειας σε περιοχές όπου δεν θα έπρεπε να υπάρχει ραδιενέργεια, και
3. Κατά πόσο υπήρχαν προβλήματα και αποτυχίες στα συστήματα ασφαλείας.

Άρα η κλίμακα έχει ως:

**INES 7:** Τεράστια έκκλιση ραδιενεργών υλικών με ευρύτερες επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και στο περιβάλλον. Απαραίτητη η λήψη μέτρων για την αποκατάσταση της περιοχής.

Στην κατηγορία αυτή ανήκει το ατύχημα στο Τσερνομπίλ.

**INES 6:** Σημαντική έκκλιση ραδιενεργού υλικού που πιθανώς να χρειαστεί να ληφθούν μέτρα για την αποκατάσταση της περιοχής. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το ατύχημα στο εργοστάσιο του Mayak κοντά στο Kyshtym στην Ρωσία.

**INES 5:** Μικρή έκκλιση ραδιενεργού υλικού στο περιβάλλον. Ύπαρξη θανάτων από έκθεση σε ραδιενέργεια. Σοβαρές ζημιές στον πυρήνα του αντιδραστήρα. Μεγάλη έκκλιση ραδιενεργού υλικού στους χώρους του εργοστασίου. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το ατύχημα στο Three Mile Island.

**INES 4:** Ελάχιστη έκκλιση ραδιενεργού υλικού στο περιβάλλον. Τουλάχιστον ένας θάνατος από έκθεση σε ραδιενέργεια. Ζημιά στις ράβδους καυσίμου ή μερική τήξη. Έκκλιση σημαντικών ποσοτήτων ραδιενεργού υλικού στον χώρο του εργοστασίου.

*Από το επίπεδο 3 και κάτω η κλίμακα δεν μιλά για ατυχήματα, αλλά για περιστατικά.*

**INES 3:** Έκθεση σε δόση δεκαπλάσια από την μέγιστη ετήσια επιτρεπτή δόση για εργαζόμενους σε τέτοιες εγκαταστάσεις. Ύπαρξη εργαζομένων με τραυματισμούς από έκθεση σε μη θανάσιμη δόση ακτινοβολίας. Επίπεδο ραδιενέργειας περισσότερο από 1 Sv/h (το Sievert είναι μονάδα μέτρησης της ισοδύναμης δόσης, όπου τα 8 Sv θεωρούνται θανάσιμη δόση) σε κάποιο χώρο της εγκατάστασης. Σοβαρή μόλυνση ραδιενέργειας σε περιοχή της εγκατάστασης που δεν είναι σχεδιασμένη για κάτι τέτοιο. Απώλεια των συστημάτων ασφαλείας, χωρίς όμως να συμβεί ατύχημα. Απώλεια ή κλοπή ραδιενεργούς πηγής η οποία όμως είναι θωρακισμένη και δεν υπάρχει διαρροή ραδιενέργειας.

**INES 2:** Έκθεση μέλους του κοινού σε δόση μεγαλύτερη από 10mSv/h. Έκθεση εργαζομένων σε δόση μεγαλύτερη από το ετήσιο όριο για τους εργαζόμενους (το όριο είναι περίπου 100mSv). Επίπεδα ραδιενέργειας μεγαλύτερα από 50mSv/h σε κάποιους χώρους. Σημαντική μόλυνση ραδιενέργειας σε περιοχή της εγκατάστασης που δεν είναι σχεδιασμένη για κάτι τέτοιο. Σοβαρή απώλεια σε συστήματα ασφαλείας της εγκατάστασης, αλλά χωρίς άλλα προβλήματα. Απώλεια ραδιενεργούς πηγής η οποία όμως είναι θωρακισμένη και δεν υπάρχει διαρροή ραδιενέργειας.

**INES 1:** Έκθεση μέλους του κοινού σε δόση μεγαλύτερη από το επιτρεπτό ετήσιο όριο. Μικροπροβλήματα με κάποιο από τα συστήματα ασφαλείας. Απώλεια ή κλοπή ραδιενεργούς πηγής μικρής ενεργότητας.

**INES 0:** Κανένας κίνδυνος.

Στο Σχήμα 12, παρακάτω, φαίνεται σχηματικά η κλίμακα διαβάθμισης πυρηνικών ατυχημάτων INES:



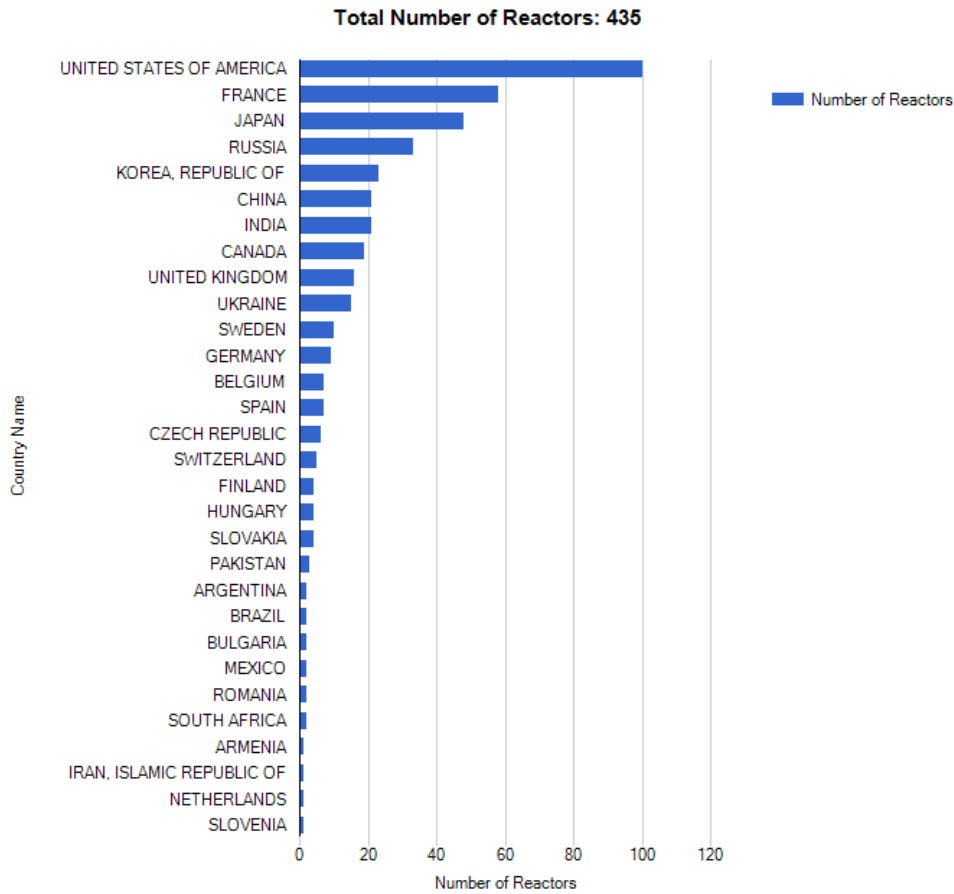
Σχήμα 12 INEX Climax for nuclear accidents(International Atomic Energy Agency, 2011)

## 1.8 Η ανάπτυξη της πυρηνικής ενέργειας και οι κατευθύνσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης

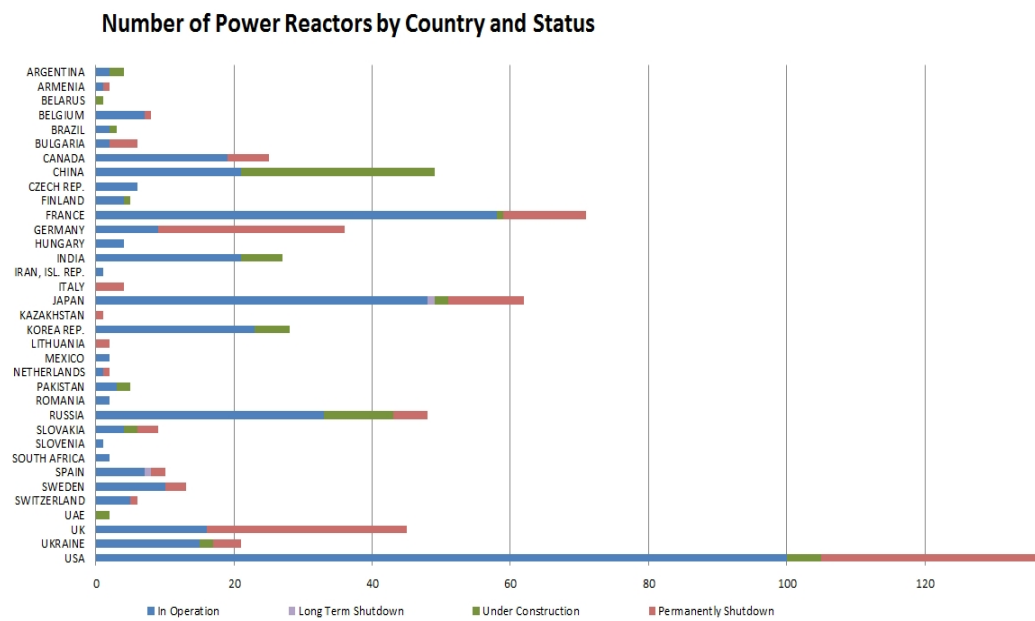
Οι πυρηνικοί σταθμοί σε λειτουργία το έτος 2014 είναι 435 παγκόσμια. 2 πυρηνικοί αντιδραστήρες είναι στην διαδικασία μακρόχρονου τερματισμού (long term shutdown) και 72 βρίσκονται υπό κατασκευή. Η συνολική ηλεκτρικού ρεύματος παγκόσμια είναι 372812 eV.

Στο Σχήμα 13 φαίνεται το σύνολο των 435 αντιδραστήρων σε λειτουργία πλην 6 αντιδραστήρων της TAIWAN, για την οποία δεν βρήκαμε ιδιαίτερα στοιχεία κατά τη διάρκεια της έρευνας. Τα πρωτεία τα κατέχουν οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής με 100 εν ενεργεία πυρηνικούς αντιδραστήρες, κι ακολουθούν στις πρώτες πέντε θέσεις μετά τις ΗΠΑ η Γαλλία με 58, η Ιαπωνία με 48, η Ρωσία με 33, η Δημοκρατία της Κορέας (Νότια Κορέα) με 23 και η Κίνα με 21. Στην τελευταία θέση βρίσκονται η Αρμενία, το Ιράν, οι Κάτω Χώρες και η Σλοβενία που διαθέτουν από ένα εν ενεργεία πυρηνικό αντιδραστήρα έκαστη χώρα.

Στο Σχήμα 14 φαίνεται το σύνολο των πυρηνικών αντιδραστήρων ανά χώρα και με περιγραφή της κατάστασης στην οποία βρίσκονται τον Ιούνιο του 2014. Δηλαδή αν είναι σε λειτουργία (γαλάζιο χρώμα), σε μακρόχρονο τερματισμό (βιολετί-μωβ χρώμα), υπό κατασκευή (πράσινο χρώμα) ή μόνιμα εκτός λειτουργίας (κόκκινο - κεραμιδί χρώμα).



**Σχήμα 13** Total number of operating reactors by country (International Atomic Energy Agency - Power Reactor Information System, 2014)



**Σχήμα 14** Number of Power Reactors by Country and Status (International Atomic Energy Agency - Power Reactor Information System, 2014)

Η Ευρώπη παρουσιάζει μια μακροχρόνια και επιτυχή ιστορία όσον αφορά την πυρηνική ενέργεια από την άποψη ασφάλειας, οικονομικών και ανάπτυξης τεχνολογίας. Η διάδοση της πληροφορίας και η συμμετοχή του κοινού στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων έχει διευρυνθεί, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται βελτίωση της κοινωνικής αποδοχής της πυρηνικής ενέργειας από το κοινό, σε σχέση με τις προηγούμενες δύο δεκαετίες.

Οι παράγοντες διαθεσιμότητας και απόδοσης των εγκαταστάσεων πυρηνικής ενέργειας έχουν βελτιωθεί σταθερά κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών, καταδεικνύοντας την ποιότητα σχεδιασμού, την αξιοπιστία λειτουργίας καθώς επίσης και την αποδοτική οργάνωση τους από την άποψη κανονισμών και ασφάλειας. Οι ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας έχουν άριστο ιστορικό ασφάλειας και κανένα σοβαρό ατύχημα δεν έχει συμβεί στην ΕΕ. Η ασφάλεια είναι ο πρωταρχικής σημασίας παράγοντας για τους σχεδιαστές, κατασκευαστές, χειριστές και τις αρχές και οργανισμούς ασφάλειας.

Όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ έχουν υπογράψει τη συνθήκη Ευρατόμ (Euratom Treaty) και τις συμβάσεις πυρηνικής ασφάλειας και διαχείρισης πυρηνικών αποβλήτων του ΔΟΑΕ. Οι κανονισμοί έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται σε κάθε χώρα της ΕΕ. Η εναρμόνιση των κανονισμών και η σύγκλιση των πρακτικών πυρηνικής ασφάλειας στην Ευρώπη γίνεται μέσω συνεχών προσπαθειών της δυτικοευρωπαϊκής Ένωσης Ρυθμιστικών Αρχών Πυρηνικών Εγκαταστάσεων (Western European Nuclear Regulators Association - WENRA) και του δικτύου (European Technical Safety Organizations Network - ETSON), αντίστοιχα. Συνεχής βελτίωση παρατηρείται στην διαφάνεια και δημόσια πληροφόρηση για ζητήματα πυρηνικής ενέργειας. Η Συνθήκη του Arhus σχετικά με την πρόσβαση στις πληροφορίες, τη δημόσια συμμετοχή στη λήψη απόφασης και την πρόσβαση στη δικαιοσύνη σε θέματα που αφορούν το περιβάλλον τέθηκε σε ισχύ το 2001 και επικυρώθηκε από τις 27 χώρες της ΕΕ.

Αυτά τα θέματα συζητούνται στο δημιουργηθέν **Ευρωπαϊκό Φόρουμ Πυρηνικής Ενέργειας (European Nuclear Energy Forum)** και την Ομάδα Εργασίας σχετικά με την Πυρηνική Ασφάλεια και τα Απόβλητα (High-level Group on Safety and Waste).

Το Ευρωπαϊκό ιστορικό ασφάλειας, η τεχνολογική τελειότητα, μαζί με το ρυθμιστικό πλαίσιο της ΕΕ εξασφαλίζουν, ένα υψηλό επίπεδο μμελλοντικής ανάπτυξης της πυρηνικής ενέργειας εντός της ΕΕ, αλλά και έξω από τα σύνορα της, όπου δραστηριοποιείται η Ευρωπαϊκή βιομηχανία.

Τέλος, χαρακτηριστική της σημασίας την οποία αποδίδει η ΕΕ στην συμμετοχή του πυρηνικού καυσίμου στο συνολικό μίγμα ενεργειακών φυσικών πόρων της Ευρώπης σε βάθος τουλάχιστον 50ετίας, είναι η πρόσφατη δημιουργία της «Αειφόρου Ευρωπαϊκής Πυρηνικής Ενεργειακής Τεχνολογικής Πλατφόρμας».

## 1.9 Βιβλιογραφία 1<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

- ✚ Αντωνόπουλος- Ντόμης Μ., «Η ασφάλεια των αντιδραστήρων ζέοντος ύδατος στη Φουκουσίμα», Θεσσαλονίκη, 2011
- ✚ Αντωνόπουλος-Ντόμης Μ., Χ. Βλαχοκόστας, Σ. Κιαρτζής, Π. Μπίλλιας Π. Σαμαράς, «Εφαρμογές της Πυρηνικής Τεχνολογίας στη Βιομηχανία Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (Πόρισμα Ομάδας Εργασίας του ΤΕΕ/ΤΚΜ όπως εγκρίθηκε με την απόφαση Α155/Σ11/14.04.2009 της Διοικούσας Επιτροπής)», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2009
- ✚ Γιούτσος Αναστάσιος, «Η Πυρηνική Ενέργεια στον αιώνα μας», Agy Energy Point Publication, Αθήνα, Μάρτιος 2008
- ✚ PROTEAS (LIFE09 ENV/GR/000291) : «Πρωτόκολλο REACH για εκπομπές και σενάρια ατυχημάτων κατά την τροφοδοσία και διακίνηση καυσίμων και πετροχημικών προϊόντων – Κεφάλαιο Ε: Διεθνής Ναυτιλιακός Κώδικας μεταφοράς Επικίνδυνων υλικών IMDG», Πολυτεχνείο Κρήτης, 2013

### Διαλέξεις / Σεμινάρια / Συνέδρια

- ✚ Καινουργιάκης Εμμανουήλ, «Το πυρηνικό ατύχημα της Fukushima Ι», Παρουσίαση σεμιναρίων, Κρήτη, 2011
- ✚ Σιμόπουλος Ε. Σίμος, «Πυρηνικά ατυχήματα και επιπτώσεις», Διάλεξη στην ΕΔΕΜ, ΤΕΕ, Μάιος 2013

### Ιστοσελίδες:

- ✚ Atomic Archive: [www.atomicarchive.com](http://www.atomicarchive.com) (Access May 2014)
- ✚ Eurostat: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/> (Access May 2014)
- ✚ International Atomic Energy Agency: <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html> (Access May 2014)
- ✚ World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/> (Access May 2014)



Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# 2

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ. Η ΜΕΘΟΔΟΣ PSA – ΔΕΝΤΡΑ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ

### 2.1 Βασικές έννοιες από τη θεωρία του Ρίσκου και του Ανθρώπινου Παράγοντα

Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται αναλυτική παρουσίαση για την εκτίμηση ασφάλειας σε πυρηνικές εγκαταστάσεις μέσω της μεθόδου PSA (Probabilistic Safety Assessment) και της μεθόδου ETA (Event Tree Analysis). Οι δύο μέθοδοι αποτελούν συμπληρωματικές η μία της άλλης και είναι άκρως απαραίτητες για τη μελέτη ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την πυρηνική ενέργεια.

Για να γίνουν κατανοητές πολλές από τις έννοιες που παρατίθενται στο παρόν κεφάλαιο, είναι καλό να παρουσιαστούν κάποιοι βασικοί ορισμοί από τη θεωρία του ρίσκου καθώς και της ανάλυσης του ανθρώπινου παράγοντα.

- ο Η έννοια του κινδύνου και του ατυχήματος

Ως κίνδυνο ορίζουμε στο εξής το σύνολο των «καταστάσεων, συνθηκών, χαρακτηριστικών ή ιδιοτήτων που δημιουργούν την πιθανότητα ανεπιθύμητων συνεπειών». Σημειώνεται ότι οι κίνδυνοι αυτοί δημιουργούν την πιθανότητα κι όχι τη βεβαιότητα των μη επιθυμητών συνεπειών. Χωρίς την ύπαρξη των κινδύνων δεν είναι δυνατόν κανένα ατύχημα να συμβεί. Οι κίνδυνοι σε συνδυασμό με ανθρώπινα λάθη ή/και μηχανικές βλάβες ή/και σημαντικοί εξωγενείς παράγοντες, οδηγούν σε κάποιο αρχικό γεγονός (initiating event) το οποίο αν δεν ελεγχθεί από τις ασφαλιστικές δικλείδες του συστήματος εξελίσσεται σε ατύχημα.

Η έννοια του ατυχήματος δηλαδή στην βιομηχανία αλλά και στη ναυτιλία προϋποθέτει ένα αρχικό γεγονός μαζί με κάποια άλλη θεμελιώδη αιτία, σε συνδυασμό με αποτυχία αποτροπής του εκάστοτε γεγονότος από τις ασφαλιστικές δικλείδες του συστήματος και με συνέργεια αρνητικών εξωτερικών παραγόντων. Οι ασφαλιστικές δικλείδες είναι τα προγραμματισμένα μέσα προστασίας (πχ μηχανήματα, ανθρώπινες ενέργειες, ειδικοί κανόνες) που έχουν ως στόχο τη διακοπή των γεγονότων που οδηγούν στο ατύχημα.

- ο Η έννοια του ρίσκου

Το ρίσκο (risk) ή αλλιώς διακινδύνευση, δεν είναι αυστηρά καθορισμένη ως έννοια, αλλά συνήθως εκφράζει την επίπτωση ενός ανεπιθύμητου περιστατικού που απορρέει

από έναν συγκεκριμένο κίνδυνο, αναφορικά με τη σοβαρότητα και την πιθανότητα. Συνήθως αναφερόμαστε στην έννοια του παραδοσιακού ρίσκου (traditional risk) του οποίου ο τύπος φαίνεται παρακάτω (Γιαννακόπουλος, 2007):

**Ρίσκο= Πιθανότητα γεγονότος  $i$  × Συνέπειες γεγονότος  $i$**  ή με σύμβολα

$$R = P \times C$$

όπου R = ρίσκο

P = Πιθανότητα (Συχνότητα) του περιστατικού

C = Συνέπειες του περιστατικού

Εάν υπάρχει υψηλή συχνότητα ενός ατυχήματος σε συνδυασμό με μεγάλο αριθμό συνεπειών τότε μιλάμε για την πλέον δυσχερή κατάσταση, μια κατάσταση υψηλής επικινδυνότητας. Παράλληλα όμως, καταστάσεις υψηλής επικινδυνότητας μπορούν να χαρακτηριστούν και οι παρακάτω περιπτώσεις:

- i) **Υψηλή συχνότητα – μικρός αριθμός συνεπειών και**
- ii) **Χαμηλή συχνότητα – μεγάλος αριθμός συνεπειών.**

Το ρίσκο περαιτέρω κατηγοριοποιείται σε ατομικό και κοινωνικό. Το ατομικό ρίσκο σχετίζεται με τον κίνδυνο που αντιμετωπίζει μεμονωμένα ένα άτομο, ενώ το κοινωνικό σχετίζεται με τη συχνότητα και των αριθμό των ατόμων που ενδέχεται να υποστούν συνέπειες από την πραγματοποίηση συγκεκριμένου κινδύνου, σε δεδομένο πληθυσμό.

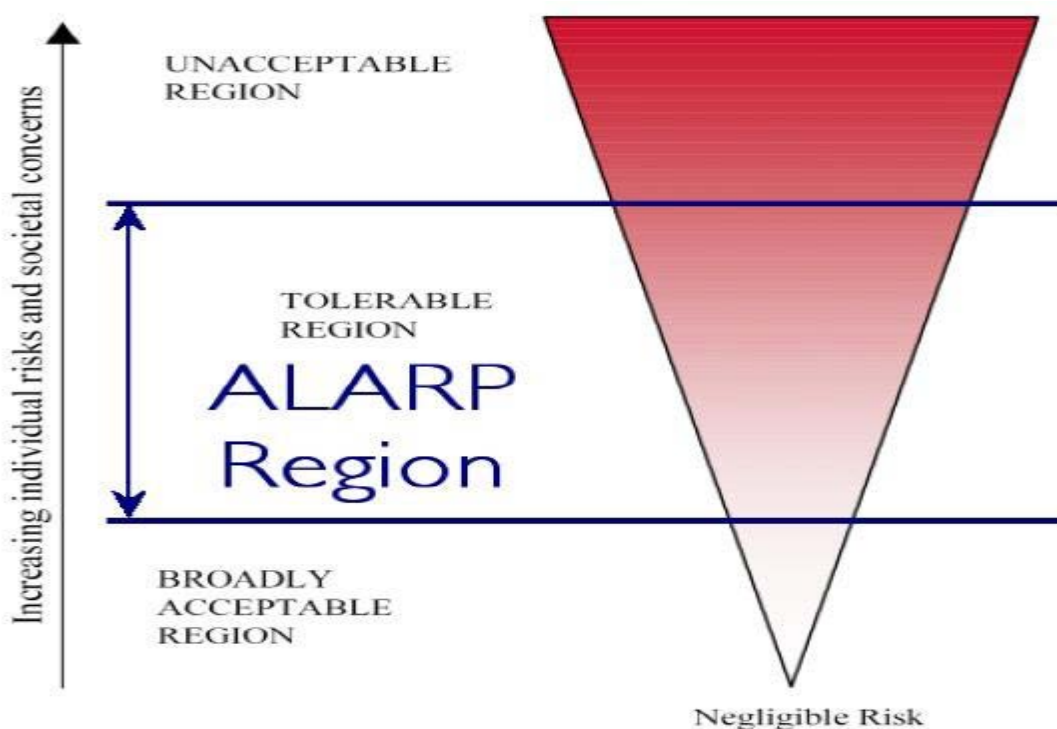
- ο Η έννοια της διαχείρισης ρίσκου

Η ευθύνη για την προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος από την έκθεση σε οποιοδήποτε κίνδυνο, οδηγεί τους επιστήμονες στην ανάπτυξη της διαχείρισης του ρίσκου (risk management). Η διαχείριση του ρίσκου είναι μία ορθολογική διαδικασία λήψης αποφάσεων κατά την οποία προσδιορίζεται, αναλύεται και ελέγχεται η πιθανότητα και η σοβαρότητα των κινδύνων καθώς και του επακόλουθου ρίσκου που απειλούν τη βιωσιμότητα ενός οργανισμού ή την επιτυχία μιας διαδικασίας. Η διαχείριση ρίσκου περιλαμβάνει (Kohli, 2007):

1. **Την αναγνώριση του κινδύνου (Hazard Identification):** Αναγνωρίζονται οι επικίνδυνες συνθήκες, μέσω πραγματικών γεγονότων (πχ ατυχήματα) ή μέσω προγραμμάτων που αποσκοπούν στον εντοπισμό των πηγών κινδύνου και καθορίζονται τα χαρακτηριστικά τους.
2. **Την ανάλυση του ρίσκου (Risk Analysis) :** είναι η συστηματική χρήση διαθέσιμων πληροφοριών για την αναγνώριση των κινδύνων καθώς και η εκτίμηση ρίσκου σε ατομικό, κοινωνικό, περιβαλλοντολογικό επίπεδο.
3. **Την αξιολόγηση του ρίσκου (risk assessment):** Αφού έχει αναγνωρισθεί ο κίνδυνος, απαιτείται κάποια μορφή ανάλυσης για την **εκτίμηση της δυναμικής του ρίσκου**. Στην αξιολόγηση λαμβάνονται υπόψη η πιθανότητα

του κινδύνου (probability), η σοβαρότητα των αρνητικών συνεπειών (severity) και το ποσοστό έκθεσης (για το ατομικό ρίσκο) σε κίνδυνο (exposure).

4. **Τον έλεγχο του ρίσκου (risk control):** Εφόσον έχει διαπιστωθεί η ύπαρξη ρίσκου επιβάλλεται να εισαχθούν μέτρα ελέγχου του. Η διαχείριση του ρίσκου πρέπει να υλοποιείται σε επίπεδο "as low as reasonably practicable" (ALARP). Αυτό σημαίνει ότι **ο κίνδυνος πρέπει να εξισορροπείται με το χρόνο, το κόστος και τη δυσκολία της λήψης μέτρων για τη μείωση ή την εξάλειψη του κινδύνου (ΕΜΠ, 2007)**. Στο Σχήμα 15, παρακάτω, φαίνεται παραστατικά η ζώνη ALARP:



Σχήμα 15 Acceptance of Risk – ALARP REGION (Tzatzakis, 2009)

- ο Ανθρώπινος παράγοντας - αξιοπιστία και ανθρώπινο λάθος

Η ανθρώπινη αξιοπιστία ορίζεται ως η *ικανότητα του ανθρώπου να πραγματοποιεί μία ενέργεια που έχει εκμάθει, κάτω από δεδομένες συνθήκες, και για μία καθορισμένη χρονική περίοδο* (Lerplat, 1985). Η διερεύνηση των αιτιών των ανθρωπίνων λαθών με στόχο τη βελτίωση της ανθρώπινης αξιοπιστίας, προϋποθέτει τη μελέτη τόσο του ανθρώπινου παράγοντα όσο και του συστήματος εργασίας, υπό το πρίσμα της αλληλεπίδρασης τους. Τα δε μέτρα για τη βελτίωση της ανθρώπινης αξιοπιστίας, μπορεί να αφορούν τόσο το σύστημα εργασίας (εργονομικός σχεδιασμός των στοιχείων του συστήματος εργασίας, ανάπτυξη και παροχή βοηθημάτων), όσο και στον ανθρώπινο παράγοντα (εκπαίδευση).

Το ανθρώπινο λάθος ορίζεται ως *μία εκτός των ορίων ενέργεια, όπου τα όρια αυτά καθορίζονται από το σύστημα εργασίας* (Swain, 1990). Η πλειοψηφία των ατυχημάτων και των συμβάντων έχουν ως πρώτο παράγοντα ευθύνης το ανθρώπινο λάθος. Τα

λάθη είναι αναμενόμενες συνέπειες βασικών και συνήθως χρήσιμων νοητικών μηχανισμών, όχι τυχαίες ή αυθαίρετες διαδικασίες. Θα μπορούσε να ειπωθεί πως «η σωστή εκτέλεση και τα συστηματικά λάθη είναι δύο πλευρές του ίδιου νομίσματος», όπως και, επίσης: *τα λάθη δεν είναι μόνο αιτίες, είναι και επιπτώσεις. Δε συμβαίνουν ως απομονωμένες δυσλειτουργίες στα μυαλά των ανθρώπων. Αντιθέτως, σχηματίζονται από τις συνθήκες της εργασίας, τον εξοπλισμό και, εν γένει, τον εργασιακό χώρο* (Reason J, 1997).

- ο Ανάλυση ανθρώπινης αξιοπιστίας (Human Reliability Analysis)

Οι βιομηχανίες οι οποίες τακτικά κάνουν χρήση της ποσοτικής αξιολόγησης του ρίσκου (quantitative risk assessment QRA) για να εκτιμήσουν τη συχνότητα των απωλειών ενός συστήματος ως μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού ή της διοίκησης των λειτουργιών, έχουν αναγνωρίσει ότι για να καταλήξουν σε έγκυρα αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να αξιολογούν τη συμβολή του ανθρώπινου παράγοντα στην απώλεια του συστήματος. Ένας τρόπος για την ενσωμάτωση του ανθρώπινου παράγοντα στην είναι μέσω της χρήσης της Ανάλυσης Ανθρώπινης Αξιοπιστίας (Human Reliability Analysis HRA). Η HRA είναι μια διαδικασία (process) η οποία περιλαμβάνει μια σειρά από δραστηριότητες (activities) και τη δυνατότητα χρήσης μιας σειράς τεχνικών οι οποίες εξαρτώνται από τον συνολικό στόχο της ανάλυσης. Η HRA μπορεί να χρησιμοποιείται για να αναπτύσσεται μια σειρά Πιθανοτήτων Ανθρώπινου Λάθους (Human Error Probabilities HEPs) με σκοπό να ενσωματωθούν στην πιθανολογική εκτίμηση ρίσκου.

- ο Δέντρα Σφαλμάτων (Fault Trees)

Το δένδρο σφαλμάτων είναι μία μέθοδος για τη γραφική/αναλυτική αναπαράσταση των λογικών συνδυασμών για τις αιτίες που προκαλούν ή μπορούν να προκαλέσουν ένα ανεπιθύμητο γεγονός ή κατάσταση. Πρόκειται συνεπώς για μία top-down προσέγγιση που συστηματικά διερευνά τις αιτίες και τα γεγονότα που συντελούν στην πρόκληση του κρίσιμου ατυχήματος. Τα δένδρα σφαλμάτων είναι ίσως η περισσότερο γνωστή μέθοδος στην ανάλυση ασφάλειας, ξεκίνησε από τη δεκαετία του 1960 (από τα Bell Laboratories) και αποτελεί ισχυρό όπλο για μία ρεαλιστική ανάλυση κινδύνων σε πολλές βιομηχανίες, όπως η αεροπορική, πυρηνική και πρόσφατα γίνονται προσπάθειες για τη ναυτιλιακή βιομηχανία (US Nuclear Regulatory Commission, 1981, Harms-Ring dhal, 2001).

- ο Δέντρα γεγονότων

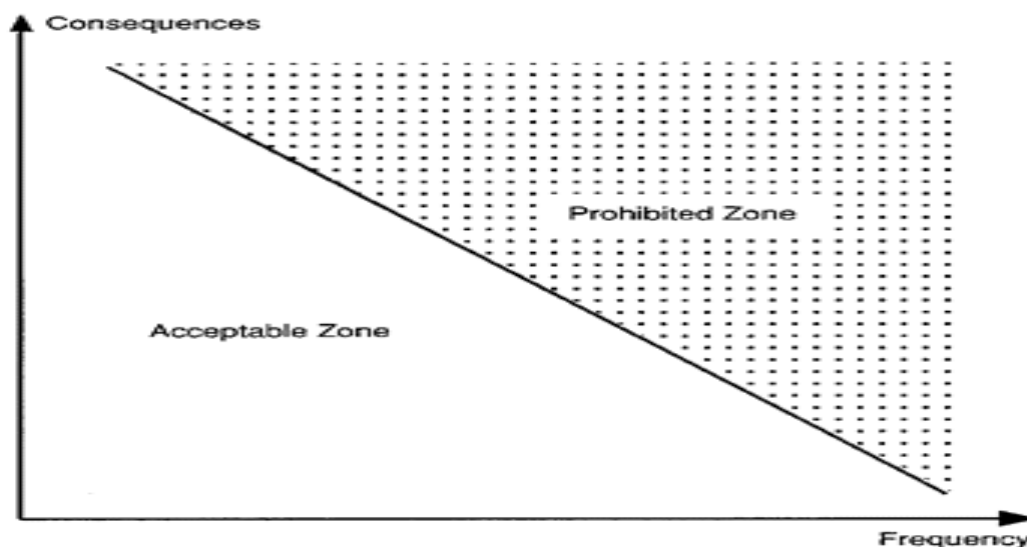
Τα δένδρα γεγονότων είναι μία συστηματική προσέγγιση-διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιπτώσεων ενός ατυχήματος, μίας αστοχίας ή γενικότερα ενός ανεπιθύμητου γεγονότος. Έτσι αυτή η τεχνική δίνει τη πιθανότητα ή συχνότητα ενός ατυχήματος να προκαλέσει προβλήματα προκαθορισμένων κατηγοριών, σε σχέση με τις ασφαλιστικές δικλείδες που υπάρχουν στο εξεταζόμενο σύστημα – δηλαδή διατάξεις και ενέργειες που έχουν ως στόχο τον περιορισμό ή την αποκλιμάκωση των συνεπειών, αφού καταγραφεί το ανεπιθύμητο γεγονός. Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται προς το τέλος αναλυτική παρουσίαση των δέντρων γεγονότων καθώς χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας για παραγωγή σεναρίων σύγκρουσης και προσάραξης σε πλοία με πυρηνική πρόωση.

## 2.2 Ασφάλεια και χρήση της πυρηνικής ενέργειας

Η ασφάλεια μίας πυρηνικής εγκατάστασης αποτελεί μέγιστη προτεραιότητα για την επιστημονική κοινότητα καθώς τα θέματα που αφορούν τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας προκαλούν ιδιαίτερο σκεπτικισμό στην κοινή γνώμη και μεγάλες αντιπαραθέσεις σε πολιτικό επίπεδο παγκόσμια. Το αντικείμενο της πυρηνικής ασφάλειας έχει να κάνει με τη βεβαιότητα της ομαλής λειτουργίας μίας εγκατάστασης, με την αποφυγή ατυχημάτων και με τον περιορισμό των επιπτώσεων από ατυχήματα αν ποτέ αυτά συμβούν.

Η οποιαδήποτε πυρηνική εγκατάσταση σχεδιάζεται κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε τα αποδεκτά όρια του ρίσκου να είναι κοινά και για το περιβάλλον και για την κοινή γνώμη. Η όποια αποδοχή ρίσκου για ατυχήματα στην πυρηνική βιομηχανία, έχει να κάνει με τον ελάχιστο περιορισμό των συνεπειών απέναντι στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Παρακάτω, στο Σχήμα 16 φαίνεται το διάγραμμα που σχετίζει την συχνότητα με τις επιπτώσεις ενός ατυχήματος και το όριο αποδοχής του ρίσκου. Το διάγραμμα ονομάζεται **Probability Consequence Diagram**. Με αυτό το διάγραμμα, γίνεται κατανοητό ότι το όριο αποδοχής ρίσκου περιγράφεται από την κεκλιμένη φθίνουσα ευθεία με άνω όριο τη μικρή συχνότητα και τις σημαντικές επιπτώσεις και κάτω όριο την μεγάλη συχνότητα και τις μικρής σημαντικότητας επιπτώσεις.



Σχήμα 16 Probability Consequence Diagram (International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, 2002)

Η προσπάθεια μείωσης των επιπτώσεων από τα ατυχήματα αλλά κυρίως της προεκτίμησης των ατυχημάτων και των παραγόντων που τα προκαλούν στην πυρηνική βιομηχανία, οδήγησαν στην ανάπτυξη πολλών μεθόδων για αυτό το σκοπό. Στη συνέχεια αναπτύσσεται η μέθοδος **Πιθανολογικής Εκτίμησης Ασφάλειας (Probabilistic Safety Assessment – PSA)** καθώς και η μέθοδος ανάπτυξης δέντρων γεγονότων (**Event Tree Analysis – ETA**) που αλληλοσυμπληρώνει την PSA.

## 2.3 Η απαρχή της μεθόδου PSA

Η εφαρμογή και η δημιουργία της **Πιθανοθεωρητικής Εκτίμησης Ρίσκου /Ασφάλειας** είναι συνδεδεμένη με την ιστορία της πυρηνικής βιομηχανίας. Στις αρχές της εξέλιξης της πυρηνικής ενέργειας, τις δεκαετίες του 1950 και του 1960 οι υπεύθυνοι για την κατασκευή των πυρηνικών αντιδραστήρων ήξεραν ότι οι πιθανές συνέπειες από ένα τέτοιο ατύχημα θα ήταν καταστροφικές. Ήταν πολύ σημαντικό να διατηρήσουν τις πιθανότητες ενός ατυχήματος πολύ χαμηλά. Το πρόβλημα ήταν ότι δεν μπορούσαν να ποσοτικοποιήσουν τις πιθανότητες αυτές, για να τις διατηρήσουν σε χαμηλά επίπεδα.

Οι πρώτες προσεγγίσεις ανάγονταν σε ντετερμινιστικές προσεγγίσεις κατά τις οποίες εξετάζονταν ποιες πιθανές αστοχίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε τέτοια ατύχημα. Ο R. Farmer το 1967 εισήγαγε μια νέα προσέγγιση για την ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων και κατ' επέκταση ολόκληρης της πυρηνικής βιομηχανίας. Ο Farmer υποστήριξε ότι δεν υπάρχουν πιθανά και απίθανα ατυχήματα, αλλά πρέπει να εξεταστεί ολόκληρο το φάσμα των ατυχημάτων. Πρότεινε την εξέταση της σειράς των γεγονότων και τη δημιουργία ατυχηματικών σεναρίων. Παράλληλα πρότεινε και κριτήρια αποδοχής του ρίσκου. Ουσιαστικά σχημάτισε τον πυρήνα μιας Πιθανοθεωρητικής Εκτίμησης Ρίσκου.

Η πρώτη μελέτη μέσω PSA που αφορούσε την ασφάλεια των πυρηνικών αντιδραστήρων, ήταν το 1975 (Rasmussen report), με την ονομασία WASH-1400, που εξέταζε κι εκτιμούσε το ρίσκο από μία πιθανή καταστροφή του πυρήνα δύο αντιδραστήρων ισχύος. Κατόπιν του ατυχήματος στο Three Mile Island, το 1979, επαναπροσδιορίστηκε η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη των πιθανολογικών μεθόδων για την εκτίμηση των κινδύνων από τη λειτουργία των πυρηνικών σταθμών ισχύος με σκοπό τη μείωση τους και την καλύτερη αποδοχή από την κοινωνία της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας. Αποκορύφωμα για τη συνεχή χρήση των μεθόδων PSA ήταν το ατύχημα του Τσερνομπίλ, το 1986 που έδωσε το έναυσμα για περισσότερη προσοχή στο ζήτημα της ασφάλειας των πυρηνικών αντιδραστήρων. Οι πρώτες δημοσιεύσεις, ωστόσο, της μεθόδου ήταν εντελώς γενικά χωρίς να διαχωρίζουν τα φυσικά από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της πυρηνικής εγκατάστασης.

## 2.4 Ορισμός της Μεθόδου PSA

**Η Μέθοδος PSA είναι μία εννοιολογική και μαθηματική μέθοδος, ένα εργαλείο, για την εξαγωγή των εκτιμήσεων του κινδύνου και της ασφάλειας για τις πυρηνικές και όχι μόνο, αλλά και για τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις.**

Οι στόχοι της PSA είναι:

- Να αξιολογηθεί το επίπεδο της ασφάλειας των εγκαταστάσεων και να προσδιοριστούν οι πλέον αποτελεσματικοί τομείς για βελτίωση.

- Να αξιολογηθεί το επίπεδο της ασφάλειας και σε σύγκριση με σαφή ή όχι πρότυπα.
- Να αξιολογηθεί το επίπεδο ασφάλειας με σκοπό την επιτυχή λειτουργία της εγκατάστασης.

Η PSA χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πιθανότητας ζημίας στον πυρήνα του αντιδραστήρα ως αποτέλεσμα των αλληλουχιών των ατυχημάτων που προσδιορίζονται από τη μελέτη. Επίσης, με τη μέθοδο αυτή εκτιμάται το μέγεθος της ραδιενέργειας που εκλύεται στο περιβάλλον καθώς και τις γενικότερες αρνητικές συνέπειες ως προς τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Η μέθοδος δεν υποδεικνύει μόνο της αδυναμίες μίας πυρηνικής εγκατάστασης αλλά και τα ισχυρά πλεονεκτήματα. Αυτό βοηθάει τους μελετητές και τους κατασκευαστές να συγκρίνουν τα διάφορα μέρη μιας εγκατάστασης και να ενισχύσουν με επιπλέον ασφαλιστικές δικλείδες τα αδύναμα σημεία.

## 2.5 Σκοπός της Μεθόδου PSA

**Η μέθοδος PSA είναι ένα απαραίτητο εργαλείο για την ανάλυση της ασφάλειας μιας πυρηνικής κατασκευής.** Για την ακρίβεια με τη μέθοδο αυτή:

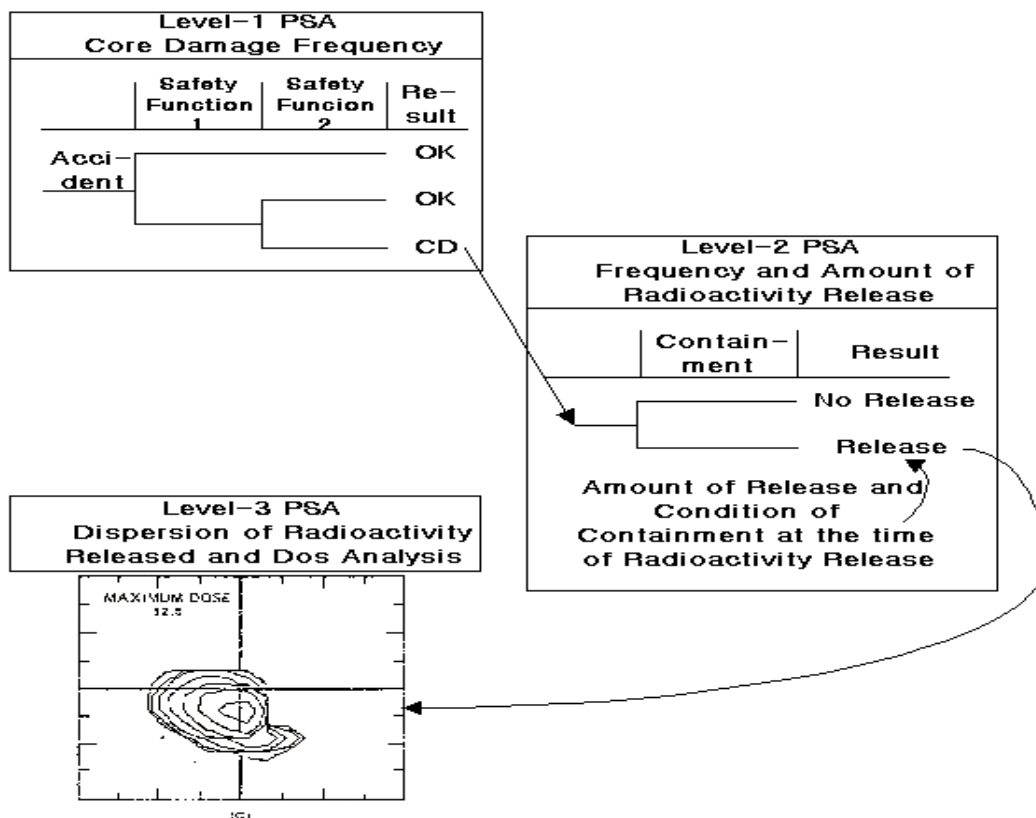
- ✓ Αποκτάται μία γνώση σε βάθος για τον μηχανισμό ενός πυρηνικού σταθμού και συλλέγονται πλήθος πληροφοριών από τη λειτουργία ομοειδών σταθμών.
- ✓ Προσδιορίζονται τα αρχικά γεγονότα και οι καταστάσεις βλάβης στην πυρηνική εγκατάσταση.
- ✓ Γίνεται μοντελοποίηση των βασικών συστημάτων εντός της εγκατάστασης χρησιμοποιώντας τα δέντρα σφαλμάτων και τα δέντρα γεγονότων.
- ✓ Γίνεται εκτίμηση μεταξύ των γεγονότων και του ανθρώπινου παράγοντα
- ✓ Αναπτύσσονται ειδικές βάσεις δεδομένων σχετικά με την αξιοπιστία των συστημάτων και των διαφόρων μερών μιας πυρηνικής εγκατάστασης.

## 2.6 Επίπεδα Εφαρμογής της Μεθόδου

Η μέθοδος PSA εφαρμόζεται σε **τρία επίπεδα μελέτης**. Το πρώτο επίπεδο έχει να κάνει με την εκτίμηση της αστοχίας της πυρηνικής μονάδας μέσα από τον προσδιορισμό της συχνότητας της καταστροφής του πυρήνα του αντιδραστήρα. Το δεύτερο επίπεδο έχει να κάνει με την συχνότητα και την ποσότητα της ραδιενέργειας που εκλύεται εντός της μονάδας και το τρίτο επίπεδο σχετίζεται με τις συνέπειες εκτός της περιοχής του ατυχήματος και την εκτίμηση του κοινωνικού ρίσκου.

Στο Σχήμα 17 παρακάτω, διακρίνονται συνοπτικά τα τρία επίπεδα της μεθόδου με έμφαση στο ποιο μέρος της κατασκευής αφορά το κάθε ένα από τα επίπεδα.



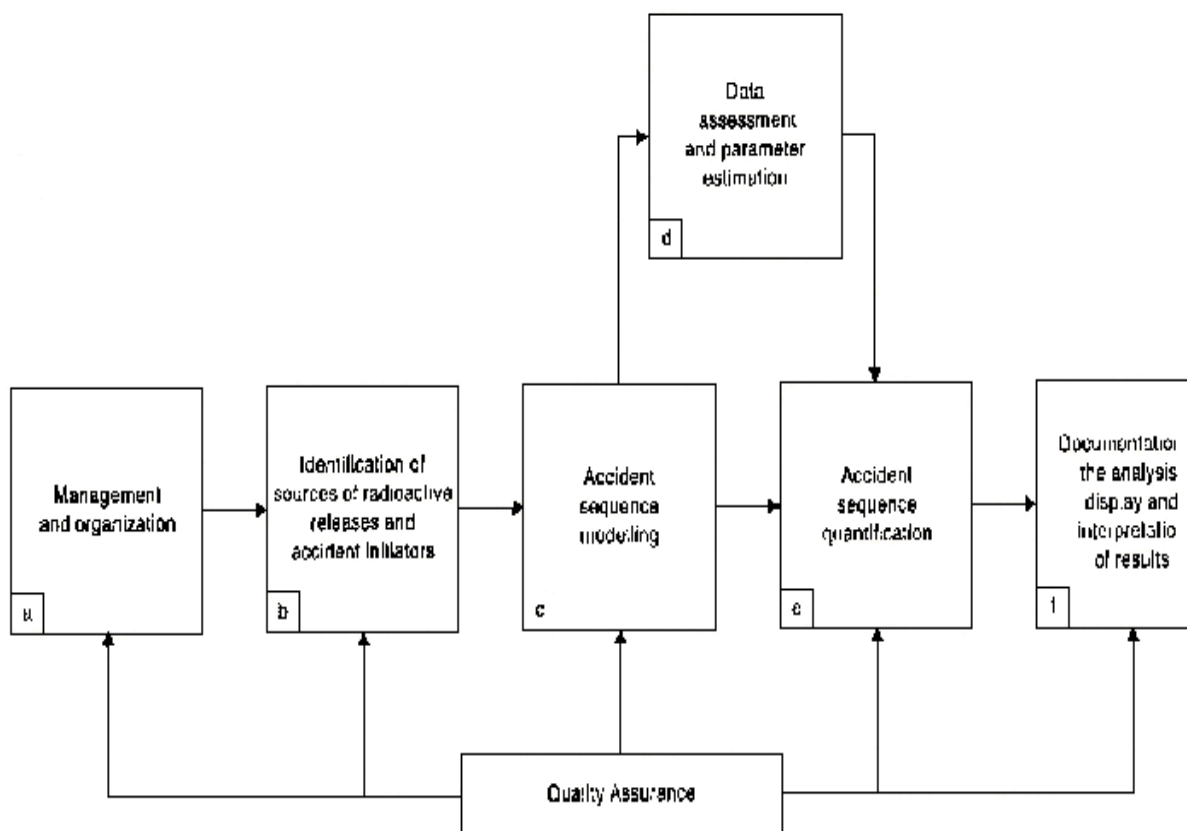


Σχήμα 17 Overall Procedure of PSA (Joo Ha, access 2014)

Αναλυτικά τα τρία επίπεδα περιγράφονται ως εξής:

1. **Πρώτο Επίπεδο - Quality assurance: Διαχείριση-Οργάνωση, η εκτίμηση της αξιοπιστίας του συστήματος, η μοντελοποίηση της ακολουθίας ατυχημάτων, η αξιολόγηση των δεδομένων και η εκτίμηση των παραμέτρων, η προσπάθεια για ποσοτικοποίηση της ακολουθίας των ατυχημάτων καθώς και η τεκμηρίωση της ανάλυσης.** Σε αυτά περιλαμβάνονται: ο καθορισμός των στόχων, ο σκοπός και το πεδίο εφαρμογής της PSA, η επιλογή των μεθόδων και των διαδικασιών που θα ακολουθηθούν, η επιλογή του προσωπικού και της οργάνωσης της ομάδας, η κατάρτιση της ομάδας, η προετοιμασία ενός χρονοδιαγράμματος για την εφαρμογή της PSA, η εκτίμηση και η εξασφάλιση των αναγκαίων κεφαλαίων και η διασφάλιση της ποιότητας και της αξιολόγησης από ειδικούς, οι πιθανές πηγές διαρροής ραδιενέργειας, οι διάφορες καταστάσεις (πίεσης, θερμοκρασίας κλπ) της εγκατάστασης, οι λειτουργίες ασφάλειας της εγκατάστασης, οι πρωταρχικές αφορμές-αιτίες για την έναρξη του ατυχήματος, η σχέση μεταξύ των εναρκτήριων γεγονότων, των λειτουργιών ασφάλειας και του συνολικού συστήματος και η εξοικείωση με τις λεπτομέρειες της εγκατάστασης, η κατασκευή μοντέλου που προσομοιάζει το ατύχημα στην κατασκευή και η απόκριση της εγκατάστασης, οι απαραίτητες πληροφορίες για την ποσοτικοποίηση του μοντέλου, οι συχνότητες των αρχικών γεγονότων, οι πιθανότητες ανθρώπινων λαθών, οι μη διαθέσιμες συνιστώσες της μελέτης, η εκτίμηση της συχνότητας μίας ακολουθίας

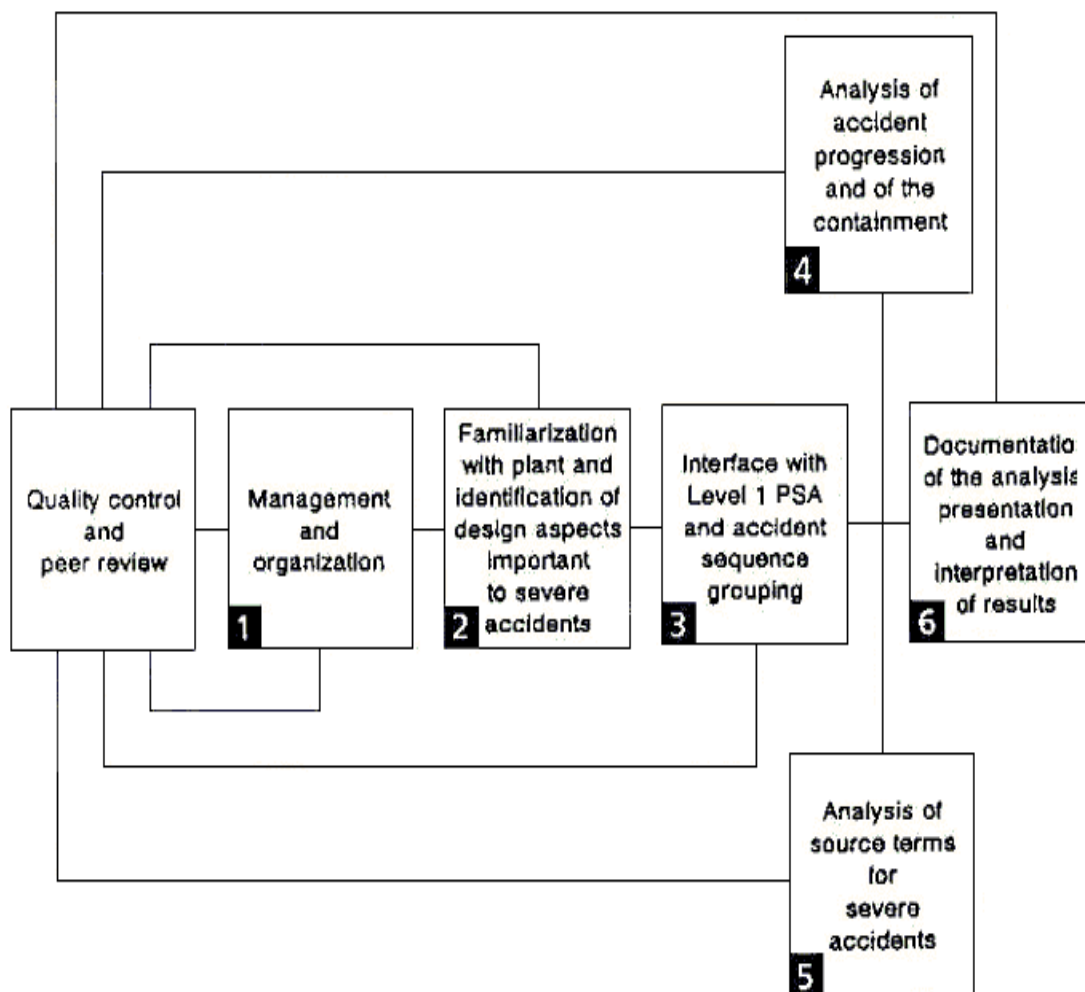
ατυχήματος, η ευαισθησία, η σημαντικότητα και η αβεβαιότητα στα διάφορα στάδια της ακολουθίας ενός ατυχήματος. Αναλυτικά, το **επίπεδο 1** της μελέτης PSA φαίνεται στο Σχήμα 18:



Σχήμα 18 Six major steps of Level 1 PSA (Jae-Joo Ha, access 2014)

2. Δεύτερο επίπεδο - Quality Control and peer review: Διαχείριση-Οργάνωση, χρήση ποσοτικοποιημένων μεγεθών από το επίπεδο 1 για την καταστροφή της εγκατάστασης, κατασκευή δέντρου γεγονότων για τους περιορισμούς της κατασκευής, τελικός χαρακτηρισμός της πηγής του ατυχήματος μέσω του μοντέλου ανεπάρκειας της κατασκευής, ανάλυση του ατυχήματος από ειδικούς επιστήμονες. Με το δεύτερο επίπεδο επιτυγχάνεται η ανάδειξη των ευπαθών μερών του συστήματος και γίνεται εκτίμηση της ασφάλειας του συστήματος. Το δεύτερο επίπεδο εξαρτάται ιδιαίτερα από την αξιοπιστία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο πρώτο επίπεδο. Τέλος, με το επίπεδο 2, παρέχεται μία βάση για τη διαχείριση των ατυχημάτων των εγκαταστάσεων, η αξιολόγηση περιορισμού της επέκτασης του κινδύνου, η ιεράρχηση των ερευνητικών δραστηριοτήτων για την ελαχιστοποίηση των σημαντικών αβεβαιοτήτων του συστήματος, ενώ αποτελεί τη βάση για το επίπεδο 3 της μεθόδου PSA, αφού γίνεται ο πρώτος υπολογισμός της έκλυσης ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Να σημειωθεί ότι στο επίπεδο 2 συνδυάζονται όλων των ειδών οι παράγοντες για την αξιοπιστία του συστήματος: φυσικές, χημικές, πυρηνικές, μηχανολογικές καθώς κι ο

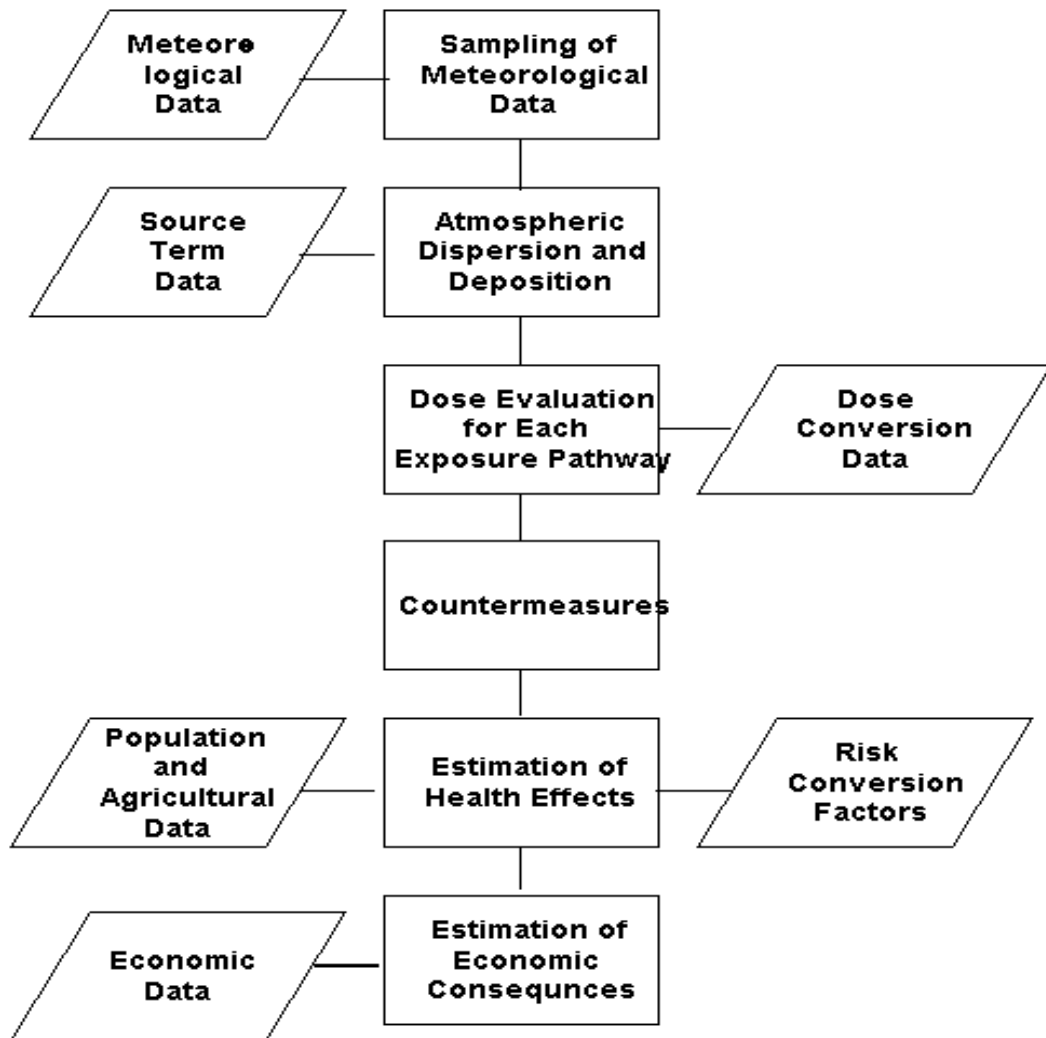
ανθρώπινος παράγοντας. Αναλυτικά, το **επίπεδο 2** της μελέτης PSA φαίνεται στο Σχήμα 19:



Σχήμα 19 Major Procedural Steps for a Level 2 PSA (Jae-Joo Ha, access 2014)

- Επίπεδο 3-Public risk assessment:** Η εκτίμηση των επιπτώσεων εκτός της περιοχής του ατυχήματος που οδηγεί, σε συνδυασμό με το αποτέλεσμα της ανάλυσης του επιπέδου 2, στις εκτιμήσεις των δημόσιων κινδύνων: Περιλαμβάνονται οι άμεσοι και ύστεροι θάνατοι και τραυματισμοί, οι γενετικές ανωμαλίες στον πληθυσμό, η μόλυνση του περιβάλλοντος, καθώς επίσης και οι οικονομικές επιπτώσεις. Για την ανάπτυξη του επιπέδου 3, είναι απαραίτητα τα στοιχεία από το επίπεδο 2 έτσι ώστε να εκτιμηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η έκλυση ραδιενέργειας και οι επιπτώσεις που θα επιφέρει. Βασικά χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι το ύψος, το μέγεθος, η χρονική διάρκεια, η χρονική διάρκεια προειδοποίησης, ο χρόνος εμφάνισης μετά το ατύχημα του ραδιενεργού σύννεφου καθώς και η ενέργειά του. Χαρακτηριστικό τέλος, της ραδιενεργούς έκλυσης είναι και η παλαιότερες προβλέψεις συχνότητας εμφάνισης μετά από ατύχημα, οι οποίες κατά τη διάρκεια της μελέτης αναθεωρούνται. Στο τρίτο στάδιο χρησιμοποιούνται τα

δέντρα γεγονότων τα οποία αναφέρονται παρακάτω. Αναλυτικά, το **επίπεδο 3** της μελέτης PSA φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα:



Σχήμα 20 Major steps of Level 3 PSA (Joo Ha, access 2014)

Με τη μέθοδο PSA επιτυγχάνονται τα εξής:

- Η απόκτηση μεγάλου όγκου πληροφορίας σχετικά με την κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας.
- Προσδιορίζονται τα αρχικά γεγονότα (initiating events) και οι καταστάσεις βλάβης στον αντιδραστήρα.
- Γίνεται μοντελοποίηση της εγκατάστασης με χρήση δέντρων σφαλμάτων (fault trees) και δέντρων γεγονότων (event trees).
- Η εκτίμηση της σχέσης μεταξύ των γεγονότων και του ανθρώπινου παράγοντα.
- Η ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων σχετικά με την αξιοπιστία των συστημάτων και των τμημάτων ενός συγκεκριμένου αντιδραστήρα.

- Η συστηματοποίηση και η παραμετροποίηση όλης της διαδικασίας παραγωγής πυρηνικής ενέργειας.
- Η δημιουργία μοντέλων που μπορεί να οδηγήσουν και σε αλλαγή του τρόπου λειτουργίας και κατασκευής ενός αντιδραστήρα.

## 2.7 Αβεβαιότητα της Μεθόδου

**Η αβεβαιότητα της μεθόδου PSA χαρακτηρίζεται ως επιστημονική - συστηματική αβεβαιότητα.** Η αβεβαιότητα της μεθόδου οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- Στην έλλειψη ολοκληρωμένων δεδομένων σχετικά με την υπό εξέταση περιοχή. Είναι αδύνατο να αποδειχθεί η πληρότητα της μεθόδου PSA, ακόμη και όταν το πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης έχει επεκταθεί σε τόσο μεγάλο αριθμό καταστάσεων όσο το δυνατόν - ιδίως όσον αφορά διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του πυρηνικού αντιδραστήρα και των πιθανών αρχικών γεγονότων.
- Στα όχι ιδιαίτερα ακριβή δεδομένα. Για παράδειγμα, τα δεδομένα που αφορούν τη συχνότητα των σπάνιων αρχικών γεγονότων και την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα δεν είναι πάντα πλήρη και σαφή,
- Στο πρόβλημα ότι είναι δύσκολη η μοντελοποίηση για υποθέσεις που δεν είναι δυνατόν να ποσοτικοποιηθούν. Για παράδειγμα, η αντίσταση ορισμένων τμημάτων της κατασκευής σε κατάσταση ατυχήματος, η ανθρώπινη δράση και συμπεριφορά.

## 2.8 Event Tree Analysis

Το κύριο εργαλείο που σχετίζεται άμεσα με τη μέθοδο PSA και χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας για την παραγωγή σεναρίων με έμφαση στις συνέπειες, για πρόσκρουση και προσάραξη πλοίων τύπου tanker, με πυρηνική πρόωση, είναι **η μέθοδος της ανάλυσης με δέντρα γεγονότων, Event Tree Analysis (ETA)**. Αναγκαίο κι απαραίτητο, λοιπόν, είναι η παρουσίαση των δέντρων γεγονότων και μερικά παραδείγματα εφαρμογής της.

Η ανάλυση μέσω δέντρων γεγονότων (Event Tree Analysis-ETA) είναι μία **τεχνική για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση μίας χρονικής σειράς πιθανών γεγονότων**, σε ένα δυνητικό σενάριο ατυχήματος, κατόπιν κάποιου πραγματικού γεγονότος, το οποίο χαρακτηρίζεται ως αρχικό γεγονός. Η αλληλουχία των γεγονότων που οδηγεί στις δυνητικές συνέπειες του ατυχήματος ονομάζεται δέντρο γεγονότων.

Η βασική αρχή λειτουργίας των δένδρων γεγονότων και της ETA είναι **η σκέψη προς τα εμπρός ή λογική προς τα εμπρός**, δηλαδή η λογική επεξεργασία μιας σειράς γεγονότων με βάση τη χρονική τους προτεραιότητα ξεκινώντας από το παλαιότερο γεγονός. Η αρχή βάσει της οποίας «χτίζεται» η ETA, είναι η δυαδική απόκριση σε

κάθε γεγονός το οποίο εξεταζόμενο αλληλοδιαδόχως προκύπτει. Έτσι, προκύπτει μία αλληλουχία πιθανών γεγονότων που το καθένα οδηγεί σε μία νέα αλληλουχία κοκ, με τις τελικές συνέπειες να είναι το τέλος κάθε διαφορετικής ακολουθίας γεγονότων. Στόχος αυτής της μεθόδου είναι να καθοριστεί εάν το αρχικό συμβάν μπορεί μέσω των συστημάτων ασφαλείας του συστήματος να αποφευχθεί ή θα οδηγήσει σε μία αλληλουχία γεγονότων τέτοια που θα επιφέρει συνέπειες στην κατασκευή, σοβαρές η μη. Έτσι, αυτή η τεχνική δίνει τη πιθανότητα ή συχνότητα ενός ατυχήματος να προκαλέσει προβλήματα προκαθορισμένων κατηγοριών, σε σχέση με τις ασφαλιστικές δικλείδες που υπάρχουν στο εξεταζόμενο σύστημα – δηλαδή διατάξεις και ενέργειες που έχουν ως στόχο τον περιορισμό ή την αποκλιμάκωση των συνεπειών, αφού καταγραφεί το ανεπιθύμητο γεγονός. Άρα στην ουσία μελετάται η πιθανότητα επιτυχίας ή αποτυχίας των προαναφερόμενων ασφαλιστικών διατάξεων και ενεργειών.

Ανάλογα με την σχετική εξέλιξη προκύπτουν, όπως ειπώθηκε, διάφορες συνέπειες που χαρακτηρίζονται από διαφορετικό βαθμό έκτασης και σοβαρότητας. Είναι λογικό λοιπόν να υποστηριχθεί ότι η μεθοδολογία των δέντρων γεγονότων μπορεί να ενταχθεί στα όρια της ανάλυσης συνεπειών, αφού προσεγγίζει την αποτίμηση της συχνότητας για την εμφάνιση πιθανών σεναρίων για ατυχήματα, τα οποία μπορούν να αναπτυχθούν από τον επιλεγμένο κίνδυνο. Συνεπώς, το δίκτυο γεγονότων προσδιορίζει ένα κατάλληλο σετ γεγονότων που γίνονται κυρίαρχα κατά την εξέλιξη ενός σεναρίου εκτάκτου ανάγκης. Τελικός σκοπός της ETA θεωρείται η εκτίμηση όλων των πιθανών συνεπειών που μπορεί να προκύψουν από το αρχικό γεγονός.

Μέσω κατάταξης ή βαθμολόγησης των ατυχημάτων, ή μέσω μιας διαδοχικής ποσοτικής αποτίμησης-εάν είναι γνωστές οι πιθανότητες του εκάστοτε συμβάντος, καθορίζονται τα πλέον σημαντικά ατυχήματα.

Η μέθοδος εφαρμόζεται σε φυσικά συστήματα που είτε υπάρχει είτε δεν υπάρχει εμπλοκή ανθρώπινου παράγοντα, καθώς και σε συστήματα λήψης αποφάσεων. Επίσης, χρησιμοποιείται και συμπληρωματικά- συγκριτικά σε σχέση με άλλες μεθόδους, όπως είναι τα δέντρα σφαλμάτων, και τα μοντέλα καταστροφής και ανάλυσης επιπτώσεων.

Τα δένδρα γεγονότων είναι μία εγνωσμένη μέθοδος στην ανάλυση ασφάλειας. Αξιοσημείωτη εργασία είναι, η μελέτη WASH-1400, γύρω στο 1975, για την ασφάλεια ασφάλειας ενός πυρηνικού σταθμού, μέσω της οποίας ξεκίνησε να αναπτύσσεται η ETA. Τα τελευταία έτη πρόσφατα γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη της μεθόδου στη ναυτιλιακή βιομηχανία (με έμφαση στη μελέτη των συνεπειών από τα ναυτικά ατυχήματα, ενώ ήδη χρησιμοποιείται στην πυρηνική βιομηχανία, στην αεροπορική και αλλού.

## **2.9 Περιγραφή της μεθόδου ETA**

Όπως επεξηγήθηκε, τα δένδρα γεγονότων είναι μία συστηματική προσέγγιση-διάγραμμα που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των επιπτώσεων ενός ατυχήματος, μίας αστοχίας ή γενικότερα ενός ανεπιθύμητου γεγονότος.

Η μέθοδος ETA στηρίζεται στα παρακάτω:

**Σενάριο Ατυχήματος:** Μία σειρά από γεγονότα που καταλήγει σε ατύχημα. Η σειρά ξεκινάει από το αρχικό συμβάν ή γεγονός και ακολουθείται από μία διαδοχική αλληλουχία πιθανών-πilotικών γεγονότων που οδηγούν στην τελική κατάσταση, που είναι οι συνέπειες του ατυχήματος.

**Αρχικό γεγονός:** Μία παράλειψη ή κάποια ανεπιθύμητη ενέργεια που σηματοδοτεί την αρχή της σειράς των γεγονότων. Το αρχικό συμβάν μπορεί να οδηγήσει σε ατύχημα ανάλογα με την ενεργοποίηση ή όχι των δικλείδων ασφαλείας του συστήματος.

**Καίρια / Διακριτά γεγονότα:** Αποτελούν τα ενδιάμεσα γεγονότα μεταξύ του αρχικού συμβάντος και της τελικής ατυχίας. Είναι τα γεγονότα επιτυχίας ή αποτυχίας των μεθόδων σχεδιασμού και ασφάλειας ενός συστήματος, που δημιουργήθηκαν έτσι ώστε να αποτρέπεται το ενδεχόμενο ατυχήματος κατόπιν του αρχικού συμβάντος. Το ενδιάμεσο γεγονός μπορεί να είναι είτε επιτυχές είτε όχι, ανάλογα με το εάν λειτουργεί επιτυχώς ως προς την παύση του σεναρίου ατυχήματος ή όχι.

**Πιθανολογική εκτίμηση κινδύνων ( Propabilistic Risk Assessment-PRA):** Περιεκτική, δομημένη και λογική μέθοδος ανάλυσης για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των κινδύνων σε ένα πολύπλοκο τεχνολογικό σύστημα. Ο λεπτομερής προσδιορισμός και η αξιολόγηση των σεναρίων ατυχημάτων, με ποσοτική ανάλυση, είναι ο στόχος της PRA. Ταυτίζεται με την PSA που περιγράφηκε πιο πάνω.

**Δέντρο γεγονότων:** Η γραφική αναπαράσταση του λογικού μοντέλου που προσδιορίζει και ποσοτικοποιεί πιθανές εκβάσεις που προκύπτουν από την ανάπτυξη ενός σεναρίου ατυχημάτων, με αρχικό συμβάν και ενδιάμεσα γεγονότα.

Καθίσταται σαφές ότι η **μέθοδος ETA καλεί το μελετητή στον προσδιορισμό του αρχικού γεγονότος/συμβάντος**, βάσει του οποίου θα προχωρήσει στον προσδιορισμό των πιθανών εκβάσεων. Το αρχικό γεγονός αποτελεί μία ανεπιθύμητη διαταραχή της ομαλής λειτουργίας ενός συστήματος για το οποίο απαιτείται κάποιο είδος απάντησης από τους φορείς διαχείρισης του συστήματος, έτσι ώστε να αποφεύγεται κάθε περαιτέρω ανεπιθύμητη ενέργεια.

Κατόπιν, αναπτύσσονται τα ενδιάμεσα/καίρια γεγονότα που αποτελούν τους κόμβους ενός δέντρου γεγονότων, με **απάντηση δυαδικού τύπου**, πχ : ΝΑΙ ή ΟΧΙ, ΕΠΙΤΥΧΙΑ ή ΑΠΟΤΥΧΙΑ, ΕΚΤΕΛΕΣΗ ή ΜΗ ΕΚΤΕΛΕΣΗ κοκ.

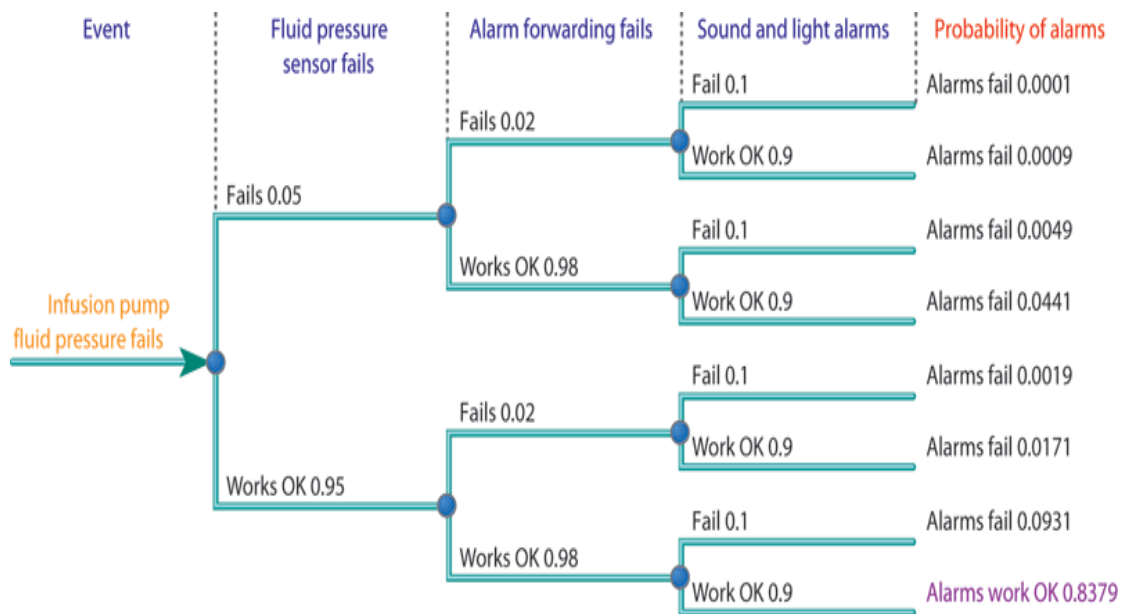
Η συνήθης πρακτική συσχετίζει τα δένδρα με τεχνικά ζητήματα, αλλά η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν αποκλείει και την ενσωμάτωση ανθρωπίνων

ενεργειών και συμπεριφορών. Γενικά, η προσέγγιση της ETA περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Ορισμός του συστήματος (καθορισμός ορίων συστήματος, υποσυστημάτων και διεπαφών)
2. Προσδιορισμός σεναρίων ατυχήματος μέσω αξιολόγησης του συστημάτων ή ανάλυσης κινδύνων για τον προσδιορισμό των κινδύνων του συστήματος
3. Προσδιορισμός αρχικού συμβάντος
4. Προσδιορισμός των καίριων γεγονότων
5. Σχεδιασμός του δέντρου
6. Απόκτηση/υπολογισμός της πιθανότητας αποτυχίας κάθε γεγονότος
7. Προσδιορισμός του εκάστοτε αποτελέσματος
8. Αξιολόγηση του κάθε ρίσκου
9. Πρόταση διορθωτικών ενεργειών
10. Δημιουργία εγγράφου ETA στο οποίο θα υπάρχουν τα διαγράμματα/σχέδια

Η πιθανότητα εκδήλωσης μίας συνέπειας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των πιθανοτήτων των επί μέρους γεγονότων μεταξύ τους και με την πιθανότητα εκδήλωσης του αρχικού συμβάντος. Η πιθανότητα του αρχικού συμβάντος θεωρείται ότι είναι η μονάδα.

Στο Σχήμα 21 φαίνεται καθαρά ο τρόπος υπολογισμού των πιθανοτήτων της εκάστοτε συνέπειας από ένα δέντρο γεγονότων:



Σχήμα 21 Event Tree example with calculation of probabilities (Kalinsky, 2005)

## 2.10 Εφαρμογή της μεθόδου ETA σε πυρηνικό ατύχημα

Το πρώτο το οποίο θα πρέπει να συγκεκριμενοποιήσουμε είναι το αρχικό γεγονός. Έχουμε υπόψη ότι το αρχικό γεγονός είναι ένα συμβάν το οποίο αν λειτουργήσουν όλες οι ασφαλιστικές δικλείδες δεν υπάρχει περίπτωση να εξελιχθεί σε ατύχημα. Από εκεί κι έπειτα ακολουθεί η αλληλουχία των γεγονότων μέχρι τις τελικές συνέπειες.



Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γνωρίζουμε καλά τους κινδύνους αλλά και τις αιτίες που τους προκαλούν.

Γενικά οι κίνδυνοι (hazards) αστοχίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα οφείλονται στα εξής:

- Τσουνάμι
- Αεροπορική επίθεση με βομβαρδισμό-τρομοκρατία
- Πλημμύρα
- Πυρκαγιά
- Γήρανση υλικών
- Διακοπή ρεύματος για οποιοδήποτε λόγο
- Διάβρωση σωλήνων μεταφοράς ψυκτικού υγρού
- Αστοχία στον αμοστρόβιλο
- Δυσλειτουργία στο σύστημα μεταφοράς ατμού
- Σεισμός

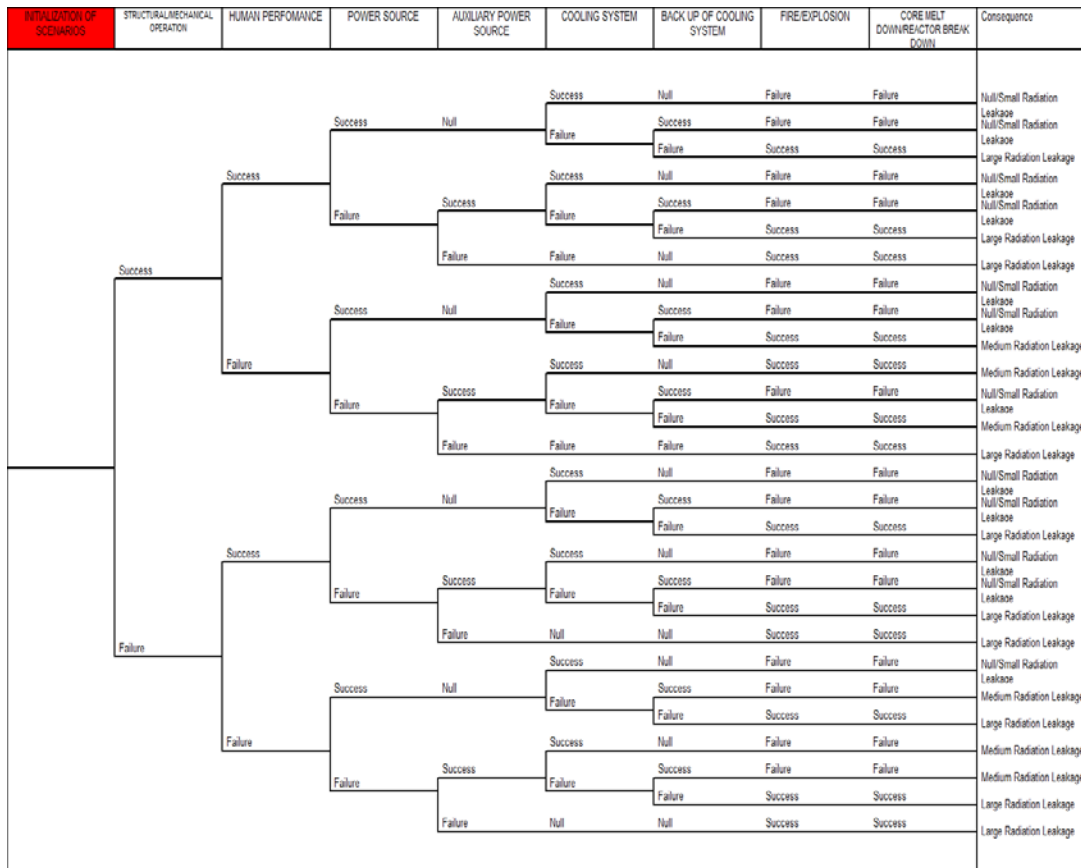
Αυτοί οι περιγραφέντες παράγοντες οδηγούν σε κινδύνους κι αυξάνουν την πιθανότητες ενός αρχικού γεγονότος.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας για την παραγωγή σεναρίων όσον αφορά τη σύγκρουση και την προσάραξη πλοίων που χρησιμοποιούν προωστήρια εγκατάσταση με πυρηνικό αντιδραστήρα, εξετάστηκε και κατασκευάστηκε ένα δέντρο γεγονότων που αφορά σενάριο πυρηνικού ατυχήματος σε σταθμό παραγωγής ισχύος. Θεωρήσαμε ως αρχικό γεγονός το οτιδήποτε θα μπορούσε να διαταράξει την ομαλή λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα. Ως συνέπειες, ελήφθησαν υπόψη αυτές που αφορούν την έκλυση ραδιενέργειας και που είναι οι παρακάτω:

- No radiation leakage
- Minor radiation leakage
- Significant/Major radiation leakage

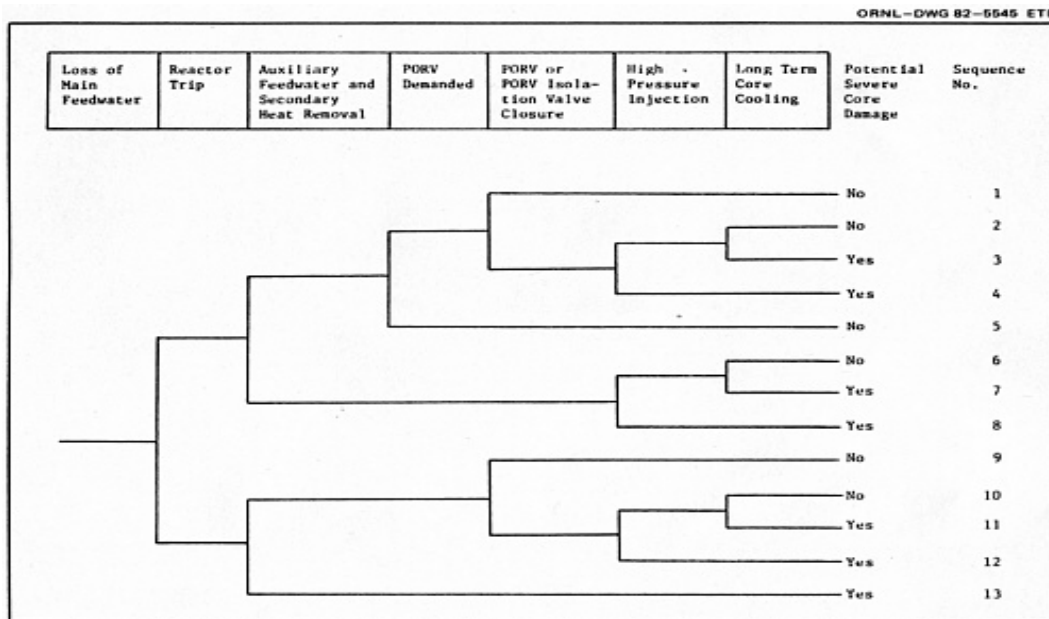
Κατόπιν, κατασκευάστηκε το δέντρο γεγονότων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα, 22, στο Εργαστήριο Θαλασσιών Μεταφορών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας, ωστόσο, είναι η παραγωγή σεναρίων για πλοία που χρησιμοποιούν πυρηνική πρόωση, για αυτό και το συγκεκριμένο δέντρο γεγονότων δεν αποτελεί, ενδεχομένως και το πλέον αντιπροσωπευτικό για ένα πυρηνικό ατύχημα σε πυρηνικό σταθμό ισχύος, είναι, όμως, μία προσπάθεια αποτύπωσης απαραίτητη κατά τη διάρκεια της έρευνας.



Σχήμα 22 Event Tree for an hypothetical accident on a nuclear power station (Παρούσα εργασία)

Τέλος, στο παρακάτω Σχήμα, 23, φαίνεται ένα δέντρο γεγονότων με αρχικό γεγονός το ατύχημα LOCA και συγκεκριμένα με την απώλεια του ψυκτικού νερού, που όπως περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο αποτελεί ένα από τα πλέον σημαντικότερα ατυχήματα που μπορεί να συμβεί σε μία πυρηνική εγκατάσταση.



Σχήμα 23 Standard event tree for loss of main feed water in a PWR. (Minarick et al., 1982)

## 2.11 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα της Μεθόδου ETA

Ως πλεονεκτήματα της μεθόδου ανάλυσης με δέντρα γεγονότων μπορούν να θεωρηθούν τα παρακάτω:

- Τα τελικά γεγονότα δεν είναι απαραίτητο να προβλεφθούν.
- Δύνανται να αναλυθούν πολλαπλές αστοχίες.
- Είναι δυνατόν να καθοριστούν πιθανές μονές αστοχίες.
- Καθορίζονται τα αδύναμα σημεία του συστήματος.
- Μπορούν να απορριφθούν μηδενικές επιλογές.
- Η όλη προσέγγιση γίνεται με την βοήθεια εξαιρετικών υπολογιστικών συστημάτων και είναι εύκολη στη μάθηση και στην πρακτική.

Ως μειονεκτήματα θεωρούνται τα εξής:

- Μπορεί να έχει μόνο ένα αρχικό γεγονός, οπότε χρειάζεται πολλαπλή ανάλυση με δέντρα για να μετρηθεί η πιθανότητα που αφορά τη δημιουργία ατυχημάτων από πολλά αρχικά γεγονότα.
- Κάποιες λεπτομέρειες του συστήματος ενδεχομένως και να παραβλέπονται μέσω της ανάλυσης ETA.
- Δεν είναι διακριτή η μερική επιτυχία ή αποτυχία ενός γεγονότος καθώς οι απαντήσεις είναι δυαδικού τύπου.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσης διπλωματικής, θα παρατεθούν τα δέντρα γεγονότων που αφορούν τα σενάρια της σύγκρουσης και της προσάραξης πλοίων με πυρηνική πρόωση.

Καταλήγοντας, τα δέντρα γεγονότων είναι ένας **εύχρηστος τρόπος για την παραγωγή σεναρίων ατυχήματος** κι έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι μπορούν να ποσοτικοποιήσουν τις διάφορες παραμέτρους που δυνητικά προκαλούν ατύχημα. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον και στην ανάλυση πυρηνικών ατυχημάτων αλλά και στην ανάλυση ναυτικών ατυχημάτων και προϋποθέτουν ειδικές γνώσεις για το εκάστοτε μελετώμενο σύστημα. Δεν αποτελούν όπως φάνηκε από τα μειονεκτήματα που παρατέθηκαν παραπάνω την απόλυτη οδό για την εκτίμηση της ασφάλειας, αλλά είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των ειδικών αναλυτών για να προβλέψουν τυχόν αστοχίες και να σχεδιάσουν καλύτερα ένα νέο σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη, βέβαια, κάθε φορά και τις κατάλληλες ειδικές παραμέτρους.

## 2.12 Βιβλιογραφία 2<sup>ο</sup> κεφαλαίου

### Ξένη Βιβλιογραφία

- ✚ Armen Der Kiureghiana, Ove Ditlevsen, *Aleatory or epistemic? Does it matter?*, Structural Safety, Volume 31, Issue 2, March 2009, Pages 105–112
- ✚ Bagian P. James et al, «Accident Precursor Analysis and Management: Reducing Technological Risk through Diligence», Washington D.C., July 2003

- ✚ Jae-Joo Ha, «Probabilistic Safety Assessment (PSA), Korea, Access March 2014
- ✚ Kalinsky David, «Architecture of safety – critical systems», D. Kalinsky Associates, August 2005
- ✚ Nitesh M. Dongare, «Fault and Event Trees Analysis», Presentation, India, April 2012

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

- ✚ Βούρος Δημήτριος, «Εκτίμηση και Αποδοχή Ρίσκου, Τεύχος Α΄: Αποτίμηση Ρίσκου με εφαρμογή στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, Ιούλιος 2007
- ✚ Γιαννόπουλος Ιωάννης, «Εκτίμηση και Αξιολόγηση κοινωνικού ρίσκου στη ναυτιλία», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, Ιανουάριος 2010
- ✚ Τζατζάκης Στέφανος, «Ανάλυση σεναρίων - ρίσκου για τη μελέτη της ασφάλειας –Εφαρμογή στην αεροπορική βιομηχανία», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2009

#### Διαλέξεις / Σεμινάρια / Συνέδρια

- ✚ «Probabilistic Safety Assessment: An analytical tool for assessing Nuclear Safety », International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, Puerto Rico, USA, June 2002
- ✚ «Basics of Nuclear Plant Probabilistic Risk Assessment», A Collaboration of U.S. NRC Office of Nuclear Regulatory Research (RES) & Electric Power ResearchInstitute (EPRI), Fire PRA Workshop, San Diego CA and Jacksonville FL, 2011

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# 3

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

### 3.1 Εισαγωγή

Η ναυτική ασφάλεια αποτελεί μέγιστη προτεραιότητα για τη ναυτιλιακή κοινότητα σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο πλαίσιο, λοιπόν, της μελέτης των σεναρίων για τα ναυτικά ατυχήματα της σύγκρουσης και της προσάραξης ενός πλοίου με σύστημα πυρηνικής πρόωσης, δέον είναι να εξεταστεί, αρχικά, τι είναι το ναυτικό ατύχημα, ποια τα είδη των ναυτικών ατυχημάτων, ποιες αιτίες τα προκαλούν, ποιες είναι οι συνέπειές τους καθώς και ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα σύγκρουσης και προσάραξης πλοίων. Επίσης, εξετάζεται η μέθοδος FSA για την εκτίμηση της ασφάλειας από τα ναυτικά ατυχήματα.

### 3.2 Ναυτικά ατυχήματα. Είδη, βασικά χαρακτηριστικά

Ως ναυτικό ατύχημα, θεωρείται κάθε συμβάν που επιφέρει δυσμενείς συνέπειες στην ασφάλεια του πλοίου, στη ζωή των επιβαινόντων, στην αξία του φορτίου και στο θαλάσσιο περιβάλλον. Βάσει της Ευρωπαϊκής οδηγίας, που εκδόθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διερεύνηση των ατυχημάτων στον τομέα των θαλασσίων μεταφορών που ισχύει από το 2011, ως ναυτικό ατύχημα ορίζεται το γεγονός ή η σειρά γεγονότων που συνέβησαν σε σχέση με την λειτουργία ενός πλοίου και είχε σαν συνέπεια : τον θάνατο, σοβαρό τραυματισμό ή απώλεια προσώπου, την απώλεια ή εγκατάλειψη πλοίου, την προσάραξη ή την ακινητοποίηση, την εμπλοκή σε σύγκρουση, την κατασκευαστική, μηχανολογική ή άλλη υλική βλάβη ή ζημιά στο πλοίο, την ζημιά σε ναυτική υποδομή και ζημιά στο περιβάλλον.

Ένας επιστημονικός ορισμός για το τι είναι ναυτικό ατύχημα είναι ο εξής: **«Ατύχημα είναι ένα ανεπιθύμητο γεγονός που προκαλεί προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, σε περιούσιες τρίτων και στην ποιότητα του περιβάλλοντος...»**(IMO, 2000, Harms-Ringdahl, 2001, Βεντικός, 2002, 2004). Το ναυτικό ατύχημα παρουσιάζεται και εξετάζεται ανάλογα, με τα αίτια που το προκαλούν, τις συνθήκες κάτω από τις οποίες επήλθε και τις συνέπειες που προκάλεσε. Τα ατυχήματα διαχωρίζονται γενικά στις εξής κατηγορίες (Βεντικός 2002, 2004):

#### → Ατυχήματα με άμεση συνέπεια:

Σε αυτή τη κατηγορία των ατυχημάτων οι συνέπειες είναι μετρήσιμες, όπως π.χ. οι θάνατοι που οφείλονται σε μια έκρηξη, ή η ποσότητα πετρελαίου που διαρρέει στην θάλασσα μετά από την προσάραξη ενός δεξαμενόπλοιου.

→ **Ατυχήματα με αυξημένη πιθανότητα τραυματισμού ή ζημιών:**

Σε αυτή την κατηγορία οι συνέπειες είναι έμμεσες αλλά μετρήσιμες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα προβλήματα υγείας που εκδηλώνουν τα μέλη των αντιρρυπαντικών ομάδων σαν αποτέλεσμα της εισπνοής και επαφής τους με το πετρέλαιο που διέρρευσε στη θάλασσα μετά από μια έκρηξη σε ένα δεξαμενόπλοιο.

→ **Ατυχήματα που χαρακτηρίζονται από αργή επιδείνωση και κατάρρευση:**

Σε αυτές τις περιπτώσεις ατυχημάτων, τα αποτελέσματα καταγράφονται σε βάθος χρόνου., όπως π.χ. η επιδείνωση της κατάστασης του περιβάλλοντος στην ευρύτερη περιοχή των μεγάλων διυλιστηρίων.

→ **Σαμποτάζ:**

Μια αρνητική ενέργεια που έρχεται ως αποτέλεσμα συγκεκριμένης βούλησης.

Σε ό,τι αφορά τώρα τις θαλάσσιες μεταφορές τα αποκαλούμενα ναυτικά ατυχήματα ανήκουν στην συντριπτική τους πλειοψηφία στην πρώτη κατηγορία ενώ τα υπόλοιπα περιλαμβάνονται στη δεύτερη κατηγορία. Τα πυρηνικά ατυχήματα, που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, περιλαμβάνονται και στην πρώτη αλλά και στην τρίτη κατηγορία αφού εξακολουθούν να προκαλούν αρνητικές συνέπειες για μεγάλο χρονικό διάστημα από τη στιγμή που συμβαίνουν.

Η μεγάλη σημασία όμως των ναυτικών ατυχημάτων αλλά και οι συνέπειες που αυτά έχουν, είτε στον τομέα των ανθρώπινων απωλειών, είτε σε ποσότητες διαρρέοντος πετρελαίου, μας οδηγούν σε μια περαιτέρω διερευνήσει των ναυτικών ατυχημάτων αλλά και μια εξειδικευμένη κατηγοριοποίησή τους. Έτσι λοιπόν για τις περιπτώσεις ολικών ή τεκμαρτών απωλειών για πλοία ή φορτία, μπορούμε να διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες ναυτικών ατυχημάτων (Βεντικός, 2002, 2004):

1. **Hull Structural Failure:** Είναι τα ατυχήματα κατασκευαστικής αστοχίας και αστοχίας εξαρτημάτων και εξοπλισμού του πλοίου που δεν οφείλονται σε άλλα ναυτικά ατυχήματα. Έτσι, στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα ατυχήματα στα οποία παρατηρήθηκε ζημιά στη γάστρα του σκάφους, ζημιά στα παρελκόμενα του πηδαλίου, ζημιές των οποίων αιτία ήταν κυρίως οι καιρικές συνθήκες, ζημιές που οφείλονται κυρίως στην κακή φόρτωση και φόρτιση του σκάφους και περιπτώσεις στις οποίες είχαμε απώλεια ή αστοχία άγκυρας, αλυσίδας της άγκυρας, βαρούλκου, σωληνώσεων κλπ.
2. **Collision:** Είναι τα ατυχήματα σύγκρουσης. Στην περίπτωση αυτή τοποθετούνται τα ατυχήματα στα οποία είχαμε σύγκρουση πλοίου με άλλο πλοίο, ανεξαρτήτως τύπου ή μεγέθους και χωρίς περιορισμό για την κατάσταση που βρίσκονταν τα πλοία κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης (αγκυροβολημένα, εν πλω κλπ.).
3. **Contact:** Είναι τα ατυχήματα επαφής. Στην κατηγορία αυτή βρίσκονται τα ατυχήματα στα οποία είχαμε επαφή του σκάφους με σταθερό ή πλεύσιμο αντικείμενο, εκτός από πλοίο.

4. **Grounding:** Είναι τα ατυχήματα προσάραξης. Στην περίπτωση αυτή εντάσσονται τα ατυχήματα στα οποία είχαμε προσάραξη του πλοίου στην ξηρά, είτε χτύπημα του πυθμένα του πλοίου στον πυθμένα της θάλασσας ή σε κάποιο ναυάγιο.
5. **Fire & Explosion Incidents:** Είναι τα ατυχήματα φωτιάς και έκρηξης. Στη συγκεκριμένη κατηγορία ανήκουν ατυχήματα στα οποία παρατηρήθηκε φωτιά ή έκρηξη.
6. **Machinery Failure:** Είναι τα ατυχήματα μηχανικών αστοχιών. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε ατυχήματα στα οποία στο πλοίο παρατηρήθηκαν βλάβες στην κύρια μηχανή, στον στροφαλοφόρο άξονα, στον μηχανισμό του πεδαλίου, στις γεννήτριες, στην τουρμπίνα, στο σύστημα πλοήγησης κλπ.
7. **Unknown Reasons:** Είναι τα ατυχήματα αγνώστων αιτιών. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όσα ατυχήματα δεν εντάσσονται στις υπόλοιπες έξι κατηγορίες και για τα οποία οι πληροφορίες που έχουμε δεν επαρκούν για να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα για τα αίτια- συνθήκες αυτών.

Ο αριθμός και τα ποσοστά εμφάνισης της κάθε κατηγορίας ατυχημάτων, φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα βάσει στοιχείων για δεξαμενόπλοια από τα έτη 1980 έως και 2009 (Νομικός, 2012).

Πίνακας 3 Αριθμός και ποσοστό ναυτικών ατυχημάτων ανά κατηγορία βάσει της έρευνας σε ατυχήματα δεξαμενοπλοίων από 1980 έως το 2009 (Νομικός, 2012)

<u>Κατηγορίες Ατυχημάτων</u>	<u>Αριθμός</u>	<u>Ποσοστό (%)</u>
Hull Structural Failure	161	19,6
Collision	86	10,5
Contact	23	2,8
Grounding	112	13,6
Fire & Explosion	121	14,7
Machinery Failure	212	25,8
Unknown Reasons	107	13,0
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>822</b>	<b>100,0</b>



Όπως παρατηρούμε, το πιο συχνά εμφανιζόμενο ατύχημα είναι αυτό των μηχανικών αστοχιών, με αριθμό εμφανίσεων 212 και ποσοστό 25,8 %. Ακολουθούν τα ατυχήματα κατασκευαστικής αστοχίας και αστοχίας εξαρτημάτων και εξοπλισμού του πλοίου με 161 περιστατικά(19,6 %) και τα ατυχήματα φωτιάς - πυρκαγιάς με 121 εμφανίσεις (14,7 %). Στην τελευταία θέση βρίσκονται τα ατυχήματα επαφής, με 23 συνολικά περιστατικά και ποσοστό 2,8 %.

Σημειώνεται ότι η προσάραξη και η σύγκρουση είναι δυο βασικά είδη ναυτικών ατυχημάτων τα οποία συνδέονται άμεσα με τους κανόνες ασφαλούς ναυσιπλοΐας και ναυτικής ασφάλειας. Πρόκειται για χαρακτηριστικές περιπτώσεις ατυχημάτων δεξαμενόπλοιων που οδηγούν σε μικρές ή μεγάλες πετρελαϊκές ρυπάνσεις, με αποτέλεσμα να αποτελούν αντικείμενο αναφοράς και μελέτης από τους κανονισμούς 19 και 23 της Διεθνούς Σύμβασης MARPOL (Σωτήραλης, 2011). Η καταγραφή βυθίσεων καθώς και η πυρκαγιά και η έκρηξη, στα δεξαμενόπλοια, αποτελούν την αιτία δημιουργίας πετρελαιοκηλίδων αυξημένου δυναμικού που επιβαρύνουν σημαντικά το θαλάσσιο περιβάλλον. Τέλος, τα μηχανικά προβλήματα έχουν σαν συνέπεια την δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων όπως οι μερικές ή ολικές απώλειες των πλοίων ή των φορτίων τους.

### 3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τα ναυτικά ατυχήματα

Υπάρχουν πολλές κατηγοριοποιήσεις των αιτιών και των παραγόντων που προκαλούν ένα ναυτικό ατύχημα. Σύμφωνα με τη βάση DAMA του νορβηγικού νηογνώμονα DNV, οι αιτίες των ναυτικών ατυχημάτων κατηγοριοποιούνται ως εξής (Psaraftis et al, 1998):

**Κατηγορία Α** - Καταστάσεις που δεν συσχετίζονται με το πλοίο: πχ αιτία Α01-πολύ άσχημος καιρός, φυσικές καταστροφές κ.α., αιτία Α07-Λειτουργικό σφάλμα άλλου πλοίου (λανθασμένες μανούβρες κ.α.) και αιτία Α02-Ρεύματα, άνεμος κτλ που οδηγούν σε ισχυρή ολίσθηση ή σε άλλες δυσκολίες κινήσεων

**Κατηγορία Β** - Κατασκευή του πλοίου και θέση των μηχανημάτων σε αυτό: πχ αιτία Β01-Μη επαρκής δομική αντοχή του πλοίου και αιτία Β02-Εξασθένηση της δομικής αντοχής του πλοίου από μεταγενέστερες συγκολλήσεις σε αυτό, διάβρωση κ.α.

**Κατηγορία C** - Τεχνικές συνθήκες που αφορούν μηχανήματα πάνω στο πλοίο: πχ αιτία C09-Τεχνικό πρόβλημα του εξοπλισμού-μηχανημάτων

**Κατηγορία D** - Καταστάσεις που έχουν να κάνουν με την χρήση και τον σχεδιασμό των μηχανημάτων

**Κατηγορία E** - Φορτίο, ασφάλιση και συμπεριφορά φορτίου και καυσίμων: πχ αιτία E01-Αυτανάφλεξη φορτίου/καυσίμων

**Κατηγορία F** - *Επικοινωνίες, οργάνωση, διαδικασίες και ρουτίνες: πχ αιτία F04-Υπάρχουσες διαδικασίες για έλεγχο ασφαλείας γνωστές αλλά δεν ακολουθήθηκαν και αιτία F10-Αποτυχία των ρουτινών επιθεώρησης και συντήρησης πάνω στο πλοίο*

**Κατηγορία G** - *Μεμονωμένο πρόσωπο πάνω στο πλοίο, καταστάσεις, κρίση, αντιδράσεις: πχ αιτία G02-Ανεπαρκής πραγματική ικανότητα (εξάσκηση κ.α.), ακολουθούμενη, αιτία G07-Μη επαρκής παρατήρηση-εξακρίβωση της ίδιας θέσης/ μη σχεδιασμένη στους ναυτικούς χάρτες (13.8% του συνολικού) και αιτία G09 - Όχι καλή κρίση των κινήσεων του σκάφους μας (ρεύματα, άνεμος κ.α.) (11.2% του συνολικού).*

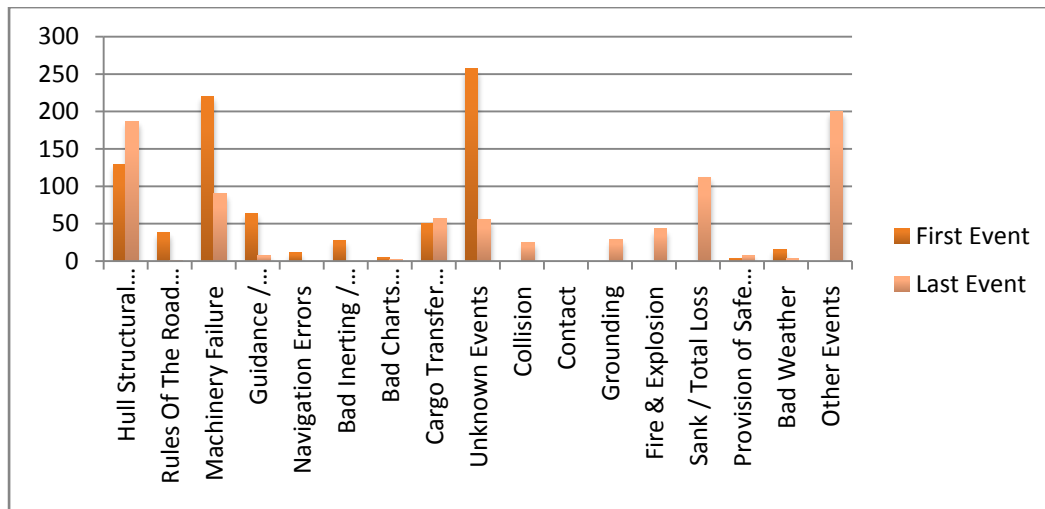
Σε μία στατιστική ανάλυση ενός ατυχήματος βάσει των γεγονότων που οδήγησαν σε αυτό, το πρώτο και το τελευταίο γεγονός αποτελούν σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ατύχημα. Το πρώτο γιατί αποτελεί το πιο κοντινό χρονικά γεγονός στην αιτία του ατυχήματος και το τελευταίο γιατί βρίσκεται χρονικά εγγύτερα στο αποτέλεσμα, επομένως, μπορεί εύκολα να εξηγήσει και το είδος των συνεπειών που προκαλούνται από το ατύχημα.

Μία σύγχρονη κατηγοριοποίηση γεγονότων που οδηγούν σε ναυτικό ατύχημα είναι η εξής:

**Πίνακας 4** Κατηγορίες γεγονότων που συνοδεύουν ένα ναυτικό ατύχημα (Νομικός, 2012)

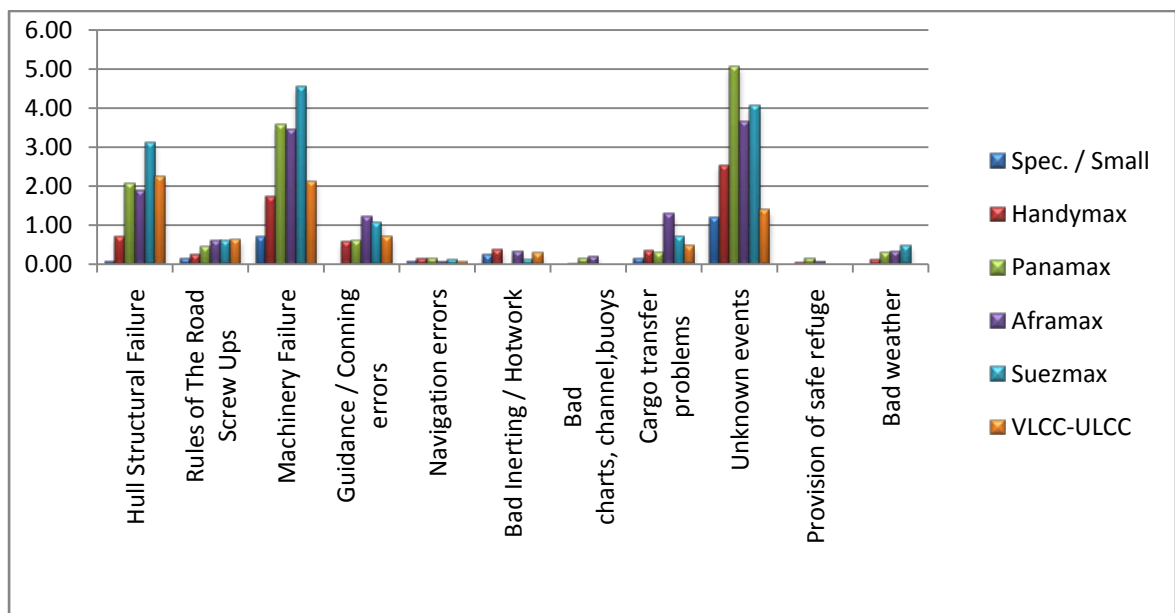
Hull Structural Failure
Rules Of The Road Screw Up
Machinery Failure
Guidance / Conning Errors
Navigation Errors
Bad Inerting / Hotwork
Bad Charts , Channel , Buoys
Cargo Transfer Problems
Unknown Events
Collision
Contact
Grounding
Fire & Explosion
Sank / Total Loss
Provision of Safe Refuge
Bad Weather
Other Events

Η κατανομή των πρώτων και των τελευταίων γεγονότων ανά τύπο ατυχήματος φαίνεται Σχήμα 24:

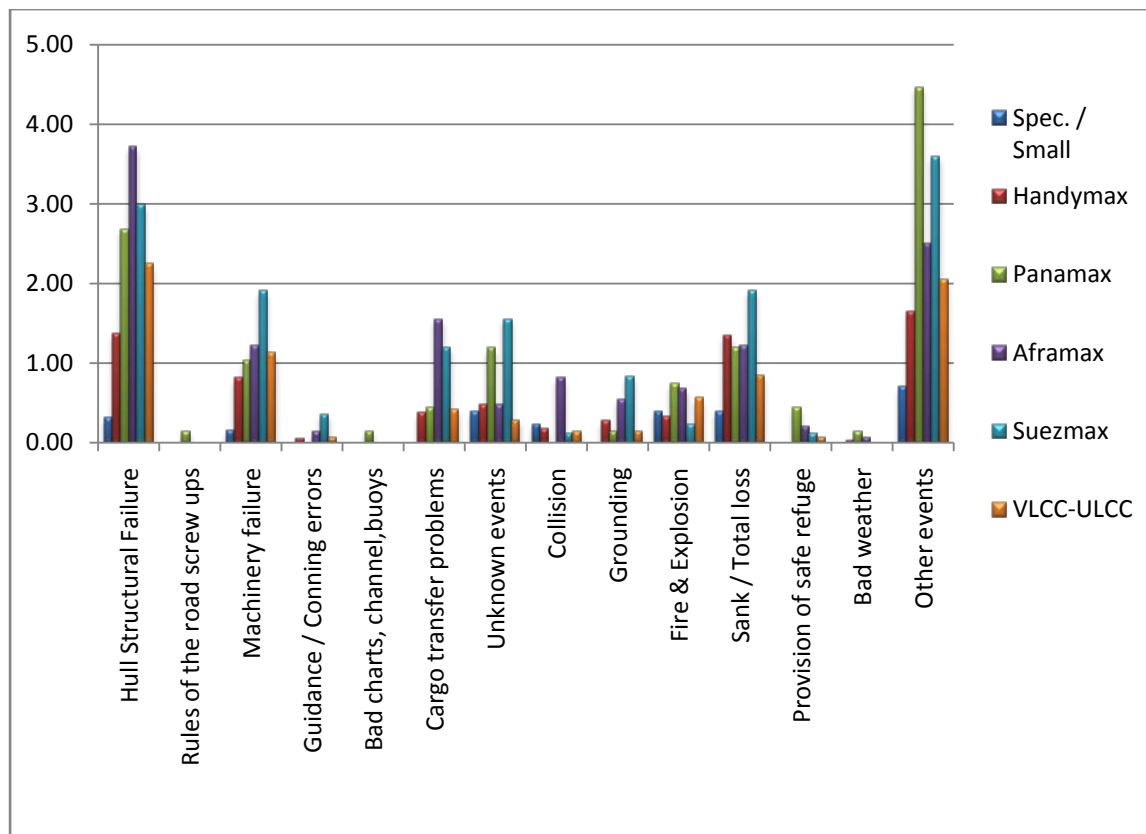


Σχήμα 24 Distribution of first and last casualties per accident type (Nomikos, 2012)

Στα επόμενα δύο Σχήματα, φαίνονται τα ποσοστά πρώτων γεγονότων στο σχήμα 25 και τελευταίων γεγονότων στο Σχήμα 26 σε 1000 πλοία με βάση τον τύπο του δεξαμενοπλοίου καθώς και τον τύπο του ατυχήματος.



Σχήμα 25 Rates of raw events per 1000 ships by type of ship and accident (Nomikos, 2012)



Σχήμα 26 Rate of last events per 1000 ships by type of ship and accident (Nomikos, 2012)

Τέλος, στον επόμενο πίνακα φαίνεται η συσχέτιση πρώτου και τελευταίου γεγονότος. Ο τύπος, δηλαδή, του τελευταίου γεγονότος δεδομένου του τύπου του πρώτου με ποσοστά πιθανότητας να συμβεί ο εκάστοτε συνδυασμός. βλέπουμε ότι ο συνδυασμός πρώτου και τελευταίου γεγονότος με τη μεγαλύτερη συχνότητα είναι αυτός του ‘Machinery Failure’ (πρώτο) με το ‘Other Events’ (τελευταίο). Ο συνδυασμός αυτός αριθμεί 85 εμφανίσεις. Δεύτερος σε συχνότητα είναι ο συνδυασμός ‘Machinery Failure’ με ‘Machinery Failure’, έχοντας εμφανιστεί 75 συνολικά φορές. Το πιο σύνηθες φαινόμενο στον προηγούμενο συνδυασμό, είναι να προκύψει κάποιο πρόβλημα σε μηχανολογικό εξοπλισμό του πλοίου και να καταλήξει σε ολική ή μερική απώλεια ισχύος. Ίσως αυτό είναι από τα πλέον σημαντικά στοιχεία, γιατί όπως θα φανεί κατά την διάρκεια της παρούσας εργασίας, η σειρά αλλά και το είδος των γεγονότων επηρεάζουν άμεσα τις συνέπειες και χαρακτηρίζουν τη σημαντικότητα ενός ατυχήματος.

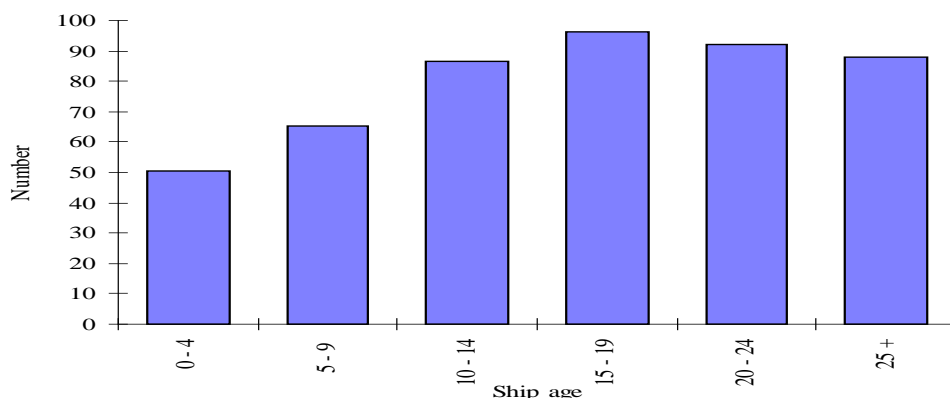
Πίνακας 5 Τύπος του τελευταίου γεγονότος δεδομένου του τύπου του πρώτου γεγονότος (Νομικός, 2012)

Πρώτο Γεγονός		Τελευταίο Γεγονός														Total
		Hull Structural Failure	Rules Of The Road Screw Up	Machinery Failure	Guidance / Conning Errors	Bad Charts, Channel, Buoys	Cargo Transfer Problems	Unknown Events	Collision	Grounding	Fire & Explosion	Sank / Total Loss	Provision of safe refuge	Bad Weather	Other Events	
Hull Structural Failure	Number	19	0	2	0	0	1	0	0	0	2	36	6	0	21	<b>87</b>
	Percent (%)	21.8%	.0%	2.3%	.0%	.0%	1.1%	.0%	.0%	.0%	2.3%	41.4%	6.9%	.0%	24.1%	<b>100.0%</b>
Rules Of	Number	14	1	0	1	0	0	0	2	2	3	8	0	0	7	<b>38</b>

The Road Screw Ups	Percent (%)	36.8%	2.6%	.0%	2.6%	.0%	.0%	.0%	5.3%	5.3%	7.9%	21.1%	.0%	.0%	18.4%	<b>100.0%</b>
Machinery Failure	Number	13	0	75	0	0	1	0	10	12	3	8	0	1	85	<b>208</b>
	Percent (%)	6.3%	.0%	36.1%	.0%	.0%	.5%	.0%	4.8%	5.8%	1.4%	3.8%	.0%	.5%	40.9%	<b>100.0%</b>
Guidance / Conning Errors	Number	38	0	0	4	0	0	0	3	2	2	5	0	0	7	<b>61</b>
	Percent (%)	62.3%	.0%	.0%	6.6%	.0%	.0%	.0%	4.9%	3.3%	3.3%	8.2%	.0%	.0%	11.5%	<b>100.0%</b>
Navigation Errors	Number	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	7	<b>11</b>
	Percent (%)	18.2%	.0%	.0%	.0%	9.1%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	9.1%	.0%	.0%	63.6%	<b>100.0%</b>
Bad Inerting / Hotwork	Number	4	0	1	0	0	0	0	0	1	5	13	0	0	4	<b>28</b>
	Percent (%)	14.3%	.0%	3.6%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	3.6%	17.9%	46.4%	.0%	.0%	14.3%	<b>100.0%</b>
Bad Charts Channel Buoys	Number	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>5</b>
	Percent (%)	100.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	<b>100.0%</b>
Cargo Transfer Problems	Number	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	<b>4</b>
	Percent (%)	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	75.0%	25.0%	.0%	.0%	.0%	<b>100.0%</b>
Unknown Events	Number	50	0	1	0	0	2	0	10	12	24	37	1	0	64	<b>201</b>
	Percent (%)	24.9%	.0%	.5%	.0%	.0%	1.0%	.0%	5.0%	6.0%	11.9%	18.4%	.5%	.0%	31.8%	<b>100.0%</b>
Provision of safe refuge	Number	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	1	<b>4</b>
	Percent (%)	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	.0%	50.0%	25.0%	.0%	25.0%	<b>100.0%</b>
Bad Weather	Number	1	0	0	0	0	7	0	0	0	1	1	0	1	4	<b>15</b>
	Percent (%)	6.7%	.0%	.0%	.0%	.0%	46.7%	.0%	.0%	.0%	6.7%	6.7%	.0%	6.7%	26.7%	<b>100.0%</b>
<b>Total</b>	<b>Number</b>	<b>146</b>	<b>1</b>	<b>79</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>29</b>	<b>43</b>	<b>112</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>200</b>	<b>662</b>
	<b>Percent (%)</b>	<b>22.1%</b>	<b>.2%</b>	<b>11.9%</b>	<b>.8%</b>	<b>.2%</b>	<b>1.7%</b>	<b>.0%</b>	<b>3.8%</b>	<b>4.4%</b>	<b>6.5%</b>	<b>16.9%</b>	<b>1.2%</b>	<b>.3%</b>	<b>30.2%</b>	<b>100.0%</b>

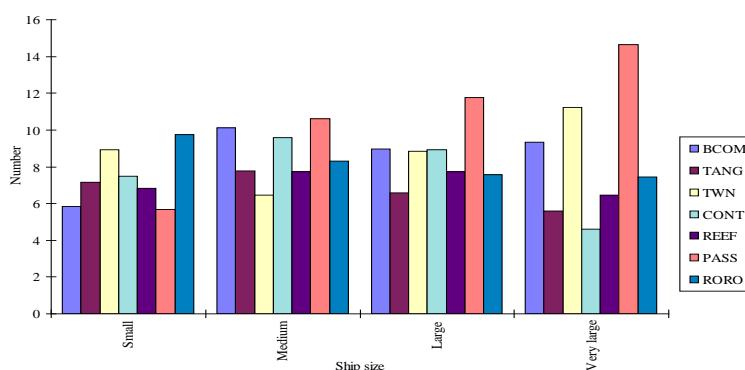
Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας ενός ναυτικού ατυχήματος είναι ο τύπος των εμπλεκόμενων σε ατύχημα πλοίων. Τα δεξαμενόπλοια, που κατά κύριο λόγο εξετάζονται στην παρούσα εργασία έχουν, από διάφορες μελέτες, την μικρότερη πιθανότητα εμπλοκής σε ατύχημα κι αυτό είναι λογικό αφού είναι από τους τύπους πλοίων που δεν επισκέπτονται συχνά τα λιμάνια.

Σημαντικός επίσης παράγοντας είναι η ηλικία ενός πλοίου. Βάσει και πάλι των {Psaraftis et al (1998)} μέχρι τα 19 έτη η πιθανότητα εμπλοκής σε ατύχημα ενός πλοίου αυξάνεται όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Είναι ενδιαφέρον πως μετά τα 19 έτη ηλικίας αν και ο κίνδυνος εμπλοκής σε ατύχημα παραμένει σε υψηλά επίπεδα, παρόλα αυτά υπάρχει μια μικρή μείωση με την αύξηση της ηλικίας των πλοίων. Μια λογική εξήγηση είναι το γεγονός πως είναι πολύ πιθανό οι διάφορες μηχανικές και δομικές αστοχίες να έχουν παρουσιαστεί μέχρι το 19<sup>ο</sup> έτος της ηλικίας των πλοίων. Παρακάτω, φαίνεται στο Σχήμα 27 η σχέση ηλικίας των πλοίων με τα ναυτικά ατυχήματα:



Σχήμα 27 Distribution of accidents by 1000 ships per ship age (Psarraftis et al, 1998)

Σημαντικός παράγοντας επίσης είναι και το μέγεθος του εμπλεκόμενου σε ατύχημα πλοίου που επηρεάζει άμεσα τα ατυχήματα με φορτηγά πλοία κι επιβατηγά και λιγότερο με δεξαμενόπλοια, στα οποία παίζει σημαντικό ρόλο το νεκρό τους βάρος, DWT, όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 28:



Σχήμα 28 Distribution of accidents per 100 ships, by type and size of vessel (Psarraftis et al, 1998)

Ο αριθμός των ναυτικών ατυχημάτων που συμβαίνουν σε δεξαμενόπλοια με DWT έως 10000 ton είναι συντριπτικά μεγαλύτερος από οποιαδήποτε άλλο αριθμό ατυχημάτων δεξαμενόπλοιων μεγαλύτερου DWT. Τα ατυχήματα από δεξαμενόπλοια με DWT έως 10000 ton αποτελούν το 65% του συνολικού αριθμού των ναυτικών ατυχημάτων από δεξαμενόπλοια που συνέβησαν στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο την περίοδο 1992-2002. Τελος είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα ατυχήματα των δεξαμενόπλοιων με DWT μικρότερο των 1000tn αποτελούν το 25% του συνολικού αριθμού ατυχημάτων (Σταυρίδης, 2007).

Επίσης, ο τόπος επηρεάζει το ναυτικό ατύχημα καθώς επίσης και το γεγονός ότι τα περισσότερα ναυτικά ατυχήματα γίνονται κοντά στη ζώνη λιμένα και την παράκτια ζώνη σε σχέση με τη ζώνη τερματικών σταθμών και την ανοιχτή θάλασσα (Σταυρίδης, 2007). Το στοιχείο αυτό καθιστά σαφές, ότι η βελτίωση της ασφάλειας των πλοίων δεν είναι μία επιστημονική πολυτέλεια, αλλά αποτελεί ευθύνη της επιστημονικής κοινότητας να την ερευνά και να προτείνει λύσεις προς την κατεύθυνση της μείωση των ατυχημάτων και των συνεπειών από αυτά.

Τελευταίοι αλλά εξίσου σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα ναυτικά ατυχήματα είναι η σημαία του πλοίου, που συνδέεται άμεσα με το επίπεδο του πληρώματος, η χώρα ιδιοκτησίας του πλοίου και ο νηογνώμονας στον οποίο ανήκει το πλοίο.

### 3.4 Συνέπειες ναυτικών ατυχημάτων

Οι συνέπειες ενός ναυτικού ατυχήματος, βάσει του IMO χαρακτηρίζονται ως εξής:

- Less serious casualties
- Serious casualties
- Very serious (incl. total loss)

*(According to IMO (2005 Casualty-related matters – reports on marine casualties and incidents. Revised harmonized reporting procedures – reports required under SOLAS regulation I/21 and MARPOL 73/78, articles 8 and 12, MSC-MEPC.3/Circ.1, London, UK.)*

Όπου βάσει αυτών των ορισμών :

- **Very Serious Casualties:** Είναι τα ατυχήματα πλοίων που περιλαμβάνουν την ολική απώλεια ή καταστροφή του σκάφους, απώλεια ζωής ή σοβαρή ρύπανση.
- **Serious Casualties:** Είναι τα ατυχήματα πλοίων που δεν είναι κατάλληλα για να θεωρηθούν θανατηφόρα και που περιλαμβάνουν πυρκαγιά, έκρηξη, σύγκρουση, προσάραξη, επαφή, ζημιά λόγω κακοκαιρίας, κατασκευαστική αστοχία στη γάστρα κ.λπ., με συνέπεια:
  - a. Ακινητοποίηση των κύριων μηχανών, εκτενή ζημιά στέγασης, αυστηρή κατασκευαστική ζημιά, όπως διείσδυση νερού στη γάστρα κ.λπ., που καθιστούν το σκάφος ακατάλληλο για να πλεύσει .
  - b. Ρύπανση (ανεξάρτητα από την ποσότητα).
  - c. Μια βλάβη που απαιτεί τη ρυμούλκηση ή τη βοήθεια από την ακτή.
- **Less Serious Casualties:** Είναι ατυχήματα πλοίων που δεν εμπίπτουν στις δυο παραπάνω κατηγορίες και παρουσιάζονται με σκοπό την καταγραφή χρήσιμων πληροφοριών. Περιλαμβάνει επίσης ναυτικά ατυχήματα τα οποία αυτοαποκαλούνται «επικίνδυνα ατυχήματα» και «παραλίγο ατυχήματα».

### 3.5 Πρόσκρουση/Σύγκρουση Πλοίων (Collision)

*Το ναυτικό ατύχημα της σύγκρουσης αναφέρεται στην πρόσκρουση δύο πλοίων μεταξύ τους ανεξαρτήτως τύπου ή μεγέθους και χωρίς περιορισμό για την*

**κατάσταση που βρίσκονταν τα πλοία κατά τη διάρκεια του ατυχήματος (αγκυροβολημένα, εν πλω κλπ.).**

Η αύξηση της ταχύτητας των πλοίων και η μεγαλύτερη συμφόρηση που παρατηρείται κάθε έτος σε σχέση με το προηγούμενο, στις θαλάσσιες μεταφορές, παγκόσμια, αποτελούν βασικές αιτίες για την συνεχή αύξηση των συγκρούσεων.

Η σύγκρουση θεωρείται ένα από τα σοβαρότερα είδη ατυχημάτων καθώς επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις με κύρια τη ρύπανση του θαλασσίου περιβάλλοντος και τις απώλειες ανθρώπινων ζωών, καθώς και οικονομικές επιπτώσεις για την πλοιοκτήτρια εταιρεία και όχι μόνο.

Για να μελετήσει κανείς ένα οποιοδήποτε ναυτικό ατύχημα θα πρέπει να κατασκευάσει ένα μοντέλο του ατυχήματος βάσει του οποίου θα εξηγήσει τις συνέπειες, τόσο κατασκευαστικές για το ίδιο το πλοίο, όσο και στο περιβάλλον.

Σύμφωνα με τη μελέτη του Society of Naval Architects And Marine Engineers (SNAME Ad Hoc Panel #6) το πρόβλημα της σύγκρουσης δύο πλοίων χωρίζεται σε δύο υποπροβλήματα:

- ✓ Το εξωτερικό πρόβλημα που περιλαμβάνει όλα εκείνα τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο εμπλεκόμενων πλοίων και των κινήσεών τους πριν και μετά τη σύγκρουση και
- ✓ Το εσωτερικό πρόβλημα που περιλαμβάνει τα κατασκευαστικά και μηχανικά χαρακτηριστικά και προβλήματα των δύο πλοίων κατά την διάρκεια της σύγκρουσης

Κατά τη διάρκεια της μελέτης ενός ατυχήματος σύγκρουσης ομαδοποιούνται τα χαρακτηριστικά των μετεχόντων πλοίων σε αυτό. Το πλοίο που προσκρούει στο άλλο ονομάζεται *stricken* ή *striking ship* κι αυτό που υφίσταται τη σύγκρουση *struck ship*. Τα χαρακτηριστικά των δύο πλοίων δηλαδή το μέγεθος (L, B, T), το νεκρό βάρος (DWT), το εάν είναι *double* ή *single hull* είναι σημαντικές παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη των ναυτικών ατυχημάτων σύγκρουσης. Επιπλέον, εξωτερικοί παράγοντες όπως, οι καιρικές συνθήκες καθώς και η υψηλή θαλάσσια κίνηση συνεισφέρουν στην πρόκληση σύγκρουσης.

Επίσης, ο ανθρώπινος παράγοντας και τα διάφορα οργανωτικά λάθη που έγιναν πριν το ατύχημα, όπως για παράδειγμα η κακή συντήρηση του πλοίου αποτελούν βασικούς παράγοντες για την πρόκληση σύγκρουσης. Ιδιαίτερα, τα νεώτερα σκάφη είναι λιγότερο πιθανόν να συγκρουστούν εξαιτίας τεχνικής βλάβης σε σχέση με τα παλαιότερα, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο ανθρώπινος παράγοντας και η σωστή οργάνωση, όπως η εκπαίδευση, η επάρκεια και η ανταπόκριση του πληρώματος καθώς και η σωστή συντήρηση και η πρόληψη ζημιών, αποτελούν το πεδίο της σύγχρονης έρευνας για την αποφυγή συγκρούσεων στη θάλασσα.

Αναλυτικά, τα κρίσιμα στοιχεία και μεγέθη ενός ατυχήματος σύγκρουσης, φαίνονται παρακάτω:



**Struck ship / stricken:** το πλοίο που δέχθηκε τη σύγκρουση.

**Striking ship:** το πλοίο που προκαλεί τη σύγκρουση.

**$\beta$ :** η γωνία σύγκρουσης.

**Penetration:** η διείσδυση του ενός πλοίου στο άλλο.

**$\varphi$ :** η γωνία διείσδυσης.

**$\delta$ :** η απόσταση διείσδυσης.

**$\xi$ :** η συνισταμένη κατεύθυνση της κοινής ταχύτητας συσσωματώματος μετά την σύγκρουση.

**Velocity of striking ship:** ταχύτητα του πλοίου που προκαλεί τη σύγκρουση.

**Velocity of struck ship:** ταχύτητα του πλοίου που δέχεται τη σύγκρουση.

**Velocity of striking ship relative to struck ship:** σχετική ταχύτητα του πλοίου που προκαλεί τη σύγκρουση ως προς την ταχύτητα του πλοίου που δέχεται τη σύγκρουση.

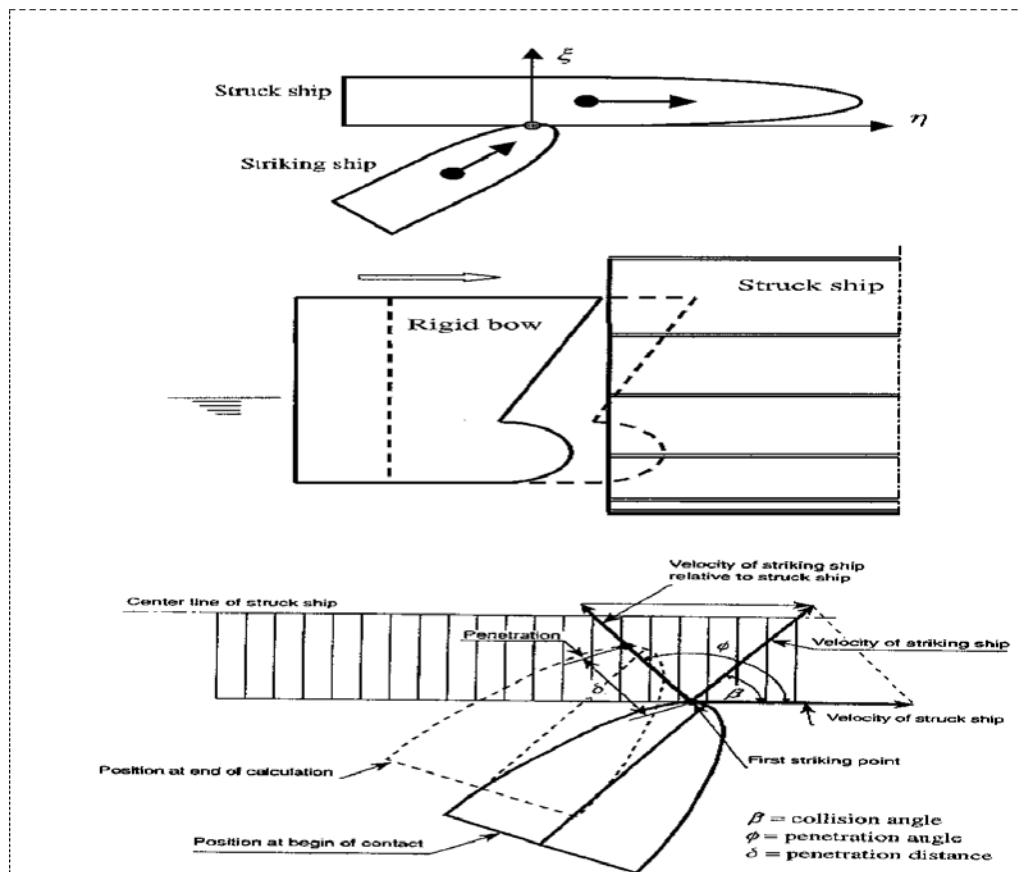
**Position at begin of contact:** η θέση του πλοίου που προκαλεί τη σύγκρουση στην αρχή της επαφής.

**Position at end of calculation:** η θέση του πλοίου που προκαλεί τη σύγκρουση στο τέλος των υπολογισμών.

**Rigid Bow:** συμπαγής πλώρα.

Αυτά τα χαρακτηριστικά αποτελούν και τη γεωμετρία της σύγκρουσης, που αποτελεί μία βασική ομάδα παραμέτρων σε κάθε έρευνα για τη μελέτη του συγκεκριμένου ατυχήματος.

Στο Σχήμα 29, φαίνεται διαγραμματικά η σύγκρουση δύο πλοίων και τα βασικά χαρακτηριστικά από πλευράς μηχανικής που είναι απαραίτητα για τη διερεύνηση του φαινομένου.



Σχήμα 29 Diagram of Collision (Zhang, 1999)

Τα είδη της σύγκρουσης με βάση την γωνία σύγκρουσης φαίνονται στο αμέσως επόμενο Σχήμα, 30, όπου εάν το πλοίο που υφίσταται τη σύγκρουση βρίσκεται μέχρι  $5^\circ$  εκατέρωθεν του κεντρικού άξονα του άλλου πλοίου, χαρακτηρίζεται ως εμπρόσθια από  $5^\circ$  μέχρι  $22,5^\circ$  ως σύγκρουση διασταύρωσης και άνω των  $22,5^\circ$  ως σύγκρουση προσπέρασης (IMO 2002b).



Σχήμα 30 Type of collisions depending on the angle of a collision accident (IMO, 2002b)

Η γεωγραφική θέση των συμβάντων σύγκρουσης είναι από τα βασικότερα χαρακτηριστικά αυτού του είδους των ατυχημάτων. Με έρευνα σε δεξαμενόπλοια

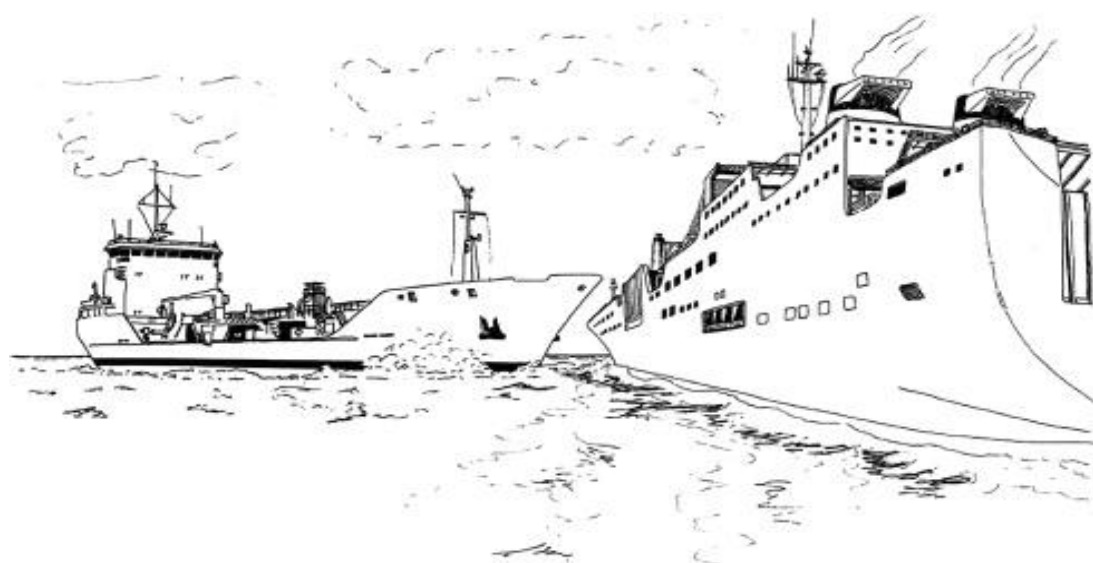
από το 1980 έως και το 2009 (Νομικός, 2012) που τα αποτελέσματά της φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα, τα περισσότερα ατυχήματα έλαβαν χώρα σε περιορισμένα ύδατα (restricted waters) και 26 σε λιμάνια , ποτάμια ή κανάλια.

Πίνακας 6 Κατανομή ατυχημάτων από το 1980-2009 της κατηγορίας Collision (Νομικός, 2012)

<u>Τοποθεσία ατυχημάτων</u>	<u>Εμφανίσεις</u>	
	<u>Αριθμός</u>	<u>Ποσοστό (%)</u>
Open water	11	12,8
Harbor / River / Canal	26	30,2
Restricted Waters	34	39,5
At (fixed) berth	8	9,3
At SBM	0	0,0
At repair yard	1	1,2
Lightering	0	0,0
Unknown	6	7,0
<b>ΣΥΝΟΛΑ</b>	<b>86</b>	<b>100,0</b>

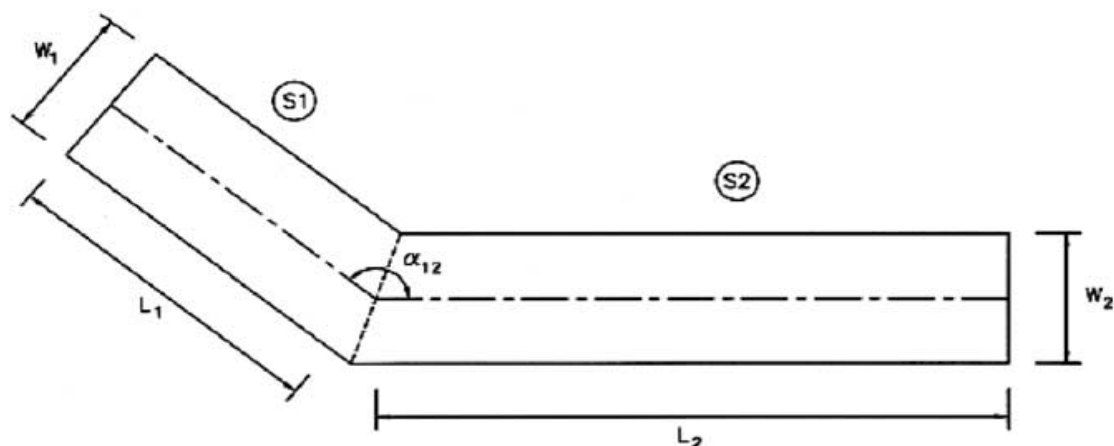
Τα είδη της σύγκρουσης βάσει του Bassy Tool (software developed by DTU and Gatehouse, 2006-2008) είναι τα εξής:

- Σύγκρουση λόγω προσπέρασης (overtaking collision)
- Αμφίδρομη Σύγκρουση (head – on collision)
- Σύγκρουση λόγω διασταύρωσης (crossing collision) (Σχήμα 31)
- Σύγκρουση λόγω συγχώνευσης θαλάσσιων οδών (merging collision)
- Σύγκρουση λόγω στροφής (bend collision)



Σχήμα 31 Crossing Collision (Pedersen, 2010 )

Στο παρακάτω Σχήμα, 32, φαίνεται καθαρά η έννοια της συγχώνευσης 2 θαλασσίων οδών:



Σχήμα 32 Typical intersecting waterways (Samuelides et al, 2001)

Τέλος, η εκάστοτε μελέτη του φαινομένου της σύγκρουσης επικεντρώνει και τις διαφορετικές συνέπειες που αυτό μπορεί να προκαλέσει. Για παράδειγμα, άλλες έρευνες μελετούν τη διάρρηξη των δεξαμενών του φορτίου, άλλες την εκροή πετρελαίου, άλλες την τελική αντοχή του κατεστραμμένου σκάφους και πολλές ακόμη συνέπειες ανάλογα με το σκοπό της έρευνας.

Τέλος, στο Σχήμα 33 φαίνεται η σύγκρουση μεταξύ των Φ/Γ Alexia και Enif, στον κόλπο του Μεξικού, 70 μίλια περίπου νότια της Νέας Ορλεάνης, κοντά στην περιοχή του δέλτα του ποταμού Μισισσιπή. Το πλοίο που διείσδυσε (striking ship) ήταν το Alexia. Το ατύχημα είχε ως αποτέλεσμα περίπου 10.000 γαλόνια αργού πετρελαίου να διαρρεύσουν από το πλοίο Enif. Θεωρήθηκε αμέλεια του πλοιάρχου του πλοίου Enif. Δεν υπήρξε κανένας ναυαγός από το πλοίο Enif, παρόλο που οι υλικές ζημιές ήταν τεράστιες. Να σημειωθεί ότι το πλοίο Alexia δεν μετέφερε φορτίο σε αντίθεση με το Enif, που ήταν φορτωμένο με 1500 τόνους χάλυβα.



Σχήμα 33 Collision of Alexia and Enif - Gulf of Mexico, 1995 (Michel et al, 2013)

Εκτενής αναφορά για τις συνέπειες των ναυτικών ατυχημάτων σύγκρουσης θα γίνουν στα επόμενα κεφάλαια με βασική παράμετρο την ύπαρξη πυρηνικής προωστήριας εγκατάστασης στο πλοίο, έχοντας λάβει υπόψη και παραμέτρους που αφορούν την ασφάλεια του πυρηνικού αντιδραστήρα του πλοίου.

### 3.6 Προσάραξη Πλοίου

*Η προσάραξη ενός πλοίου αποτελεί εκείνο το ναυτικό ατύχημα κατά το οποίο το πλοίο έρχεται σε άμεση επαφή με τον πυθμένα της θάλασσας ή τη στεριά ή κάποιο ναυάγιο και προκαλείται ζημιά στο πλοίο που μπορεί να επηρεάσει σοβαρά την ασφάλειά του. Ατυχήματα τέτοιου είδους είναι εξίσου σημαντικά με τις συγκρούσεις, καθώς οι συνέπειες ως προς το περιβάλλον ή σε σχέση με την απώλεια ανθρώπινων ζωών μπορεί να είναι ανυπολόγιστες.*

Στο Σχήμα 34 φαίνεται η προσάραξη του Δ/Ξ Sea Empress, που συνέβη στις 15 Φεβρουαρίου 1996, στην είσοδο του λιμένα Milford Haven, στο Pembrokeshire της Ουαλίας. Αποτέλεσμα της προσάραξης, ήταν να διαρρεύσουν περίπου 73.000 τόνοι αργού πετρελαίου στη θάλασσα προκαλώντας τεράστια περιβαλλοντική καταστροφή. Το πλοίο μετέφερε 130.000 τόνους αργού πετρελαίου. Ευθύνη για την προσάραξη του πλοίου στην αρχή του καναλιού προς το λιμένα αποδόθηκε πέρα από το πλήρωμα και στον πλοηγό του λιμένος για την κακή εκτίμηση της πορείας του πλοίου. Το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι μία χαρακτηριστική περίπτωση προσάραξης πλοίου και των επιπτώσεων που μπορεί να έχει στο περιβάλλον και υπήρξε η αφορμή για την μελέτη νέων τεχνικών για τον καθαρισμό των πετρελαιοκηλίδων αλλά και στην αυστηροποίηση των κανονισμών που αφορούν τα πλοία. Να σημειωθεί πως το Δ/Ξ Sea Empress ήταν ένα μονοπύθμενο σκάφος.



Σχήμα 34 The grounding of the M/V Sea Empress (ITOPF, access 2014)



Σχήμα 35 The bottom of the M/V Sea Empress after the grounding (Samuelides et al, 2007)

Στο σχήμα 35, φαίνεται τμήμα του πυθμένα του πλοίου μετά την προσάραξη

Η γεωγραφική, επομένως, θέση των συμβάντων προσάραξης αποτελεί ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους. Με έρευνα σε δεξαμενόπλοια από το 1980 έως και το 2009 (Νομικός, 2012) που τα αποτελέσματά της φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα, τα περισσότερα ατυχήματα προσάραξης έγιναν σε περιορισμένης ναυσιπλοΐας θάλασσες, σε ποτάμια, κανάλια κτλ.

Πίνακας 7 Κατανομή ατυχημάτων από το 1980-2009 της κατηγορίας Grounding (Νομικός, 2012)

<u>Τοποθεσία ατυχημάτων</u>	<u>Εμφανίσεις</u>	
	<u>Αριθμός</u>	<u>Ποσοστό (%)</u>
Open water	2	1,8
Harbor / River / Canal	43	38,4
Restricted Waters	49	43,8
At (fixed) berth	5	4,5
At SBM	3	2,7
At repair yard	0	0,0
Lightering	0	0,0
Unknown	10	8,9
<b>ΣΥΝΟΛΑ</b>	<b>112</b>	<b>100,0</b>

Σημαντικός παράγοντας, επίσης, είναι και το μέγεθος του πλοίου. Ιδιαίτερα, τα μεγάλα δεξαμενόπλοια είναι ευπαθή σε αυτού του είδους τα ατυχήματα, καθώς λόγω όγκου, είναι μικρό το χρονικό περιθώριο για ελιγμούς. Παρακάτω, φαίνεται η κατανομή των ατυχημάτων ανά είδος δεξαμενοπλοίου.

Πίνακας 8 Κατανομή ατυχημάτων προσάραξης ανά είδος δεξαμενοπλοίου (Νομικός, 2012)

<u>Κατηγορίες πλοίων</u>	<u>Αριθμός</u>	<u>Ποσοστό (%)</u>
Spec. / Small	4	3,6
Handymax	40	35,7
Panamax	13	11,6

Aframax	29	25,9
Suezmax	16	14,3
VLCC - ULCC	10	8,9
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>112</b>	<b>100,0</b>

Η προσάραξη ενός πλοίου αποτελεί ένα ιδιαίτερο πρόβλημα μηχανικής και είναι αντικείμενο συνεχούς μελέτης για τις επιπτώσεις που επιφέρει στη γάστρα του πλοίου. Οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται μπορούν να επιφέρουν μέχρι και ολική κατάρρευση της κατασκευής. Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και με άλλες αριθμητικές ή/και αναλυτικές μεθόδους και συνεχή έρευνα η μελέτη του πυθμένα ενός πλοίου αποτελεί χρήσιμη πηγή γνώσης για την πρόβλεψη των συνεπειών από ένα τέτοιο ατύχημα.

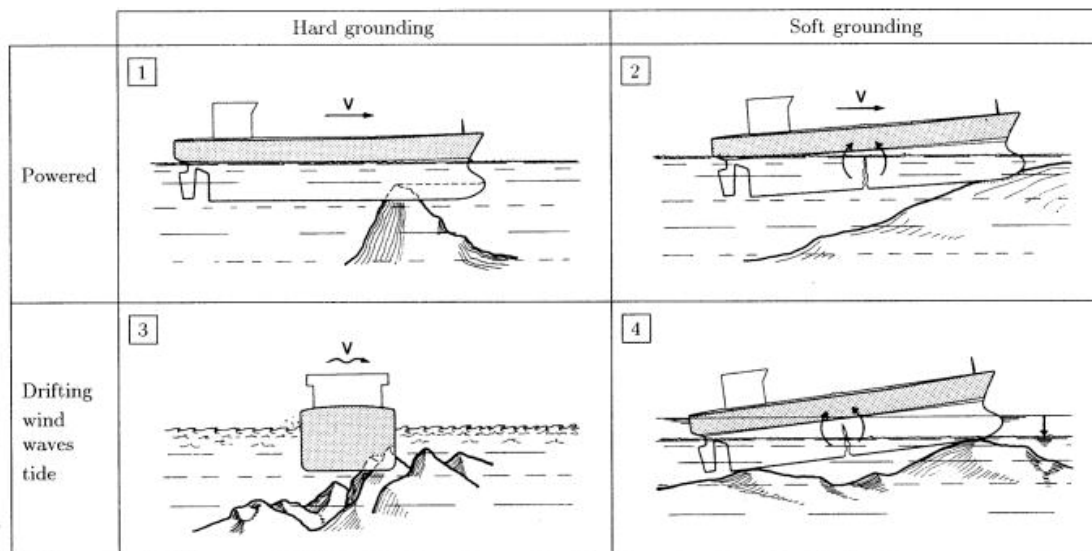
Η προσάραξη θεωρείται ένα **σύνθετο ατύχημα** αφού πολλοί ενεργειακοί μηχανισμοί συμβάλλουν σε αυτό. Επίσης, οι συνέπειες διαφέρουν ανάλογα με τους υφάλους, τη μορφή του πυθμένα και φυσικά ανάλογα με την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου. Είναι σημαντικό επίσης να αναφερθεί, ότι οι τυχόν ζημιές στο σκάφος δεν συμβαίνουν μόνο κατά τη διάρκεια του γεγονότος της προσάραξης αλλά και κατά την παραμονή του πλοίου σε αυτή την κατάσταση, πράγμα που καθιστά την όποια πρόβλεψη περί συνεπειών σχετικά επισφαλής.

Η ποιότητα του βυθού αποτελεί μία σημαντική παράμετρο, όπως αναφέρουν οι περισσότερες έρευνες πάνω σε θέματα προσάραξης. Πολύ σημαντική επίσης είναι η κατάσταση φόρτωσης του πλοίου, αφενός για την κατάστασή του αμέσως μετά την προσάραξη αφετέρου σε επίπεδο συνεπειών, διαρροής πετρελαίου και γενικότερα περιβαλλοντικής καταστροφής.

Τα είδη της προσάραξης βάσει του Bassy Tool (software developed by DTU and Gatehouse, 2006-2008) είναι τα εξής:

- Προσάραξη σε πλοίο που βρίσκεται στην **κανονική θαλάσσια** οδό και πλέει σε **κανονική ταχύτητα**. Οφείλεται είτε σε ανθρώπινο λάθος είτε σε ξαφνικό κι απρόβλεπτο πρόβλημα στο σύστημα πρόωσης.
- Προσάραξη εξαιτίας της **μη έγκαιρης αλλαγής πορείας** μπροστά από εμπόδιο
- Προσάραξη ή και σύγκρουση με το αντικείμενο **λόγω κακού χειρισμού του πλοίου**.
- Ότι δεν περιλαμβάνεται στις παραπάνω κατηγορίες, πχ προσάραξη εξαιτίας της πλήρους πτώσεως του συστήματος πρόωσης του πλοίου.

Στο Σχήμα 36 φαίνεται διαγραμματικά η προσάραξη ενός πλοίου σε διαφορετικά είδη πυθμένα θάλασσας (σκληρό ή μαλακό πυθμένα) και υπό διαφορετικές συνθήκες (με τις μηχανές σε λειτουργία ή πλοίο που παρασύρεται λόγω αναμέων ή παλίρροιας):



Σχήμα 36 Grounding in different types of bottom and under different conditions (Simonsen et al, 2000)

### 3.7 Η Μέθοδος FSA για τη μελέτη της ασφάλειας των πλοίων (Formal Safety Assessment)

Ο **IMO** προκειμένου να βελτιώσει την ασφάλεια στην ναυτιλία, έχει θεσπίσει μια σειρά Συμβάσεων και Κωδίκων. Η ιδέα της **FSA** ξεκίνησε από τον την παραδοχή του Λόρδου Carver ότι η σύγχρονη επιστήμη και τεχνολογία δεν εφαρμόζεται επαρκώς σε πολλούς τομείς που επηρεάζουν την ασφάλεια της ναυτιλίας. Ακολουθώντας αυτή την παραδοχή η κυβέρνηση της Βρετανίας εισήγαγε την FSA σαν μια προσέγγιση που περιλαμβάνει την χρήση της διαχείρισης της επικινδυνότητας και της ανάλυσης κόστους-οφέλους, όχι ατομικά σε επίπεδο πλοίου αλλά σαν μια βάση στην διαδικασία λήψης αποφάσεων του IMO και της εμπορικής ναυτιλίας γενικά. Η Βρετανία ισχυρίστηκε ότι η υιοθέτηση της FSA θα επιτρέψει τα θέματα ασφάλειας στον IMO να έχουν προτεραιότητα και έτσι οι εξαγόμενοι κανονισμοί να είναι αποτελεσματικοί από πλευράς κόστους και με την αναλογικά ισόποση επικινδυνότητα. Η αντίδραση του IMO ήταν ευνοϊκή από την αρχή: Συστάθηκε μια Ομάδα Εργασίας κάτω από την Maritime Safety Committee (MSC) η οποία εξέδωσε οδηγίες για την εφαρμογή της FSA. Η Επιτροπή Ναυτικής Ασφάλειας (Maritime Safety Committee, MSC) IMO ενέκρινε από το 1997 την μέθοδο της Τυπικής Αποτίμησης Ασφάλειας (Formal Safety Assessment, FSA) ως την πλέον κατάλληλη και ενδεδειγμένη για τη μελέτη και ανάλυση διαφόρων δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές. Στην καταγεγραμμένη πρόθεση του IMO σημειώνεται ο εξής ορισμός (IMO, 2002) :

*«Η FSA είναι μια δομημένη και συστηματική μεθοδολογία που στοχεύει στην ενίσχυση της ναυτικής ασφάλειας συμπεριλαμβανομένων της προστασίας της ανθρώπινης ζωής και υγείας, του θαλάσσιου περιβάλλοντος και της παρουσίας με τη χρήση ανάλυσης ρίσκου και ανάλυσης κόστους-ωφέλειας».*



Η FSA μπορεί να ορισθεί ως μια διαδικασία όπου παρατηρείται μια τάση απομάκρυνσης από την απλή χρήση των περιγραφικών κανονισμών, και παράλληλα δίδεται μεγαλύτερη έμφαση στην συνολική επίδοση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τους κινδύνους και τα ρίσκα τα οποία ενδέχεται αυτό να αντιμετωπίσει.

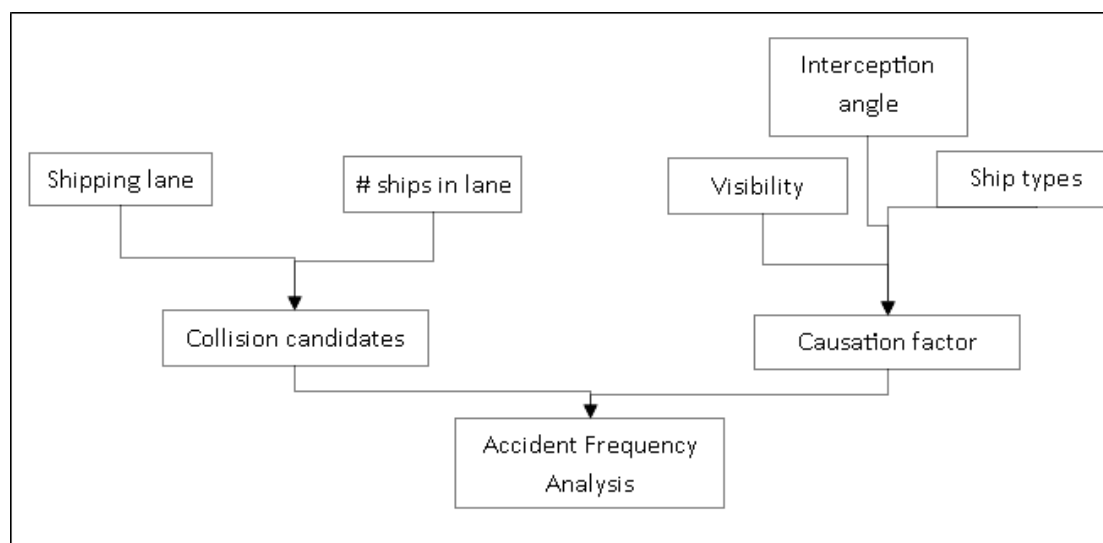
Τα **πέντε βήματα** αυτής της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

### 1. Εντοπισμός των κινδύνων- Identification of Hazards (IH)

Στόχος του βήματος είναι να δημιουργηθεί ένας κατάλογος με όλα τα σχετικά σενάρια ατυχημάτων τα οποία συνοδεύονται με τις δυνητικές τους αιτίες αλλά και με τα πιθανά αποτελέσματά τους. Χρειάζεται η μελέτη αρκετών συμβάντων για να εντοπιστούν οι κατάλληλες παράμετροι.

### 2. Ανάλυση Ρίσκου - Risk Analysis (RA)

Στόχος του βήματος είναι να αξιολογηθούν οι παράγοντες που συμμετέχουν στα εντοπισθέντα ρίσκα, σε κάθε σενάριο ατυχήματος, αλλά και κατά σειρά μεγέθους (από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο). Χρησιμοποιούνται για την ανάλυση και τα δέντρα γεγονότων που θα αναλυθούν στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο. Στο παρακάτω Σχήμα, 37, φαίνεται η ανάλυση συχνότητας ατυχημάτων στην περίπτωση σύγκρουσης πλοίων.



Σχήμα 37 Accident Frequency Analysis (Otto et al, 2011)

Σε αυτό το βήμα υπολογίζεται η πιθανότητα για κάθε πιθανό παράγοντα-κίνδυνο πρόκλησης ατυχήματος και κατόπιν η συχνότητα, καθώς επίσης γίνεται και η ανάλυση των συνεπειών για κάθε σενάριο ατυχήματος (Accident Consequence Analysis)

### 3. Έλεγχος εναλλακτικών επιλογών-Risk Control Options (RCO)

Στόχος του βήματος είναι να παρουσιάσει κανονιστικά μέτρα με σκοπό να ελέγξει και να μειώσει τα ρίσκα που εντοπίστηκαν στο δεύτερο βήμα. Η προσοχή εστιάζεται στα

μεγαλύτερα ρίσκα, όπως αξιολογήθηκαν από το προηγούμενο βήμα. Κατά το βήμα αυτό:

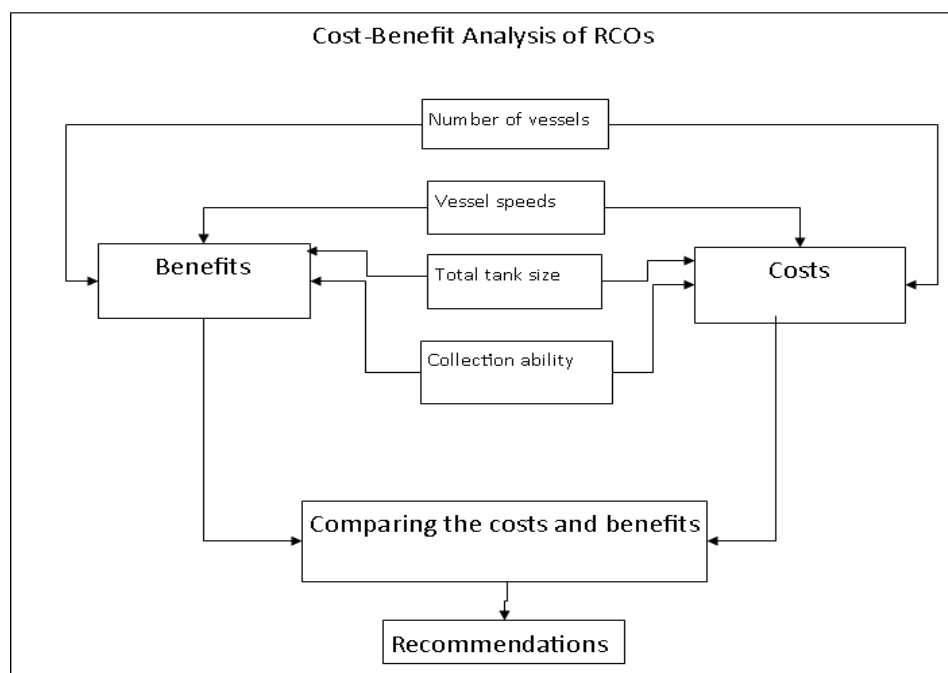
- Γίνεται προσπάθεια εξάλειψης του κινδύνου
- Γίνεται προσπάθεια αντικατάστασης ή/και του κινδύνου εάν αυτό είναι εφικτό
- Γίνεται έλεγχος του αρχικού σχεδιασμού
- Γίνεται αξιολόγηση του ανθρώπινου παράγοντα

Και γενικά εξετάζουν παράγοντα προς παράγοντα οι ερευνητές με σκοπό τη τελική ελαχιστοποίηση των κινδύνων

#### 4. Ανάλυση κόστους-οφέλους-Cost Benefit Analysis (CBA)

Στο βήμα αυτό εντοπίζονται τα κόστη και τα οφέλη από την εφαρμογή της κάθε εναλλακτικής πρότασης ελέγχου του ρίσκου κάνοντας χρήση καθιερωμένων τεχνικών αξιολόγησης κόστους – οφέλους.

Στο επόμενο Σχήμα, 38, παρατηρούμε το βήμα 4 της μεθόδου FSA στην περίπτωση του ατυχήματος σύγκρουσης.



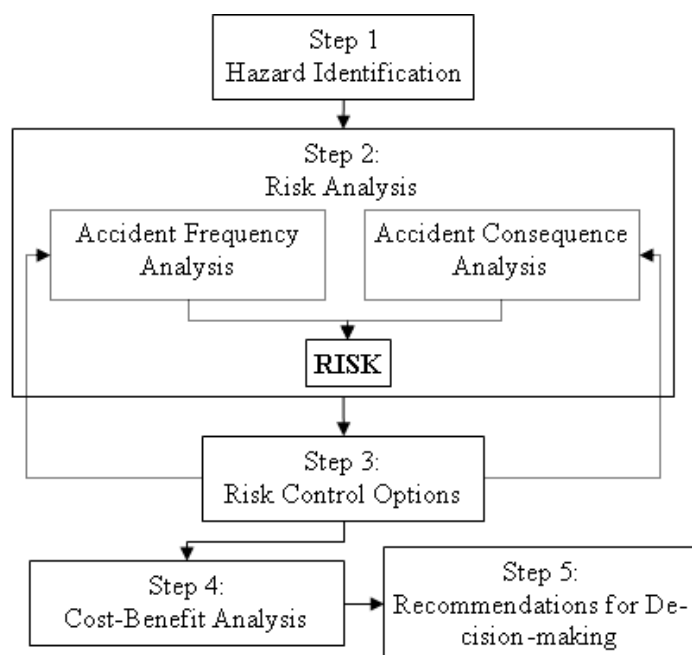
Σχήμα 38 Step 4 of FSA for ship collision (Sormunen, 2011)

#### 5. Συστάσεις για λήψη αποφάσεων-Decision Making Recommendations

Εδώ πλέον συγκεντρώνονται οι πληροφορίες που αφορούν τους κινδύνους, τα ρίσκα που συνδέονται με αυτούς, και την αποτελεσματικότητα με βάση το κόστος των εναλλακτικών σεναρίων ελέγχου των ρίσκων και στην συνέχεια προωθούνται σε εκείνους που είναι επιφορτισμένοι με την λήψη αποφάσεων. Στις περιπτώσεις όπου οι λήπτες απόφασης απαιτούν να εκτελεσθεί επί πλέον εργασία αυτοί θα πρέπει να επανατοποθετούν είτε τη δήλωση του προβλήματος είτε των

περιοριστικών του συνθηκών-περιορισμών, και στη συνέχεια να το επανυποβάλλουν στην ομάδα προκειμένου να επαναληφθεί η διαδικασία. Το βήμα 5 της μεθοδολογίας FSA, αλληλεπιδρά με κάθε ένα από τα άλλα βήματα στην επίτευξη των συστάσεων λήψης αποφάσεων. Είναι πολύ κρίσιμο να σημειωθεί ότι στην ομάδα η οποία διενεργεί την διαδικασία της FSA θα πρέπει να περιλαμβάνεται το κατάλληλο και έμπειρο προσωπικό το οποίο να ανταποκρίνεται στο πιθανό εύρος του γεγονότος που καλείται να αντιμετωπίσει και στην ιδιαίτερη φύση του.

Παρακάτω, στο Σχήμα 39, φαίνονται σχηματικά τα πέντε βήματα της μεθόδου:



Σχήμα 39 The five steps of the FSA method (Goerland et al, 2011)

Η μέθοδος FSA είναι μια συστηματική διαδικασία που στοχεύει:

A. Στην εκτίμηση του ρίσκου που αφορά όλες τις δραστηριότητες και πρακτικές στη θάλασσα (Καρύδης & Βασιλάκος, 2000, Βεντίκος, 2002).

B. Στον ενεργό υπολογισμό του κόστους και των ωφελειών που έχουν να κάνουν με τις εναλλακτικές λύσεις που προτείνονται για τον περιορισμό των κινδύνων (Καρύδης & Βασιλάκος, 2000, Βεντίκος, 2002).

Θέτει, επομένως, η FSA τους **στόχους ασφάλειας μέσω του εντοπισμού ιδιαίτερων κινδύνων και ρίσκων**, οι οποίοι ακολουθώντας αντιμετωπίζονται από τη Διαχείριση Ρίσκων (Risk Management).

Η μεθοδολογία της FSA μπορεί να εφαρμόζεται από:

- Μια ατομική διοίκηση ή ένα οργανισμό που έχει συμβουλευτική σχέση με τον IMO όταν προτείνει συμπληρώσεις στην ασφάλεια και προστασία του περιβάλλοντος που έχουν σχέση με τα όργανα του IMO προκειμένου να αναλυθούν οι συνέπειες τέτοιων προτάσεων, ή
- Από την Επιτροπή, ή ένα παραγγέλοντα επικουρικό σώμα, προκειμένου να επιθεωρήσει το συνολικό πλαίσιο των κανονισμών ασφάλειας και

περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα για ένα συγκεκριμένο τύπο πλοίου ή ένα τύπο κινδύνου, στοχεύοντας στον εντοπισμό προτεραιοτήτων ή περιοχών ενδιαφέροντος εντός των υφιστάμενων κανονισμών.

Δεν υπάρχει πρόθεση η FSA να εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση, όμως η εφαρμογή της θα μπορούσε να σχετίζεται ιδιαίτερα με τις προτάσεις οι οποίες μπορεί να έχουν εκτεταμένες συνέπειες σε όρους πρόκλησης είτε κόστους (στην κοινωνία ή στην ναυτιλιακή βιομηχανία), είτε επιβάρυνσης νομικής ή διοικητικής. Σε αυτές τις περιπτώσεις η FSA θα δώσει τη δυνατότητα εδραίωσης των ωφελειών των προτεινόμενων, έτσι ώστε να δοθεί στις Κυβερνήσεις - μέλη μια μικρότερου κόστους εκδοχή της σκοπιμότητας των προτάσεων και μια βελτιωμένη βάση πάνω στην οποία είναι δυνατόν να λαμβάνονται αποφάσεις.

Μεγάλο πλεονέκτημα της FSA είναι η ικανότητά της να ενσωματώνει αξιόπιστα υπό ρεαλιστικούς όρους τη συμβολή και εμπλοκή του ανθρώπινου παράγοντα στη ναυτική ασφάλεια. Αυτό γίνεται μέσω της χρήσης της **Ανάλυσης Ανθρώπινης Αξιοπιστίας (Human Reliability Analysis)**. Η HRA είναι μια διαδικασία (process) η οποία περιλαμβάνει μια σειρά από δραστηριότητες (activities) και τη δυνατότητα χρήσης μιας σειράς τεχνικών οι οποίες εξαρτώνται από τον συνολικό στόχο της ανάλυσης. Όπου απαιτείται πλήρως ποσοτικοποιημένη προσέγγιση της FSA, η HRA μπορεί να χρησιμοποιείται για να αναπτύσσεται μια σειρά Πιθανοτήτων Ανθρώπινου Λάθους (Human Error Probabilities – HEP's) με σκοπό να ενσωματωθούν στην πιθανολογική εκτίμηση ρίσκου. Επομένως το αν η HRA θα αναλαμβάνεται σε ποιοτική ή ποσοτική βάση εξαρτάται από το επίπεδο της μελέτης FSA. Στο παράρτημα III δίνονται περιληπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της προσέγγισης HRA για την ανάλυση της επίδρασης του ανθρώπου σε ένα σύστημα καθώς επίσης και της αξιοπιστίας.

Η προσέγγιση της FSA μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε στάδιο του κύκλου ζωής του συστήματος με υποχρεωτικούς κανόνες και κανονισμούς. Από τη στιγμή που η προσέγγιση είναι βασισμένη στον εντοπισμό των κινδύνων και την αξιολόγηση των επικινδυνοτήτων που ελέγχονται από ένα σύστημα διαχείρισης ασφάλειας, υπάρχει το κίνητρο να συσχετισθούν τα επίπεδα ασφάλειας με ειδικούς δυνητικούς κινδύνους και έτσι να επιτευχθεί η ολική εξύψωση της ασφάλειας. Η βασική φιλοσοφία της FSA είναι ευθυγραμμισμένη με το ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν εργαλείο για να διευκολύνει τη διάφανη διαδικασία λήψης αποφάσεων και επιπρόσθετα παρέχει το μέσο προληπτικής λειτουργίας, δίνοντας τη δυνατότητα να εξετάζονται οι πιθανοί κίνδυνοι πριν προκληθεί ένα σοβαρό ατύχημα.

Οι κατευθυντήριες γραμμές έχουν στόχο να διευκολύνουν δοκιμαστικές εφαρμογές της διαδικασίας FSA και θα παραμείνουν ως ενδιάμεσες όσο χρόνο απαιτηθεί προκειμένου να αποκτηθεί εμπειρία. Τέτοιες δοκιμαστικές εφαρμογές θα οδηγήσουν σε μεγαλύτερη κατανόηση της FSA από όλα τα εμπλεκόμενα μέρη, ανεξάρτητα από την τυχόν προηγούμενη εμπειρία τους στην εφαρμογή τεχνικών αξιολόγησης της επικινδυνότητας.

Η μέθοδος FSA συνέβαλλε ώστε οι ερευνητές να μελετήσουν καλύτερα τα **Κριτήρια Αποδοχής Ρίσκου (Risk Acceptance Criteria)**. Ήδη, ο IMO συζητάει για αλλαγή του τρόπου αποδοχής του ρίσκου προτάσσοντας παραμέτρους όπως το κοινωνικό ρίσκο και η πολιτική - κοινωνική αποδοχή.

### 3.8 Βιβλιογραφία 3<sup>ου</sup> κεφαλαίου

#### Ξένη Βιβλιογραφία

- ✚ Donghui Chen, «Simplified Ship Collision Model», Master of Science in Ocean Engineering, Blacksburg, Virginia, January 2000,
- ✚ Karin af Geijerstam, Hanna Svensson, «Ship Collision Risk», Lund University, Sweden, 2008
- ✚ Keith M., Winslow T., «Cargo Ship Bunker Tanks: Designing to mitigate oil spillage», Middlesex University, 2013
- ✚ Otto et al, «Elements of risk analysis for collision and grounding of a RoRo passenger ferry», Marine structurers, 2002
- ✚ Silveira et al, «Assessment of ship collision estimation methods using AIS data», Universidade de Lisboa, Portugal, 2014
- ✚ Sormunen Edvard Otto – Ville, «Mitigating environmental risk on chemical tanker collisions with recovery vessels in the Gulf of Finland», Department of Marketing - Supply Chain Management and Corporate Geography - Hanken School of Economics, Helsinki, Finland, 2011
- ✚ Zhang Shenming, «The Mechanics of Ship Collision», Technical University of Denmark - Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, 1999, Lyngby, Denmark

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

- ✚ Καταρέλος Ε., «Συστημική προσέγγιση της Ασφάλειας και Ποιότητας των Μεταφορών. Ανάπτυξη της μεθοδολογίας SAFE», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου - Σχολή Επιστημών της Διοίκησης – Τμήμα Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών, Χίος, Φεβρουάριος 2004
- ✚ Νομικός Α., «Ανάλυση Ναυτικών Ατυχημάτων σε Δεξαμενόπλοια», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, 2012
- ✚ Σταυρίδης Γ., «Πετρελαϊκή ρύπανση από ατυχήματα Δ/Ξ στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, κανονισμοί – στατιστική διερεύνηση – υποθέσεις εργασίας», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, 2007
- ✚ Σωτήραλης Π., «Πιθανοθεωρητική Μελέτη Διαρροών Πετρελαίου από Δεξαμενόπλοια: Ποσότητες και Κόστος», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Αθήνα, 2011

#### Διαλέξεις / Σεμινάρια / Συνέδρια

- ✚ Samuelides et al, «Studies on the behavior of bottom structures during grounding», Advancements on Marine Structures, 1<sup>st</sup> International Conference on Marine Structures, Glasgow, March 2007
- ✚ Seventh Framework Programme SST–2007–TREN–1 SST.2007.2.2.4. Maritime and logistics co-ordination platform SKEMA Coordination Action “Sustainable Knowledge Platform for the European Maritime and Logistics Industry” SKEMA Consolidation Study, « Review of collision and grounding risk analysis methods which can utilize the historical AIS data and traffic patterns in seawaters», 2011
- ✚ Shijie Yan, «Study on decision-making of Ship collision avoidance», 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012), China, 2012

#### Ιστοσελίδες

International Maritime Organization: [www.imo.org](http://www.imo.org) (Access, March 2014)

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# 4

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ / ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Μετά από τη σύντομη αναφορά στη πυρηνική ενέργεια και τις εφαρμογές της στο Πρώτο Κεφάλαιο, είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι εφαρμογές και η χρήση της πυρηνικής ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, η δομή του πυρηνικού αντιδραστήρα στο πλοίο, ο ανεφοδιασμός των πλοίων και η διαχείριση των πυρηνικών αποβλήτων καθώς και ορισμένα πυρηνικά ατυχήματα στη θάλασσα.

### 4.2 Πυρηνική ενέργεια και θαλάσσιες μεταφορές

Είναι γεγονός, ότι η πυρηνική ενέργεια αντιμετωπίζεται με σκεπτικισμό τόσο από την κοινή γνώμη όσο και από την πολιτική βούληση παγκόσμια. Ο σκεπτικισμός, οφείλεται στα μεγάλα πυρηνικά ατυχήματα που συνέβησαν κατά το παρελθόν και επέφεραν πολύ σοβαρές συνέπειες στην ανθρωπότητα. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, μόνο σε πολεμικές εφαρμογές καθώς και στα παγοθραυστικά της ρώσικης Αρκτικής - για πάνω από εξήντα έτη - χρησιμοποιήθηκε η πυρηνική ενέργεια στα πλοία. Οι όποιες εμπορικές εφαρμογές ήταν σε πειραματικό επίπεδο και δεν ευδοκίμησαν είτε λόγω κόστους κατασκευής είτε, κυρίως, λόγω του σκεπτικισμού της κοινωνίας απέναντι στην ευρεία χρήση της πυρηνικής ενέργειας .

Η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, ωστόσο, καθώς και η μείωση των ρύπων του θερμοκηπίου με κύριο το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), καθιστούν την πυρηνική ενέργεια ως μία ρεαλιστική λύση προς αυτή την κατεύθυνση στη ναυτιλία και μειώνουν τον σκεπτικισμό της κοινής γνώμης απέναντί της. Σύμφωνα με το Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) περίπου το 3% (από 2,7 έως 3,3) των εκπομπών CO<sub>2</sub>, ετησίως, προέρχονται από τη ναυτιλία και υπολογίζεται ότι μέχρι το 2050 θα έχουν φτάσει μεταξύ του 12% και του 18% ετησίως των επιτρεπομένων εκπομπών αερίων CO<sub>2</sub>, κατόπιν του σεναρίου σταθεροποίησης στα 450 ppm όπως έχουν οριστεί από το διεθνές γραφείο ενέργειας (IEA). Αυτό δείχνει ξεκάθαρα, την ανάγκη εξεύρεσης νέων ενεργειακών πηγών που θα μειώνουν τους αέριους ρύπους.

Οι πρώτοι κανονισμοί για τη λειτουργία πλοίων με πυρηνική πρόωση συντάχθηκαν το 1966 από τον **Lloyd's Register**, με τίτλο **Provisional Rules for the Classification of Nuclear Ships**. Κατόπιν ο **IMO**, τη δεκαετία του 1970, υιοθέτησε τον κώδικα **Resolution A.491-XII**, ο οποίος περιείχε όλες τις απαραίτητες οδηγίες για τα πλοία με

χρήση της πυρηνικής ενέργειας για την πρόωσή τους και περιελάμβανε όλους τους διεθνείς κανονισμούς και προτάσεις ασφάλειας για τη χρήση της. Ο κώδικας, περιελάμβανε κανονισμούς ασφαλείας και κριτήρια σε σχέση με την προστασία του ανθρώπινου δυναμικού και του περιβάλλοντος από τυχόν κινδύνους σε σχέση με τη ραδιενέργεια, καθώς επίσης και οδηγίες για το σύστημα ψύξης του αντιδραστήρα, για την ευστάθεια του πλοίου, την αποφυγή πυρκαγιάς, την κατασκευή του σκάφους κλπ.

Το 2011 ο Lloyd's Register δημοσίευσε **προσωρινούς κανόνες (Provisional Rules)** για πλοία με χρήση πυρηνικής ενέργειας για την πρόωσή τους, οι οποίοι επιτρέπουν την κατάταξη σε κλάση ενός τέτοιου σκάφους. Βασικά στοιχεία των προσωρινών κανόνων είναι η συσχέτιση των μηχανολογικών συστημάτων και των συστημάτων ασφαλείας ενός σκάφους με την κατασκευή του πλοίου και την προστασία από τη ραδιενέργεια. Το συνολικό σκεπτικό της διαδικασίας καθορισμού κανόνων, σε αντίθεση με την τρέχουσα πρακτική στη θαλάσσια βιομηχανία, όπου ο σχεδιαστής-κατασκευαστής αρκείται στην τυπική συμμόρφωση με τους κανονισμούς, προϋποθέτει πως στο μέλλον οι πυρηνικές ρυθμιστικές αρχές θα επιθυμούν ο εκάστοτε φορέας εκμετάλλευσης της πυρηνικής μονάδας να επιδεικνύει και την ασφάλή της λειτουργία, πέραν του ασφαλούς σχεδιασμού και κατασκευής.

### 4.3 Χρήση πυρηνικής ενέργειας εν πλω

Η λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα που εγκαθίσταται σε ένα πλοίο με σκοπό την δημιουργία ενέργειας για την πρόωσή, του βασίζεται στην πυρηνική σχάση, όπου πραγματοποιείται ο διαχωρισμός του πυρήνα ενός ατόμου για την παραγωγή περισσότερων μικρότερων πυρήνων και σε μερικά ελεύθερα παραπροϊόντα - σωματίδια όπως είναι τα νετρόνια.

Η διάσπαση του ατόμου έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμικής ενέργειας και την εκπομπή ακτινοβολίας γ. Τα στοιχεία του πυρήνα έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής ώστε ο ανεφοδιασμός ενός πλοίου να είναι απαραίτητος μια φορά περίπου κάθε δέκα χρόνια. Έτσι τα πλοία με πυρηνικό αντιδραστήρα όπως και τα ιστιοφόρα είναι ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες στην προμήθεια των καυσίμων σε κάθε λιμάνι εξαλείφοντας σε μεγάλο βαθμό την δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία πετρέλευσης στη λειτουργική διάρκεια της ζωής ενός πλοίου.

Αν και το κόστος κατασκευής των πυρηνικών στοιχείων καυσίμου είναι υψηλό, το συνολικό κόστος του είναι πολύ χαμηλότερο απ' ότι το κόστος των ορυκτών καυσίμων που απαιτείται για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας ενέργειας. Μια μικρή ποσότητα πυρηνικών καυσίμων παρέχει ενέργεια ισοδύναμη με εκατομμύρια φορές την ποσότητα άνθρακα ή πετρελαίου. Συνυπολογίζοντας το χαμηλό κόστος καυσίμων, τις σχεδόν μηδενικές εκπομπές ρύπων και την εξάλειψη των ανησυχιών για την ασφάλεια του πληρώματος, δημιουργούνται οι προϋποθέσεις ώστε η δημοτικότητα της τεχνολογίας πρόωσης των πλοίων με πυρηνική ενέργεια να αυξάνεται συνεχώς.

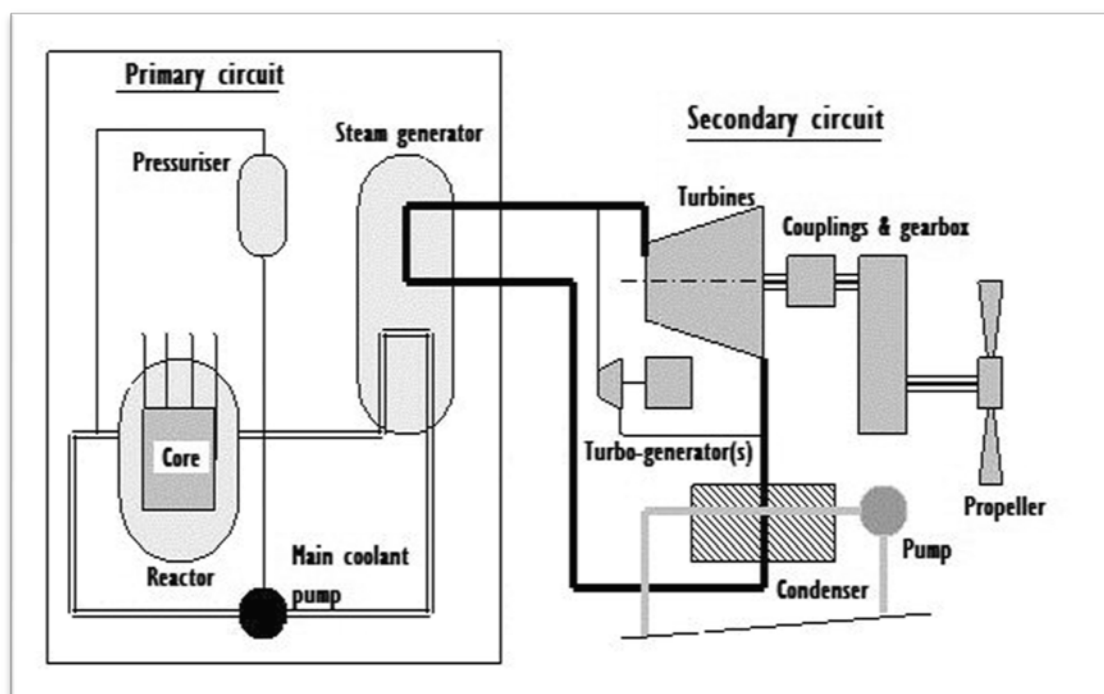


Η θερμότητα που παράγεται από την πυρηνική σχάση στον αντιδραστήρα είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την πρόωση και την λειτουργία του πλοίου.

Για τη διαχείριση αυτής της ενέργειας, ο πυρηνικός σταθμός πρόωσης κατά τη λειτουργία του απαιτεί την συνεχή υπό πίεση επανακυκλοφορία του νερού, ενώ το όλο σύστημα περιέχει δύο υποσυστήματα το πρωτοβάθμιο και το δευτεροβάθμιο (Σχήμα 40).

- **Το πρωτοβάθμιο σύστημα**, αποτελείται από τον αντιδραστήρα, τις αντλίες και την μονάδα παραγωγής του ατμού. Η θερμότητα που εκπέμπεται από τον πυρηνικό αντιδραστήρα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του νερού που κυκλοφορεί με μεγάλη πίεση στα στοιχεία που τον περιβάλλουν (για να αποφευχθεί η ατμοποίηση σε αυτό το στάδιο). Το ζεστό νερό στη συνέχεια οδηγείται στα στοιχεία της μονάδας παραγωγής ατμού, όπου μεταδίδει τη θερμότητα στο νερό χαμηλότερης θερμοκρασίας που κυκλοφορεί εξωτερικά των στοιχείων, χωρίς να αναμιχθεί με αυτό και επιστρέφει στον αντιδραστήρα για επαναθέρμανση. Με τη μετάδοση της θερμότητας ατμοποιείται το νερό που υπάρχει εξωτερικά των στοιχείων και ο ατμός παρέχεται στο δευτεροβάθμιο σύστημα.

- **Το δευτεροβάθμιο σύστημα**, αποτελείται από τον κύριο αμοστρόβιλο, τους μειωτήρες με το σύστημα της κίνησης προς την προπέλα, την ηλεκτρογεννήτρια που κινείται από αμοστρόβιλο, τη συσκευή συμπύκνωσης των εξατμίσεων ατμού και τις αντλίες που τροφοδοτούν τη μονάδα παραγωγής ατμού.



Σχήμα 40 Outline of a PWR marine mechanically-driven propulsion plant – the primary and the secondary circuit (Carlton et al, 2011)

Η τεράστια ποσότητα ατμού που παράγεται στο πρωτοβάθμιο σύστημα χρησιμοποιείται για την λειτουργία του αμοστρόβιλου, που συνδέεται με το σύστημα

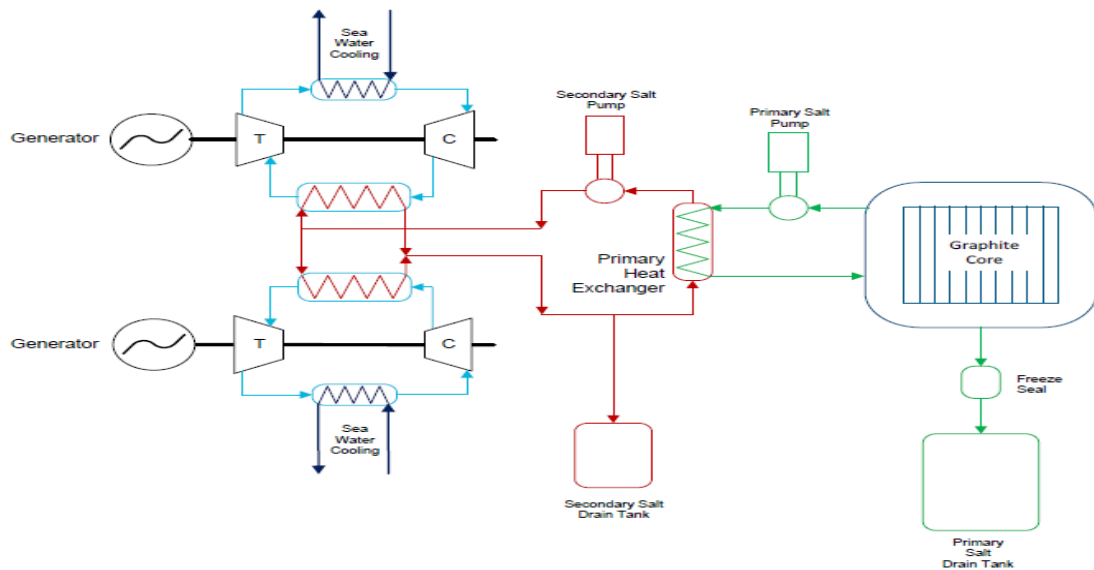
κίνησης της προπέλας και της στροβιλογεννήτριας για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εξατμίσεις των ατμοστροβίλων συμπυκνώνονται και επιστρέφουν ως τροφοδοτικό νερό στη μονάδα παραγωγής ατμού, ενώ το πλεόνασμα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται αποθηκεύεται σε μπαταρίες, για να χρησιμοποιηθεί σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης καλύπτοντας τις ενεργειακές ανάγκες του πλοίου. Οι γενιές των ναυτικών πυρηνικών αντιδραστήρων είναι αντίστοιχες με αυτές των αντιδραστήρων της ξηράς:

- **Generation I:** Υπήρξαν οι πρώτοι αντιδραστήρες του είδους. Κατασκευάστηκαν κατά τις δεκαετίες του 1950 και του 1960 από τις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και την ΕΣΣΔ
- **Generation II:** Αντιδραστήρες LWR, που χρησιμοποιούν φυσικό νερό ως ψυκτικό μέσον χαμηλού εμπλουτισμού ουρανίου που κατασκευάστηκαν από την δεκαετία του 1960 έως και τη δεκαετία του 1990.
- **Generation III:** Αναβαθμισμένοι LWR του τύπου PWR ή αναβαθμισμένοι BWR, με συστήματα ενεργητικής ασφάλειας.
- **Generation III+ :** Αντιδραστήρες τρίτης γενιάς με εξελιγμένα συστήματα ασφάλειας
- **Generation IV:** Αντιδραστήρες προηγμένης σχεδίασης που περιλαμβάνουν συστήματα ψύξης με μόλυβδο, νάτριο, τετηγμένο άλας, υπερκρίσιμο νερό και ήλιο. Αυτού του είδους οι αντιδραστήρες χρησιμοποιούν διαφόρων ειδών πυρηνικά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων οξειδίου, νιτριδίου, καρβιδίου και μετάλλου και μπορούν να βασίζονται σε ουράνιο, πλουτώνιο και θόριο.

Τα τελευταία χρόνια, οι **αντιδραστήρες μικρού και μεσαίου μεγέθους** αποτελούν μία ενδιαφέρουσα προοπτική για τη ναυτιλία, αφού θα μπορούν να έχουν ασφαλέστερο, απλούστερο και τυποποιημένο σχεδιασμό, που σημαίνει ότι θα είναι φθηνότεροι και ευκολότεροι στην κατασκευή. Χωρίζονται σε τρεις τύπους (Hirdaris et al, 2014):

- **Type 1: LWR (Light Water Reactors – Αντιδραστήρες ελαφρού ύδατος)** Αντιδραστήρες PWR ή BWR με χρήση ψυκτικού μέσου το φυσικό νερό και επιβραδυντή νετρονίων
- **Type 2: Fast Neutron Reactor (FNR),** χρησιμοποιούν υγρά μέταλλα ως ψυκτικό μέσο κι επιτρέπουν στα γρήγορα νετρόνια υψηλότερης ενέργειας τη σχάση εντός του αντιδραστήρα. Μπορούν να είναι μικρότερου μεγέθους από τον πρώτο τύπο
- **Type 3: Advanced High Temperature Reactors (HTR),** χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσο είτε υγρό μέταλλο είτε υγρό άλας.

Διαγραμματικά το σύστημα πρόωσης ενός πλοίου με πυρηνική πρόωση, με αντιδραστήρα υγρού άλατος φαίνεται στο Σχήμα 41:



Σχήμα 41 The propulsion system of a nuclear – powered ship with a HTR using liquid salt as coolant (Hill et al, 2012)

Μια σειρά από εναλλακτικές λύσεις πυρηνικής πρόωσης βρίσκονται υπό εξέταση στο πλαίσιο της βελτίωσης της πρόωσης εμπορικών πλοίων στο μέλλον. Αυτές είναι, εκτός από την τους αντιδραστήρες πεπιεσμένου ύδατος (PWR), οι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας με ένα κλειστό κύκλο τουρμπίνας αερίου ηλίου ή ένα αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας με ανοικτό κύκλο αεριοστρόβιλου. Άλλες επιλογές δυνητικά περιλαμβάνουν αντιδραστήρες ζέοντος ύδατος (BWR) και, εν καιρώ, τις πυρηνικές μπαταρίες αν αυτές εγκατασταθούν σε θαλάσσιες εφαρμογές.

Η ποιότητα, η αντοχή και η σταθερότητα των τμημάτων του αντιδραστήρα είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για την αποτελεσματική λειτουργία του. Έτσι τα σημερινά πυρηνοκίνητα πλοία κατασκευάζονται με προηγμένες τεχνολογίες, ασφαλή, με μεγάλα χυτά προστατευτικά του αντιδραστήρα, καλύπτοντας τις αρνητικές κριτικές που έχουν γίνει κατά καιρούς και αφορούν την ασφάλεια του πληρώματος και τους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Ο πυρηνικός αντιδραστήρας ενός πλοίου βρίσκεται, στα ήδη κυκλοφορούντα πυρηνοκίνητα πλοία, πρόωραθεν του μηχανοστασίου σε ειδικά διαμορφωμένο διαμέρισμα, πάνω από τα διπύθμενα στο ύψος περίπου της ισάλου γραμμής του πλοίου.

#### 4.4 Ανεφοδιασμός των αντιδραστήρων και διαχείριση ραδιενεργών αποβλήτων

Το καύσιμο των πυρηνικών αντιδραστήρων «δηλητηριάζεται» από τα παραπροϊόντα της σχάσης και μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, που εξαρτάται από το βαθμό εμπλουτισμού του ουρανίου και τη χρήση του αντιδραστήρα, απαιτείται η αντικατάστασή του. Ο ανεφοδιασμός ενός πυρηνικού αντιδραστήρα με καύσιμο είναι διαδικασία ιδιαίτερος λεπτή και επίπονη (Carlton et al, 2011).

Κατά τον ανεφοδιασμό του αντιδραστήρα προκύπτουν οι ακόλουθες κατηγορίες ραδιενεργών αποβλήτων:

- Υγρά απόβλητα τα οποία είναι κυρίως το υγρό του πρωτεύοντος κυκλώματος ψύξης.
- Στερεά απόβλητα, που είναι φίλτρα του αντιδραστήρα, οι ράβδοι ελέγχου, εξαρτήματα τα οποία χρειάστηκε να αντικατασταθούν κλπ..
- Μικτά απόβλητα (ραδιενεργά και χημικά επικίνδυνα).
- Τα μπλοκ του χρησιμοποιημένου καυσίμου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ανεφοδιασμός ενός αντιδραστήρα μπορεί να δημιουργήσει **150-200 m<sup>3</sup> ραδιενεργών αποβλήτων**.

Απορρίψεις, όμως, υγρών αποβλήτων λαμβάνουν χώρα και εκτός των περιόδων ανεφοδιασμού. Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970 τα Αμερικανικά πυρηνοκίνητα σκάφη συνήθιζαν να απορρίπτουν ποσότητες υγρών αποβλήτων (περίσσειες ή εκτονώσεις του κυκλώματος ψύξης) μέσα στα λιμάνια τους. Η μοναδική επεξεργασία που υφίστατο το νερό ήταν ο καθαρισμός από ιοντοανταλλακτικές ρητίνες. Να σημειωθεί ότι έμμεσα το Αμερικανικό ναυτικό παραδέχεται ότι τέτοιες απορρίψεις εξακολουθούν να λαμβάνουν χώρα, απλά δε γίνονται μέσα στα λιμάνια. Επίσης στη θάλασσα κατέληγαν πριν το 1970 και στερεά απόβλητα σε ειδικές συσκευασίες. Αντίστοιχες πρακτικές ακολουθούσε και η Σοβιετική Ένωση, μέχρι την υπογραφή της Σύμβασης του Λονδίνου για τη Μη Απόρριψη των πυρηνικών καταλοίπων - αποβλήτων.

Σήμερα στις ΗΠΑ υπάρχει μια πιο συστηματική δομή διαχείρισης των ναυτικών πυρηνικών αποβλήτων. Τα μη χαρακτηρισμένα στερεά απόβλητα διατίθενται, συσκευασμένα σε χώρους προκαθορισμένους από τη National Regulatory Committee of the USA (Εθνική Επιτροπή Κανονικοποίησης των ΗΠΑ. Οι ποσότητες αυτών των αποβλήτων για την περίοδο 1961-1993 ανέρχονται σε 176.000 m<sup>3</sup>. Υπάρχουν επίσης τα απόρρητα στερεά απόβλητα τα οποία χαρακτηρίζονται έτσι καθώς είναι δυνατό να δώσουν πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντιδραστήρων. Το 1991 η ποσότητα των απορρήτων στερεών αποβλήτων ανήλθε σε 1.258 m<sup>3</sup>.

Οι εργασίες σε πυρηνικά σκάφη γίνονται σε 6 ναυπηγεία-βάσεις του ναυτικού στις ΗΠΑ. Πρόκειται για τα ναυπηγεία Norfolk, Mare Island, Portsmouth, Charleston, Pearl Harbor και Puget Sound.

Στην Μεγάλη Βρετανία τα χρησιμοποιημένα μπλοκ καυσίμου αποθηκεύονται στο Sellafield κοντά στη Γλασκόβη. Ελάχιστα πράγματα είναι γνωστά για την κατάσταση στη Γαλλία και ακόμη λιγότερα για την Κίνα.

Στη Ρωσία τα πράγματα είναι πιο δύσκολα, κυρίως λόγω της έλλειψης των απαραίτητων πόρων για τη σωστή διαχείριση, αλλά και λόγω των αυξημένων ποσοτήτων μια και πολλά Ρωσικά Υ/Β έχουν 2 αντιδραστήρες και επομένως ανεφοδιάζονται πιο συχνά. Χαρακτηριστικό είναι, ότι σύμφωνα με εκτιμήσεις της

Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών, οι κανονικές εργασίες ανεφοδιασμού και συντήρησης των πυρηνικών Υ/Β, των τριών πυρηνοκίνητων καταδρομικών και των 7 παγοθραυστικών, δημιουργού σε ετήσια βάση, 6.000 m<sup>3</sup> στερεά ραδιενεργά απόβλητα και 15.000 m<sup>3</sup> υγρά ραδιενεργά απόβλητα. (Δελημπάσης, 2002).

Η Διεθνής Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας έχει εκδώσει κανονισμούς για την ασφαλή μεταφορά των ραδιενεργών υλικών με την ονομασία **Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material**. Πρωτοεκδόθηκαν το 1961 και η βασική τους φιλοσοφία είναι ότι η ασφάλεια επιτυγχάνεται με την ασφαλή συσκευασία (packaging) ανεξαρτήτως του μέσου. Ο IMO, επίσης, το 1971, εξέδωσε για πρώτη φορά τον κώδικα **International Code for the Safe Carriage of Packaged Irradiated Nuclear Fuel, Plutonium and High-Level Radioactive Wastes on Board Ships - INF code** που αφορά την ασφαλή μεταφορά με πλοία πυρηνικών αποβλήτων, καυσίμων και γενικότερα ραδιενεργών υλικών. Το 1993 ο κώδικας INF εμπλουτίστηκε και από τον Ιανουάριο του 2001 κατέστη υποχρεωτικός. Τέλος, στο **κεφάλαιο 8 της συνθήκης SOLAS** περιλαμβάνονται οι συστάσεις για τα πλοία που χρησιμοποιούν πυρηνική πρόωση με τον κώδικα **Code of Safety for Nuclear Merchant Ships**, ο οποίος το 1981 υιοθετήθηκε στο ακέραιο από τον IMO.

#### 4.5 Μη πολεμικές θαλάσσιες εφαρμογές πυρηνοκίνητων πλοίων

Παρόλο που σε επίπεδο στρατιωτικών εφαρμογών, η πυρηνική ενέργεια βρήκε πρόσφορο έδαφος, σε επίπεδο εμπορικών εφαρμογών δεν συνέβη το ίδιο. Είναι, όμως γεγονός ότι στο μέλλον θα αποτελούν μία αξιόπιστη πρόταση, καθώς υπολογίζεται ότι η μέση ταχύτητα ενός bulk carrier θα μπορεί να φτάσει τους 20 κόμβους και ενός containership τους 30 με τη χρήση πυρηνικής πρόωσης. Οι λόγοι για τους οποίους η πυρηνική ενέργεια δεν έχει βρει πρόσφορο έδαφος στην εμπορική ναυτιλία συνοψίζονται ως εξής (Δελημπάσης, 2002, Anitropov et al, 2007, Hass, 2014, Carlton et al, 2011) :

- i. **Το κόστος** ενός μικρού πυρηνικού αντιδραστήρα παραμένει ακόμα υψηλό.
- ii. **Παλαιότερα, η διαφορά** του κόστους μεταξύ του πετρελαίου και του πυρηνικού καυσίμου **δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλη**.
- iii. **Η έντονη κοινωνική κριτική** ιδιαίτερα μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο και τις πυρηνικές βόμβες αλλά και μετά από τα κατά καιρούς πυρηνικά ατυχήματα που έφεραν αβεβαιότητα στους υποψήφιους επενδυτές.
- iv. **Οι περισσότερες έρευνες** έχουν επικεντρωθεί σε εφαρμογές πλοίων υψηλών ταχυτήτων – γρήγορων διελεύσεων, πράγμα που σημαίνει ότι **δεν αγγίζουν το σύνολο της εμπορικής ναυτιλίας** και απευθύνονται σε επενδυτές – εφοπλιστές με υψηλό κεφάλαιο. Σημειωτέον, ότι τα ασφάλιστρα αυτών των πλοίων παραμένουν υψηλά, παρόλα αυτά το συνολικό κόστος λειτουργίας τους είναι πολύ μικρότερο.

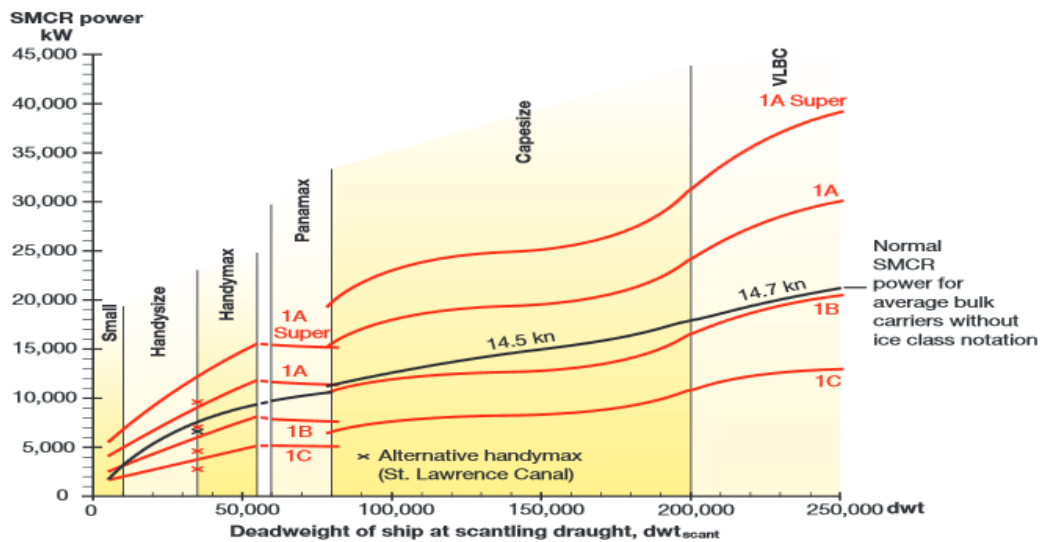
- v. **Η έλλειψη τεχνογνωσίας στα ναυπηγεία** και το υψηλό κόστος κατασκευής εξαιτίας ακριβώς του γεγονότος ότι λίγα ναυπηγεία αναλαμβάνουν παγκόσμια τη ναυπήγηση πυρηνοκίνητων πλοίων.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα εμπορικά πλοία που χρησιμοποιούν την πυρηνική πρόωση και γίνεται αναφορά και σε μελλοντικές εφαρμογές.

Η πυρηνική πρόωση έχει αποδειχθεί τεχνικά και οικονομικά απαραίτητη για τη ρωσική Αρκτική, όπου οι συνθήκες λειτουργίας είναι τέτοιες που δεν μπορούν να ανταποκριθούν τα συμβατικά **παγοθραυστικά**. Τα επίπεδα ενέργειας που απαιτούνται για το σπάσιμο πάγου μέχρι 3 μέτρα πάχος, σε συνδυασμό με τις δυσκολίες ανεφοδιασμού για άλλους τύπους πλοίων, είναι σημαντικοί παράγοντες που καθιστούν ανέφικτη τη χρήση των υπάρχοντων συμβατικών πλοίων (Δελημπάσης, 2002).

Η αρχή έγινε μόλις το 1957 με το Σοβιετικό παγοθραυστικό «Λένιν» το οποίο ήταν και το πρώτο σκάφος επιφανείας που έφτασε στο Βόρειο πόλο. Το «Λένιν» παροπλίστηκε το 1989, όμως σήμερα υπάρχουν 7 άλλα παγοθραυστικά που χρησιμοποιούνται από τη Ρωσία για τη διευκόλυνση της ναυσιπλοΐας στις βόρειες ακτές της χώρας. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 χρησιμοποιούνται επίσης και ως κρουαζιερόπλοια, για ταξίδια στο Βόρειο Πόλο κάποια από αυτά. Η χρήση της πυρηνικής πρόωσης σε αυτά τα πλοία καθίσταται απαραίτητη διότι τα παγοθραυστικά έχουν αυξημένες ενεργειακές ανάγκες να καλύψουν λόγω του σκοπού για τον οποίο ναυπηγήθηκαν. Επομένως, εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους του πυρηνικού καυσίμου που σημαίνει ξεκάθαρα και επίτευξη μεγαλύτερων ταχυτήτων χωρίς ιδιαίτερο κόστος καθώς και λειτουργία σε μεγάλη ισχύ, καθώς και του μεγάλου χρόνου για ανεφοδιασμό καυσίμου (περίπου ανά δέκα χρόνια) υπήρξε επιτυχής η ναυπήγηση παγοθραυστικών στη ρωσική Αρκτική.

Στο παρακάτω Σχήμα, 42, φαίνεται η σχέση ισχύος – νεκρού βάρους στο βύθισμα  $T_{scantling}$  για διάφορα είδη πλοίων τύπου bulk carrier που χαρακτηρίζονται ως παγοθραυστικά και χρησιμοποιούν έλικες μεταβλητού βήματος. Φαίνονται ξεκάθαρα οι αυξημένες ανάγκες σε ισχύ των παγοθραυστικών πλοίων.



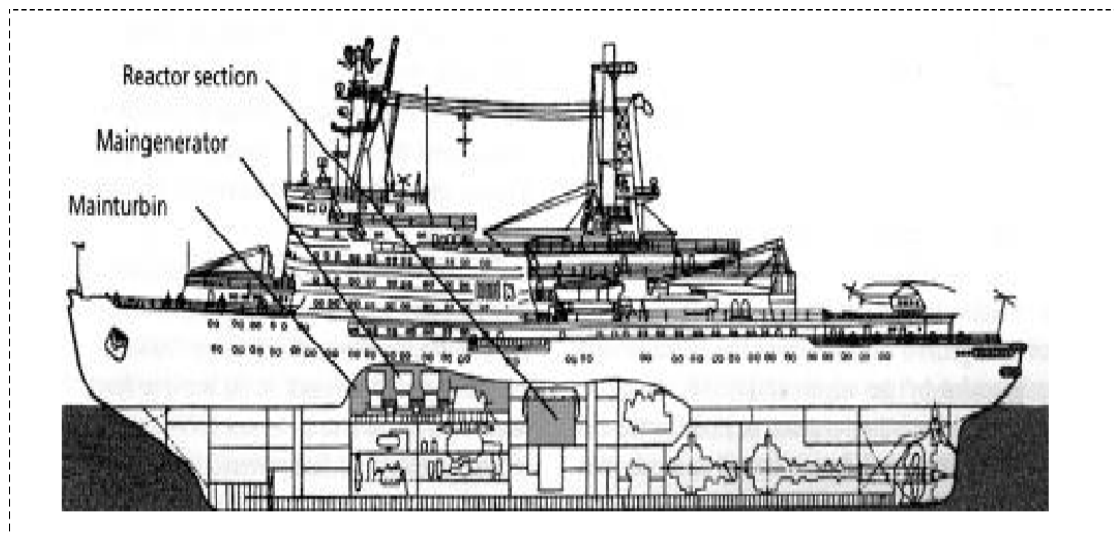
Σχήμα 42 Minimum required propulsion SMCR power for average size bulk carriers with Finnish-Swedish ice-class notation for Controllable Pitch propellers (Fixed Pitch propellers add +11%). The red lines represent the power requirements of ice-class vessels. (Haas, 2014)

Να σημειωθεί πως η Ρωσία διαθέτει κι ένα πλοίο τύπου LASH CARRIER, το Sevnoport, που περιγράφεται παρακάτω (έτος ναυπήγησης 1988) με πυρηνική πρόωση καθώς κι ένα πλοίο μεταφοράς μεταλλευμάτων αποτελώντας το κράτος με το μεγαλύτερο στόλο πλοίων με πυρηνική πρόωση. Δεν ισχύει το ίδιο για άλλες μεγάλες Πυρηνικές υπερδυνάμεις, όπως πχ η Γαλλία που δεν διαθέτει κανένα απολύτως πυρηνοκίνητο πλοίο.

Στο Σχήμα 43 φαίνεται μία φωτογραφία του πλοίου Λένιν και στο Σχήμα 44, ένα διάγραμμα – σχέδιο του ρώσικου παγοθραυστικού Arktika το οποίο κατασκευάστηκε το έτος 1975.



Σχήμα 43 Russian icebreaker LENIN. The first nuclear – powered surface ship (constructed at 1957)



Σχήμα 44 Schematic of Russian Nuclear Icebreaker Arktika showing emplacement of nuclear reactor at its centre (Ragheb, 2014)

Πλέον, τα περισσότερα παγοθραυστικά είναι με πυρηνική πρόωση ενώ οι παραγγελίες του 2012 για τη νέα σειρά LK-60 παγοθραυστικών θεωρείται πρωτοποριακή. Τα πλοία αυτής της σειράς, με χαρακτηριστικά  $L_{pp}=173\text{ m}$ ,  $B=34\text{ m}$ ,  $\Delta=33530\text{ tons}$  έχουν σχεδιαστεί για να σπάνε πάγο πάχους 3m με ταχύτητα έως και 2 knots. Τα πλοία της σειράς LK-60 θα τροφοδοτούνται από δύο RITM-200 αντιδραστήρες των 175 MW με χρήση χαμηλού εμπλουτισμού καυσίμου (<20%), που εξασφαλίζουν η κάθε μία συνολικά 60 MW στις τρεις έλικες μέσω ενός δίδυμου στροβιλογεννητήριων και τρεις κινητήρες. Στο 65% της χωρητικότητας, ο ανεφοδιασμός είναι κάθε 7-10 χρόνια κι η αναμόρφωση στα 20 έτη, με διάρκεια ζωής 40 χρόνια. Έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν στη Δυτική Αρκτική - στα Μπάρεντς, στη Pechoa και τη Θάλασσα Κάρα, καθώς και σε ρηγά νερά του ποταμού Yenissei και Ob Bay, για πλοήγηση όλο το χρόνο αλλά και ως ρυμουλκά δεξαμενόπλοιων, πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου και σκαφών με ειδικό εξοπλισμό για την εξόρυξη ορυκτών στην Αρκτική. Το πρώτο πλοίο της σειράς αναμένεται να παραδοθεί στα τέλη του 2017.

Πέρα, όμως, από τα παγοθραυστικά κατά καιρούς κατασκευάστηκαν πλοία με πυρηνική πρόωση, χωρίς να έχουν εμπορική επιτυχία σε σχέση με τα συμβατικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα πλοίων αποτελούν:

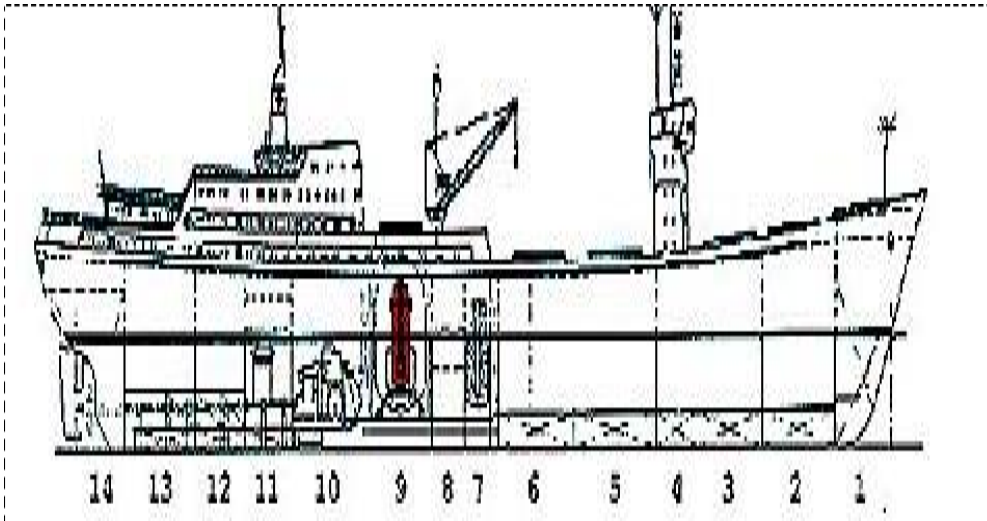
- I. Το 22.000 τόνων **NS Savannah**, κατασκευής ΗΠΑ που παροπλίστηκε το 1970, λόγω μη συμφέρουσας οικονομικής λειτουργίας. Το συγκεκριμένο πλοίο ήταν επιβατηγό αλλά και μεταφοράς φορτίου και ναυπηγήθηκε το 1959 αλλά τέθηκε σε λειτουργία το 1962 για δέκα μόλις έτη (Σχήμα 45).





Σχήμα 45 The NS SAVANNAH (IMO 5314793)

- II. Το γερμανικής κατασκευής 15.000 τόνων **Otto Hahn**, πλοίο μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην με σκοπό την έρευνα της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας εν πλω, το οποίο έπλευσε περίπου 650.000 ναυτικά μίλια σε 126 δρομολόγια σε διάστημα δέκα ετών χωρίς τεχνικά προβλήματα. Ναυπηγήθηκε το 1964 και το 1974 μετατράπηκε σε ντιζελοκίνητο (Σχήμα 46).



Σχήμα 46 The NS Otto Han (Ragheb, 2014)

- III. Το 8000 τόνων ιαπωνικό **NS Mutsu** που κατασκευάστηκε το 1974 και σήμερα χρησιμοποιείται ως ωκεανογραφικό πλοίο για ερευνητικούς σκοπούς.

Τα τρία αυτά πλοία χρησιμοποιούσαν ως καύσιμο ουράνιο, χαμηλού βαθμού εμπλουτισμού.

Επίσης, χαρακτηριστικό παράδειγμα εμπορικού πλοίου είναι το NS Sevmorput που εξυπηρετεί κυρίως τα βόρεια λιμάνια της Σιβηρίας. Πρόκειται πλοίο εκτοπίσματος

61.900 tons και μήκους 260 m τύπου LASH CARRIER (μεταφοράς φορτηγίδων) και μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με παγοθραυστικό τόξο ικανό να σπάσει 1,5 μέτρο πάγου. Τροφοδοτείται από έναν αντιδραστήρα KLT-40 με 135 MWt ηλεκτροπαραγωγή που παρέχουν 32,5 MW ισχύ στην έλικα. Χρειάστηκε ανεφοδιασμού μόνο μία φορά το 2003. Ο αντιδραστήρας ήταν να παροπλιστεί το 2014, αλλά η αρμόδια υπηρεσία ενέκρινε μετά από επιθεώρηση το πλοίο, έτσι ώστε αυτό να επιστρέψει στην υπηρεσία το 2016.



Σχήμα 47 Russian Lash – Carrier Sevmorput (Constructed at 1988)

Τέλος, από το 2016 αναμένονται τα πρώτα ρωσικά πλωτά πυρηνικά εργοστάσια, με το πρώτο σκάφος της σειράς, το *Akademik Lomonosov*, το οποίο θα έχει δύο πλωτούς αντιδραστήρες KLT-40, τροποποιημένους με τέτοιο τρόπο ώστε να χρησιμεύσουν σαν πάροχοι ενέργειας. Το συνολικό του εκτόπισμα θα είναι 21.500 τόνοι και θα διαθέτει πλήρωμα 69 άτομα. Ο σταθμός θα παράγει 70 MWt ηλεκτρικής ενέργειας, ικανή για τις ανάγκες 200,000 ατόμων, ενώ επίσης, το εν λόγω σκάφος θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί και ως μονάδα αφαλάτωσης, παρέχοντας 240.000 κυβικά μέτρα πόσιμου νερού ημερησίως. Ήδη 15 χώρες έχουν εκφράσει ενδιαφέρον για αυτά τα πλοία, ιδιαίτερα μετά τη τραγωδία της Fukushima το 2011. Δημιουργός του εγχειρήματος είναι η εταιρία OKBM Afrikanton που ισχυρίζεται πως τα συστήματα θα είναι σαφώς καλύτερα από τα επίγεια.

Στο παρακάτω Σχήμα, 48, διακρίνονται κάποια χαρακτηριστικά του πλωτού σταθμού από μία μακέτα που δόθηκε από την κατασκευάστρια εταιρεία:



Σχήμα 48 The design of the first floating nuclear power station - longitudinal section of a FNPP (ROSATOM, 2007)

1. Living area. 2. Nuclear Power Plant operating room. 3. Reactors. 4. Steam Turbine installation. 5. Power Generation area. 6. Storage area for spent fuel

#### 4.6 Βασικά αρχές ασφάλειας πυρηνικών αντιδραστήρων σε πλοία – Παθητική ασφάλεια

Η ασφάλεια ενός πλοίου με μέσο πρόωσης την πυρηνική ενέργεια, αποτελεί από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας στις μέρες μας. Η πυρηνική πρόωση θεωρείται γενικά ασφαλής. Ελάχιστα πυρηνικά ατυχήματα έχουν συμβεί στο θαλάσσιο περιβάλλον παγκόσμια και ακόμη λιγότερα από αυτά ήταν θανατηφόρα. Παρόλα αυτά, η μελέτη των κινδύνων ασφάλειας είναι διαρκής κι αναγκαία εφόσον υπάρξει μεγαλύτερη εφαρμογή της πυρηνικής πρόωσης για πολιτικούς σκοπούς.

Υπάρχουν δύο τύποι ασφάλειας στα πλοία με χρήση πυρηνικής πρόωσης. Από τη μία είναι ο ίδιος ο αντιδραστήρας και ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκε και από την άλλη το πλοίο αυτό καθ' εαυτό.

Οι κίνδυνοι αστοχίας ενός πυρηνικού αντιδραστήρα σε πλοίο (on-board) είναι οι εξής (Δελημπάσης, 2002, Anitropov et al, 2007, Carlton et al, 2011, Hass, 2014, Hirdaris et al, 2014):

- Προσάραξη
- Σύγκρουση με άλλο πλοίο, βραχονησίδα ύφαλο κτλ
- Υψηλοί κυματισμοί-κακές περιβαλλοντικές συνθήκες
- Αστοχία στον αμοστρόβιλο

- Διάβρωση σωλήνων μεταφοράς ψυκτικού υγρού
- Δυσλειτουργία στο σύστημα μεταφοράς ατμού
- Διακοπή ηλεκτροδότησης
- Πρόβλημα στο σύστημα απάντλησης υδάτων

Τα ναυτικά ατυχήματα τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε πρόβλημα στον πυρηνικό αντιδραστήρα ενός πλοίου είναι: η προσάραξη, η σύγκρουση, η πυρκαγιά, η τρομοκρατική επίθεση και η πειρατεία, η κακή συντήρηση του φορτίου (πετρελαιοφόρα), η βύθιση λόγω καιρικών συνθηκών, η έκρηξη σε οποιοδήποτε σημείο του πλοίου.

Ιδιαίτερα για το ζήτημα της πυρκαγιάς, δεν θα πρέπει να υπάρχει μεγαλύτερη ανησυχία σε σχέση με τα συμβατικά πλοία αφού σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα δεν περιέχονται εύφλεκτοι υδρογονάνθρακες.

Επιπλέον, κίνδυνοι όπως η τοποθέτηση του καυσίμου στον αντιδραστήρα, η ρύθμιση των συστημάτων ασφαλείας του αντιδραστήρα, η απομάκρυνση δειγμάτων από το πρωτεύον κύκλωμα ψύξης και τον πυρήνα του αντιδραστήρα, η έναρξη λειτουργίας του αντιδραστήρα καθώς επίσης και η διαχείριση των αποβλήτων μαζί με την αποβολή - απενεργοποίηση του ραδιενεργού υλικού και ο καθαρισμός των ραδιενεργών αερίων, είναι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη για το σχεδιασμό και τη μελέτη ενός σκάφους με πυρηνική πρόωση.

Είναι ξεκάθαρο, λοιπόν, πώς για την κατασκευή πλοίου με πυρηνική πρόωση, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι παράγοντες κινδύνου ενός ναυτικού ατυχήματος, όπως περιγράφονται στο αμέσως προηγούμενο κεφάλαιο αλλά και οι παράγοντες κινδύνου που προκύπτουν από τη μελέτη ενός πυρηνικού αντιδραστήρα. Βασική αρχή της **SOLAS** είναι η προστασία της ανθρώπινης ζωής. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η ασφάλεια ενός πυρηνικού αντιδραστήρα λογίζεται ως **παθητική ασφάλεια**. Θα πρέπει δηλαδή να μπορεί το πλήρωμα να εγκαταλείψει ασφαλώς το πλοίο σε περίπτωση ατυχήματος έχοντας τερματίσει τη λειτουργία του αντιδραστήρα. Παθητική ασφάλεια σημαίνει, ότι ο αντιδραστήρας δεν χρειάζεται ενεργή ψύξη για να μην καταστραφεί ο πυρήνας (τήξη πυρήνα – core meltdown). Στις υπάρχουσες εφαρμογές δεν υπάρχει επαρκής παθητική ασφάλεια καθώς και μετά τον τερματισμό της λειτουργίας ενός αντιδραστήρα συνεχίζεται η παραγωγή νετρονίων κι άρα και η παραγωγή θερμότητας. Σε αντίθεση με τις εφαρμογές της ξηράς, όπου ένα ειδικό συνεργείο τεχνικών, μηχανικών κι επιστημόνων μπορεί να επισκεφτεί τον τόπο του ατυχήματος και να διορθώσει, έστω και μερικώς το πρόβλημα. Είναι, λοιπόν, σαφές ότι στην περίπτωση των θαλάσσιων εφαρμογών μόνο αντιδραστήρες που δεν επέρχεται τήξη του πυρήνα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν σε υπό μελέτη και κατασκευή πυρηνοκίνητα πλοία. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι οι αντιδραστήρες 4<sup>ης</sup> γενιάς είναι οι πλέον κατάλληλοι για τις ναυτικές εφαρμογές καθώς και του τύπου 3 των μικρών και μεσαίων μεγεθών, όπως περιγράφηκε πιο πάνω λόγω των

αυξημένων συστημάτων ασφαλείας που διαθέτουν. Εξαιρετική εφαρμογή θα ήταν ο αντιδραστήρας με ψυκτικό μέσον το υγρό άλας που παρουσιάστηκε και στο σχήμα. Σε αυτό το σύστημα τα προϊόντα σχάσης περιέχονται εντός του ψυκτικού άλατος. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, το υγρό ψυκτικό αποστραγγίζεται μέσα σε μία δεξαμενή όπου στερεοποιείται και αποβάλλει θερμότητα διάσπασης της μέσω των φυσικών μέσων. Επίσης, ένα είδος αντιδραστήρων που βρίσκεται σε πολύ πρώιμο στάδιο μελέτης (4<sup>ης</sup> γενιάς) είναι οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες. Και σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται παθητική ασφάλεια και είναι δυνατόν η εγκατάλειψη του πλοίου, μετά από ναυτικό ατύχημα χωρίς να συμβεί περεταίρω και κάποιο ατύχημα στον πυρήνα.

Βασική επίσης παράμετρος αποτελεί και η αρχική σχεδίαση κάποιου αντιδραστήρα έτσι ώστε με την αύξηση της θερμοκρασίας να μειώνεται η παραγόμενη ισχύς. Αυτό συμβαίνει διότι, τα στοιχεία καυσίμου με την αύξηση της θερμοκρασίας, διαστέλλονται, οπότε τα νετρόνια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να χάσουν άτομα καυσίμου (τα νετρόνια απορροφώνται από μη συστατικά καυσίμου στον πυρήνα, από τη βιολογική θωράκιση, ή απλά ξεφεύγουν από τον αντιδραστήρα).

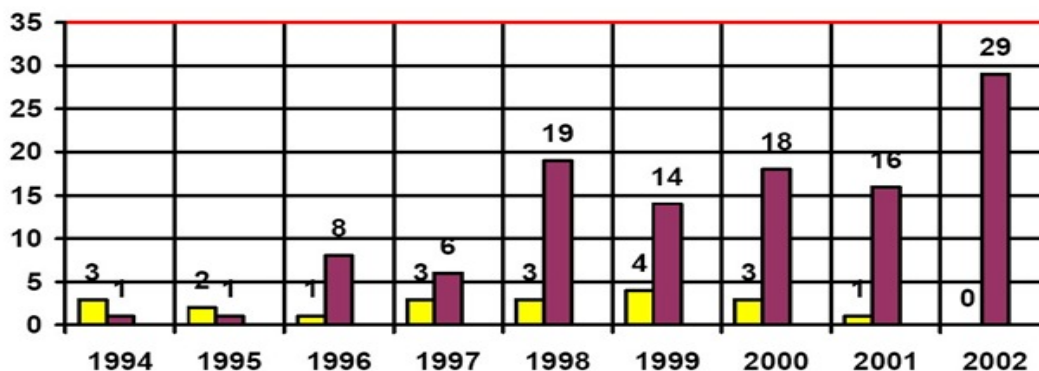
Η παθητική ασφάλεια, επομένως είναι το κύριο χαρακτηριστικό εκείνο που θα πείσει και την κοινή γνώμη αλλά και τους αρμόδιους φορείς και πολιτικούς, ότι η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για εμπορικούς σκοπούς στη ναυτιλία είναι εφικτή.

Η παθητική ασφάλεια συνοψίζεται επομένως στις εξής τρεις παραμέτρους:

- ✓ Στην προστασία του ανθρώπου και του περιβάλλοντος και όταν το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι και κατά τη διάρκεια του πλου από μη αποδεκτούς κινδύνους, από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία, από ναυτικό ατύχημα.
- ✓ Στην ομαλή λειτουργία του πλοίου.
- ✓ Στην ασφαλή «συνεργασία» του πυρηνικού αντιδραστήρα με όλα τα υπόλοιπα συστήματα του πλοίου.

#### **4.7 Πυρηνικά ατυχήματα στο θαλάσσιο περιβάλλον - Πυρηνικά Υποβρύχια**

Στο σημείο αυτό, στο Σχήμα 49, παρουσιάζονται τα ατυχήματα που έχουν συμβεί σε ρώσικα παγοθραυστικά από το 1994 έως το 2002. Με κίτρινο οι δυσλειτουργίες που επέφεραν την εκκίνηση των έκτακτων συστημάτων ασφαλείας.



Σχήμα 49 The number of malfunctions during the period 1994-2002 on board atomic icebreakers which is alarming (www.marinebuzz.com, 2009)

Yellow = malfunctions leading to a start of the emergency response systems; violet = all other incidents.

Επιπλέον αυτών χαρακτηριστικά ατυχήματα που συνέβησαν σε πλοία με πυρηνική πρόωση είναι τα εξής:

- Το 1965 κατά τη διάρκεια επισκευών και ανεφοδιασμού του NS Lenin, ανακαλύφθηκε σοβαρή μηχανική βλάβη στην περιοχή που βρίσκεται το καύσιμο, καθώς αφαιρούταν καύσιμο από τον αντιδραστήρα 2. Διαπιστώθηκε ότι κατόπιν ανθρώπινου λάθους, ο πυρήνας του αντιδραστήρα είχε αφεθεί χωρίς ψύξη νερού.
- Στο ίδιο πλοίο, το 1967 στο δίκτυο σωληνώσεών του, του τριτογενούς κυκλώματος, διαπιστώθηκε διαρροή από τη φόρτωση των πυρηνικών καυσίμων. Για να διαπιστωθεί η διαρροή άνοιξε η βιολογική ασπίδα του θαλάμου του αντιδραστήρα.
- Το 1970 στο NS Mutsu, κατά το πρώτο του ταξίδι, παρατηρήθηκε έντονη έκλυση της ακτινοβολίας Γαμμα καθώς και νετρονίων. Τα νετρόνια είχαν διαρρεύσει από το διάκενο μεταξύ αντιδραστήρα και της κύριας ασπίδας και χτυπώντας τη δεύτερη ασπίδα παρήγαγαν ακτίνες Γάμμα.

Τα πλέον, όμως, χαρακτηριστικά πυρηνικά ατυχήματα στο θαλάσσιο περιβάλλον αποτελούν τα ατυχήματα σε πυρηνικά υποβρύχια.

Από κατασκευής των πρώτων ηλεκτροκίνητων Υ/Β τα διαμερίσματα των μπαταριών ήταν τα πιο ευάλωτα σε εκρήξεις και φωτιές, ενώ υψηλό βαθμό επικινδυνότητας είχαν και τα διαμερίσματα αποθήκευσης και χρήσης των τορπιλών. Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας για την πρόωση, η προσθήκη πολλών χιλιομέτρων ηλεκτρικών καλωδιώσεων λόγω των εξελιγμένων οπλικών και άλλων συστημάτων, η προσθήκη όπλων (τορπίλες, πύραυλοι) με ισχυρότερη γόμωση και πολύ συχνά με ασταθή υγρά καύσιμα, προσέθεσε παράγοντες επικινδυνότητας. Παρακάτω παρατίθενται τα πλέον χαρακτηριστικά ατυχήματα με πυρηνικά υποβρύχια (Δελημπάσης, 2002).

- Ένα από τα πρώτα περιστατικά που ανέδειξαν τα προβλήματα της χρήσης της πυρηνικής ενέργειας για την πρόωση των Υ/Β έλαβε χώρα στις 4 Ιουλίου του 1961. Το Σοβιετικό SSBN K-19 (Π658, Hotel) έπλεε στο Β. Ατλαντικό

συμμετέχοντας σε ασκήσεις, όταν εντοπίστηκε μια διαρροή στο πρωτεύον κύκλωμα ψύξης του αντιδραστήρα. Η διαρροή βρισκόταν σε μη προσπελάσιμο σημείο του σκάφους και προκάλεσε πτώση της πίεσης στο πρωτεύον κύκλωμα απαγωγής θερμότητας. Το αποτέλεσμα ήταν η υπερθέρμανση του αντιδραστήρα και καθώς δεν υπήρχε εφεδρικό σύστημα επαναφοράς και διατήρησης της πίεσης στο κύκλωμα ψύξης, ο κίνδυνος μιας ανεξέλεγκτης αλυσιδωτής αντίδρασης ήταν μεγάλος. Οι μηχανικοί του σκάφους κατόρθωσαν να επινοήσουν μια αυτοσχέδια διάταξη για την τροφοδοσία ψυκτικού στον αντιδραστήρα η οποία επέτρεψε έστω και την τελευταία στιγμή τον έλεγχο της κατάστασης. Όμως κατά τη διάρκεια των εργασιών για την αντιμετώπιση της βλάβης πολλοί αξιωματικοί και ναύτες αναγκάστηκαν να εργαστούν στο διαμέρισμα του αντιδραστήρα υπό συνθήκες υψηλής ραδιενέργειας η οποία προερχόταν από αναθυμιάσεις και ατμούς.

- Το πρώτο πυρηνικό Y/B που χάθηκε ήταν το Αμερικανικό SSN-593 Thresher. Στις 10 Απριλίου 1963, σε απόσταση 200 μιλίων από τις ακτές της Νέας Αγγλίας το Αμερικανικό Y/B εκτελούσε ασκήσεις μετά από μετασκευή, όταν χάθηκε άτακτο. Σύμφωνα με την επιτροπή που ερεύνησε το ατύχημα, ένα σωλήνας θαλασσινού νερού που περνούσε μέσα από το μηχανοστάσιο έσπασε και πλημμύρισε το διαμέρισμα βραχυκυκλώνοντας τον κεντρικό ηλεκτρικό πίνακα. Το αποτέλεσμα ήταν η πλήρης απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας και η αδυναμία λειτουργίας του αντιδραστήρα.
- Στις 22 Μαΐου 1968 τα υδρόφωνα του SOSUS κατέγραψαν τους ήχους ενός Αμερικανικού Y/B που κατέβαινε σε μεγάλο βάθος, με σαφείς ενδείξεις πλημμυρισμένου κελύφους. Επρόκειτο για το SSN-589 Scorpion (Skipjack), το ναυάγιο του οποίου εντοπίστηκε 6 μήνες αργότερα 400 μίλια νοτιοδυτικά των Αζορών. Το πόρισμα μιας επιτροπής το 1970 υποστήριξε την εκδοχή έκρηξης στο διαμέρισμα των μπαταριών του Y/B η οποία οδήγησε σε μεγάλη εισροή υδάτων στο εσωτερικό του σκάφους, απώλεια πλευστότητας και πρόωσης.
- Το πρώτο Σοβιετικό πυρηνικό Y/B που χάθηκε ήταν το K-8 (Π627Α, November SSN). Στις 8 Απριλίου του 1970 και ενώ το K-8 επέστρεφε από την άσκηση Ωκεανός, δύο φωτιές άρχισαν ταυτόχρονα στο 3<sup>ο</sup> και το 8<sup>ο</sup> διαμέρισμα του σκάφους. Το Y/B αναδύθηκε αλλά το πλήρωμα δεν κατόρθωσε να τις σβήσει, ενώ τα συστήματα ασφαλείας του αντιδραστήρα επενέβησαν και άφησαν το K-8 χωρίς ενέργεια. Οι εφεδρικοί νηξελοκινητήρες δεν λειτούργησαν. Οι προσπάθειες του πληρώματος να διατηρήσουν την πλευστότητα του σκάφους απέβησαν άκαρπες και 3 μέρες αργότερα το K-8 βυθίστηκε. Ένα μέρος του πληρώματος διασώθηκε από παραπλέοντα πλοία, αλλά 52 μέλη πληρώματος παρασύρθηκαν στο βυθό. Ο κυβερνήτης και 4 ακόμα αξιωματικοί προσπάθησαν, ενώ το σκάφος βυθιζόταν, να χρησιμοποιήσουν τον κώδωνα διαφυγής ο οποίος όμως ήταν πλημμυρισμένος και γεμάτος τοξικά αέρια. Μόνο ένας αξιωματικός διασώθηκε. Το K-8 βρίσκεται και σήμερα σε βάθος 4.680m στο Βισκαϊκό Κόλπο.

- Το Σεπτέμβριο του 1977 ένα Delta I SSBN υποχρεώθηκε να ρίξει στη θάλασσα μια πυρηνική κεφαλή μετά από διαρροή καυσίμου στο συγκεκριμένο σωλήνα. Το πλήρωμα αναγκάστηκε να ανοίξει την καταπακτή για να εκτονωθεί η πίεση. Το περιστατικό έλαβε χώρα κοντά στο Πετροπαβλόσκ σε μικρό βάθος, και η κεφαλή ανασύρθηκε αργότερα.
- Το K-429 (Π670M, Charlie I SSGN) διαθέτει το θλιβερό προνόμιο να είναι το μοναδικό Y/B που έχει βυθιστεί δύο φορές. Στις 24 Ιουνίου του 1983 βυθίστηκε σε μικρό βάθος ανοικτά του Βλαδιβοστόκ λόγω φωτιάς, παρασέρνοντας μαζί του 90 ναυτικούς. Λίγο αργότερα ανελκύστηκε και μεταφέρθηκε στη βάση του Βλαδιβοστόκ. Όμως 2 χρόνια αργότερα ξαναβυθίστηκε, κατά άλλες πηγές δεμένο στην προβλήτα, κατά άλλες εν κινήσει, μέσα πάντως στη βάση.
- Τον Οκτώβριο του 1986 και ενώ το SSBN K-219 (P667A, Yankee I), βρισκόταν περίπου 680 μίλια βορειοανατολικά των Βερμούδων, μια έκρηξη προκάλεσε εισροή υδάτων στο διαμέρισμα των 16 βαλλιστικών πυραύλων (4<sup>ο</sup> διαμέρισμα). Το K-219 αναδύθηκε και το πλήρωμα προσπάθησε, χωρίς αποτέλεσμα να σβήσει τη φωτιά. Τρία μέλη του πληρώματος χάθηκαν στην πορπάθεια αυτή. Παράλληλα ένα ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα προκάλεσε προβλήματα στη λειτουργία του αντιδραστήρα και ένας ακόμα ναυτικός χάθηκε στην προσπάθεια να κατεβούν οι ράβδοι ελέγχου στον αντιδραστήρα. Το Y/B παρότι βρισκόταν σε ανάδυση άρχισε να χάνει την πλευστότητά του λόγω της εισροής υδάτων και τελικά βυθίστηκε. Το πλήρωμά του διασώθηκε από σκάφος που είχε στο μεταξύ σπεύσει επιτόπου. Κατά μια εκδοχή η έκρηξη στο 4<sup>ο</sup> διαμέρισμα οφειλόταν σε σύγκρουση με άλλο Y/B η οποία κατέστρεψε τη στεγανότητα ενός σωλήνα βαλλιστικού πυραύλου. Η εισροή υδάτων και η αύξηση της πίεσης στο συγκεκριμένο σωλήνα μπορεί να προκάλεσε είτε ηλεκτρικό βραχυκύκλωμα είτε διαρροή καυσίμου από τον πύραυλο και έκρηξη.
- Το K-278 Комсомолец (Κομσομόλετς) ήταν ένα Y/B κατασκευασμένο από τιτάνιο, ικανό να καταδύεται σε βάθη πιθανώς κάτω από 1.000m. Υπήρξε το μοναδικό του Σχεδίου 685 (Mike) και πιστεύεται ότι χρησιμοποιήθηκε κυρίως ως πλατφόρμα δοκιμών και εξέλιξης. Στις 7 Απριλίου του 1989 το K-278 βρισκόταν στη θάλασσα της Νορβηγίας, περίπου 100 μίλια νοτίως της νήσου Bear. Ενώ έπλεε σε βάθος 160m ξέσπασε φωτιά στο 70 διαμέρισμα. Το Y/B κατόρθωσε να αναδυθεί όμως η φωτιά γρήγορα εξαπλώθηκε και το σκάφος άρχισε να πλημμυρίζει. Το K-278 βυθίστηκε σε βάθος 1.685m με συνολικές απώλειες 42 ατόμων.
- Η σύγκρουση του SSN-689 Baton Rouge (Los Angeles) με το K-239 Καρπ (Π945A, Sierra I) SSN στη θάλασσα του Barents το 1992 είναι εκείνη η περίπτωση σύγκρουσης Y/B για την οποία είναι γνωστές οι περισσότερες λεπτομέρειες. Τα δύο Y/B συγκρούστηκαν στις 11 Φεβρουαρίου 1992 σε ελάχιστη απόσταση από τις βάσεις της χερσονήσου Κόλα. Το αποτέλεσμα της πορείας κάθε σκάφους ήταν το ιστίο του K-239 να χτυπήσει το κέλυφος του



Baton Rouge. Οι Ρωσικές αρχές ανέφεραν ζημιές στο ιστίο του K-239, στο οποίο βρέθηκαν κομμάτια από τα κεραμικά και πλαστικά που καλύπτουν το κέλυφος των Los Angeles για την αποφυγή ηχοεντοπισμού. Από την άλλη πλευρά το Αμερικανικό Ναυτικό ανακοίνωσε ότι το Baton Rouge έφερε ίχνη από σύγκρουση και μικρές ρωγμές σε μία από τις δύο δεξαμενές έρματος.

Συνολικά έχουν, αξιόπιστα, καταγραφεί 9 περιπτώσεις σύγκρουσης Υ/Β μεταξύ τους κι ορισμένες αλλά χωρίς ακριβή στοιχεία με μικρά πλοία επιφανείας, όπως αλιευτικά κ.α..

### **Το ατύχημα του Κούρσκ**

Θεωρείται από τα μεγαλύτερα πυρηνικά ατυχήματα σε υποβρύχιο, εξαιτίας των 118 θυμάτων και των προβλημάτων που ανέκυψαν για την ανάσυρσή τους και την ανέλκυση του ναυαγίου. Το συγκεκριμένο ατύχημα, άνοιξε έναν τεράστιο κύκλο συζητήσεων στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα σχετικά με την ασφάλεια των πυρηνικών υποβρυχίων και προκάλεσε ποικίλες συζητήσεις, πυροδοτώντας ανησυχία στην κοινή γνώμη κι αυξάνοντας τους σκεπτικιστές απέναντι στη χρήση της πυρηνικής ενέργειας.

Σύμφωνα με την επίσημη ανακοίνωση, αλλά και την καταγραφή σειсмоγραφικών ινστιτούτων, έλαβαν χώρα δύο συμβάντα, σε συντεταγμένες N69°38' E37°19' το πρωί της 12<sup>ης</sup> Αυγούστου 2000. Το πρώτο σημειώθηκε στις 11:29:34 (ώρα Μόσχας) και ήταν ανάλογο σεισμού εντάσεως 1,5 βαθμών της κλίμακας Richter και το δεύτερο, το οποίο ήταν σίγουρα έκρηξη, 2 λεπτά αργότερα με ένταση 3,5 Richter. Στα δύο λεπτά που μεσολάβησαν καταγράφηκαν ηχητικά σήματα που αντιστοιχούν είτε στο απότομο άδειασμα των δεξαμενών έρματος με σκοπό την ταχεία ανάδυση, είτε σε απότομη επιτάχυνση, είτε σε συνδυασμό των δύο. Είναι λοιπόν σαφές ότι το πρώτο συμβάν στις 11:29 ανάγκασε το σκάφος να εκτελέσει κινήσεις εκτάκτου ανάγκης, ενώ το δεύτερο συμβάν είναι προφανώς η έκρηξη των τορπιλών στο πρόσθιο διαμέρισμα, η οποία αποτελειώσε το σκάφος. Η επιτροπή που διερεύνησε το ατύχημα κατέληξε στο συμπέρασμά της αφού μελέτησε και το κουφάρι του Υ/Β. Στις 26/6/2002 ανακοινώθηκε ότι το ατύχημα του Κούρσκ οφείλεται σε έκρηξη τορπίλης στο εσωτερικό πρόσθιο μέρος του σκάφους, η οποία στη συνέχεια προκάλεσε την έκρηξη και άλλων τορπιλών στον ίδιο χώρο με αποτέλεσμα την πλήρη διάρρηξη της πλώρης και ανεξέλεγκτη εισροή υδάτων. Αυτή η εκδοχή συμφωνεί και με την καταγραφή 2 εκρήξεων, μίας μικρής και μίας μεγαλύτερης.

### **4.8 Στοιχεία σχεδιασμού πλοίου με πυρηνική πρόωση**

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια βασικά στοιχεία σχεδιασμού πυρηνοκίνητου πλοίου θέτοντας ως παράδειγμα το σχεδιασμό ενός δεξαμενοπλοίου με πυρηνικό αντιδραστήρα 4<sup>ης</sup> γενιάς (Carlton et al, 2011, Haas, 2014, Hirdaris et al, 2014).

Οι βασικές αρχές για τη σχεδίαση ενός πυρηνοκίνητου πλοίου είναι η ελαχιστοποίηση της πιθανότητας έκλυσης ραδιενέργειας εξαιτίας οποιουδήποτε παράγοντα, η ελαχιστοποίηση του ρίσκου διαρροής πετρελαίου εξαιτίας οποιουδήποτε ατυχήματος και η επίτευξη μηδενικού συντελεστή θανατηφόρου ατυχήματος ή τραυματισμού κατά τη λειτουργία του πλοίου. Αυτό προϋποθέτει δύο στάδια μελέτης, αρχικά την εκτίμηση κινδύνου (Risk Assessment) ενός τέτοιου πλοίου και κατά δεύτερον την ολοκληρωμένη μελέτη αναγνώρισης κινδύνων (Hazard Identification Study). Η εκτίμηση κινδύνου έχει ως σκοπό την ελαχιστοποίηση του κινδύνου ατυχήματος στο επίπεδο ALARP (As Low As Reasonably Practicable). Δηλαδή στην ελάχιστη πιθανότητα πραγματοποίησης οποιουδήποτε γεγονότος που θα επιφέρει αρνητικές συνέπειες στην κατασκευή, τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

### Επιλογές πρόωσης – αξονικού συστήματος

Με την εκτίμηση κινδύνου γίνεται μελέτη σε ατυχήματα που έχουν συμβεί στο παρελθόν και καταγραφή των συμβάντων αναλυτικά. Δηλαδή, χρειάζεται να γίνει έρευνα σε βάθος των ατυχημάτων που προαναφέρθηκαν και καταγραφή των συμβάντων ένα προς ένα. Από αυτή την έρευνα προκύπτουν, οι εξής επιλογές πρόωσης και περιστροφής του κύριου άξονα για ένα τάνκερ Suezmax με μικρό αντιδραστήρα 70MW (Hirdaris et al, 2014) (παρατίθενται στην αγγλική ορολογία):

- Twin screw mechanical drive option
- Twin screw electric drive option
- Single screw mechanical drive with propeller and electrical podded propulsor
- Single screw mechanical drive with single shaft line

Στον επόμενο Πίνακα φαίνονται οι διαφορές των διαφόρων επιλογών πρόωσης και επιλογής αξονικού συστήματος:

**Πίνακας 9** Επιλογές πρόωσης – ηλεκτρική και μηχανική περιστροφή του άξονα και σχόλια για Suezmax tanker με πρόωση μέσω αντιδραστήρα 70 MW (Hirdaris et al, 2014)

Item	Steam Drive		Electric Drive		Comments
	Option 1 Twin Screw	Option 2 Single Screw	Option 3 Twin Screw	Option 4 Single Screw	
Technology					Marine steam turbine reduction gears are commercially available but may need to be updated for SMR steam conditions.
Efficiency					Single screw would lead to low powering requirements. Steam drive & reverse reduction gear would allow for better underway efficiencies.
Redundancy					Arrangements can be configured to comply with safe return to port and have redundant power.
GA Impact					Twin screw installations may prove more challenging. Electric installations are likely to require greater machinery space volumes than direct steam drive installations.

Στο συγκεκριμένο πλοίο ο αντιδραστήρας που προτάθηκε από ομάδα ειδικών είναι 4<sup>ης</sup> γενιάς, ο Gen4Energy Generation IV, fast neutron SMR, με υγρό μέταλλο ως ψυκτικό μέσον, μικρού μεγέθους και μεταφερόμενος, και ως δευτερεύον σύστημα θεωρείται ένας ατμοστρόβιλος, κύκλου Rankine, με κοινό άξονα υψηλής και χαμηλής πίεσης τουρμπίνων.

Στο επόμενο Σχήμα, 50, φαίνεται διαγραμματικά το πρωτοβάθμιο και το δευτεροβάθμιο σύστημα της εγκατάστασης:

Trans RINA, Vol 156, Part A1, Intl J Maritime Eng, Jan-Mar 2014

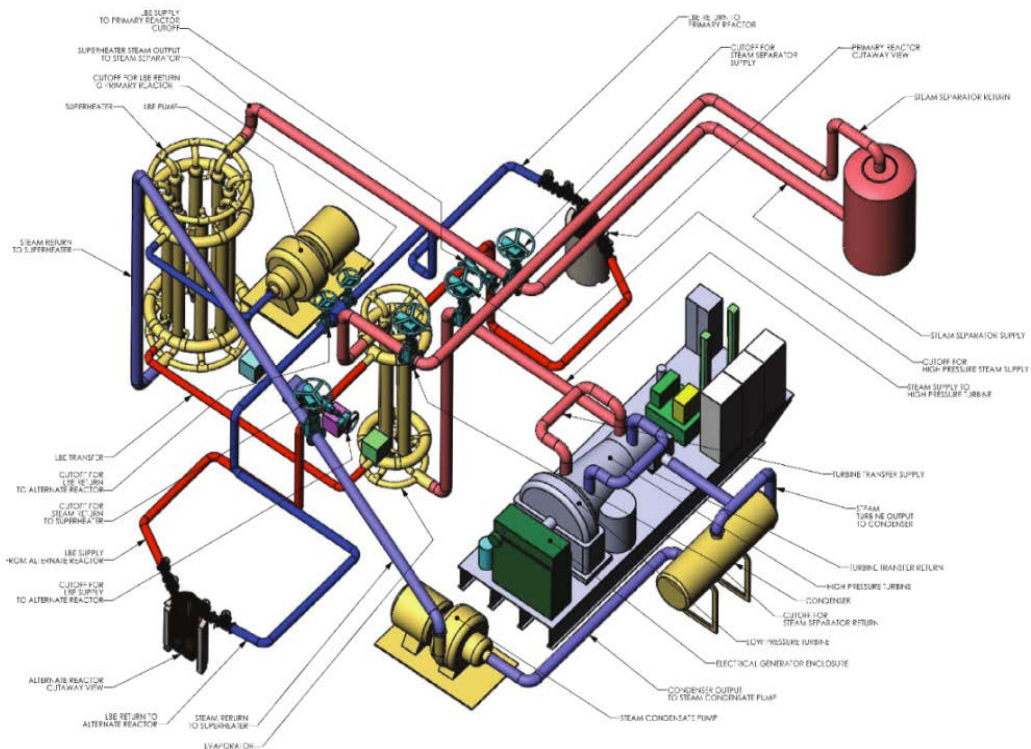


Figure 2. Gen4Energy SMR Power Generation core Module

A-42

©2014: The Royal Institution of Naval Architects

**Σχήμα 50 Gen4Energy SMR Power Generation core Module (Hirdaris et al, 2014)**

Στον παρακάτω Πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά και τα πλεονεκτήματα της λύσης αυτής.

**Πίνακας 10 Χαρακτηριστικά και προτερήματα της επιλογής της ερευνητικής ομάδας Χειρδάρη για σχεδίαση πλοίου Suezmax tanker με πρόωση μέσω αντιδραστήρα 70 MW (Hirdaris et al, 2014)**

Engineering	Description	Characteristics	Benefits
		<ul style="list-style-type: none"> <li>PR = 70MWthermal = 25MWelectrical</li> <li>WR &lt; 50 tonnes</li> <li>DR = 1.5 m HR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Long core lifetime without refuelling (approx. 10 years)</li> <li>□ Small impact of fission products on reactivity</li> <li>□ Little isotropic</li> </ul>

General Reactor features	Fast Neutron Spectrum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• = 4 m</li> <li>• Use of full energy potential</li> <li>• Better dynamic performance</li> <li>• Few changes in system with lifetime</li> </ul>	transmutation <input type="checkbox"/> Reduced radioactive waste through transmutation
Core Coolant	Liquid metal LBE (Pb-Bi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lower melting temperature and minimum expansion at melting in comparison to Pb</li> <li>• Lower risk of leaks and subsequent chemical reaction with water or air in comparison to Na</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Compact core design that can produce a 500 °C high coolant temperature <input type="checkbox"/> Good system efficiency
Nuclear Fuel	UN (stainless clad)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <sup>235</sup>U enrichment = 19.75%</li> <li>• UN pellets contained in tubes made of HT-9 (ASME 12Cr1MoVW) stainless steel</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Good thermal conductivity <input type="checkbox"/> High core life <input type="checkbox"/> Low fission gas release and fuel swelling <input type="checkbox"/> Resistance to irradiation damage over extended time <input type="checkbox"/> Factory fuelling
Reactor core	-UN (open lattice) -Improved active and passive safety features	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactivity control rod system composed of 6 inner and 12 outer B4C shutdown rods</li> <li>• Reserve shutdown system consisting of a cavity into which a single B4C rod may be inserted.</li> <li>• Heat is transferred from the core via circulation of coolants.</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Light design; easy sealing and transportation <input type="checkbox"/> 10 year Long life without refuelling <input type="checkbox"/> Enhanced system reliability to operational blackouts and shutdown conditions <input type="checkbox"/> Improved Safety by active and passive shutdown <input type="checkbox"/> Independent and diverse means to remove decay heat under all plant shutdown conditions

Μία άλλη λύση συστήματος πρόωσης που προτείνεται και περιλαμβάνει αντιδραστήρα τηκόμενου - υγρού άλατος, όπου στο δευτερεύον σύστημα θα μπορεί να υπάρχει είτε ατμοστρόβιλος είτε αεριοστρόβιλος είναι αυτή του σχήματος 26.

#### Hazard Identification Analysis – Ολοκληρωμένη μελέτη αναγνώρισης κινδύνων

Στο στάδιο της ολοκληρωμένης μελέτης αναγνώρισης κινδύνου, κατανοούνται οι κίνδυνοι από τυχόν ανθρώπινα λάθη, από τη λειτουργία του πυρηνικού αντιδραστήρα, από τη λειτουργία της υπόλοιπης μηχανολογικής εγκατάστασης και προσδιορίζονται οι μηχανισμοί ελέγχου της μηχανολογικής εγκατάστασης. Για τη λειτουργία του συνόλου της μηχανολογικής εγκατάστασης θα πρέπει να λαμβάνονται κατά τη μελέτη για τη σχεδίαση και οι εξής παράμετροι (Hirdaris et al, 2014):

- Διατάξεις για νερό ψύξης σε έκτακτη ανάγκη
- Προστασία από πρόσκρουση και προσάραξη
- Προστασία από τη ραδιενέργεια
- Προστασία από τις ταλαντώσεις

Επίσης κατά την διάρκεια της ανάλυσης θα πρέπει να προσδιοριστούν οι ζώνες κινδύνου από τη ραδιενέργεια που κατά την μελέτη διακρίνονται στις παρακάτω τρείς (Carlton et al, 2011):

- i. Πρώτη ζώνη περιορισμένης πρόσβασης: Η περιοχή του διαμερίσματος του πυρηνικού αντιδραστήρα.
- ii. Δεύτερη ζώνη μέτριας πρόσβασης: Η περιοχή που περιλαμβάνει τα συστήματα καθαρισμού, τους εναλλάκτες ιόντων, τα συστήματα after cooling και γενικά τα δευτερεύοντα και βοηθητικά συστήματα της μηχανολογικής κατασκευής.
- iii. Τρίτη ζώνη ελεύθερης πρόσβασης: Όλα τα υπόλοιπα διαμερίσματα του πλοίου.

Στον παρακάτω Πίνακα φαίνεται μία ολοκληρωμένη μελέτη αναγνώρισης κινδύνων για την επιλογή αντιδραστήρα 4<sup>ης</sup> γενιάς, Gen4Energy Generation IV, fast neutron SMR, με υγρό μέταλλο ως ψυκτικό μέσον για ένα Suezmax tanker (Hirdaris et al, 2014), που αποτελεί χρήσιμο παράδειγμα για τη μελέτη κινδύνων στη ναυτιλία αλλά και στο πλαίσιο της μελέτης της παρούσας εργασίας.

**Πίνακας 11 Μελέτη αναγνώρισης κινδύνων για πλοίο τύπου Suezmax tanker με πρόωση μέσω αντιδραστήρα 70 MW(Hirdaris et al, 2014)**

Item	Key issues	Considerations
1	Accessibility to high radiation areas	Practical control of 3rd party accessibility
2	Space for a 2nd SMR	SMR positioning
		SMR cooling, access, containment
		Operational requirements
		Regulations; Vessel could be considered to be carrying spent radioactive waste
		Methods for reactor removal
3	Operation of emergency cooling systems	Capacity/design of the reactor passive cooling systems accounting for cooling duration
		Consider grounding conditions where the vessel could tilt
4	Protection of the reactor from accidental Loading	Design SMR cooling system to prevent meltdown in the event of ship sinking
		Define operational guidelines on grounding to maintain reactor integrity
		Define fire fighting system requirements and boundary cooling for SMR compartments in case of onboard fires/explosions
		Design for back-up power source setup and positioning to account for reactor shut down due to loss of propulsion
5	Reactor protection against terrorist attacks	Physical protection of the reactor against impact from missiles
		Considerations under Section 4 a,b,c,d apply
6	Reactor/propulsion system emergency stop	Define transient operating conditions for the reactor, steam system, turbine and heat Removal

### Θέση πυρηνικού αντιδραστήρα

Κατά την διάρκεια της μελέτης, βασικό ρόλο παίζει η επιλογή θέσης για τον πυρηνικό αντιδραστήρα με ιδιαίτερη αναφορά στην περίπτωση σύγκρουσης, φωτιάς και εξαιτίας των κινήσεων και των ταλαντώσεων του σκάφους. Η ολοκληρωμένη μελέτη αναγνώρισης κινδύνων βοηθάει προς την κατεύθυνση της επιλογής βέλτιστης θέσης.

Ως εκ τούτου, η ιδανική τοποθεσία για την εγκατάσταση αντιδραστήρα σε ένα πλοίο επιφανείας με μοναδικό κριτήριο τις ταλαντώσεις και τις κινήσεις του πλοίου θα πρέπει να είναι όπου ελαχιστοποιούνται οι κινήσεις του πλοίου: κατά κανόνα στην περιοχή κοντά στο κέντρο της ισάλου επιφανείας. Επίσης, είναι καλύτερο εάν η μονάδα του αντιδραστήρα τοποθετείται χαμηλά στο πλοίο. Αυτό είναι το καλύτερο για πλοία που κινούνται με ένα μηχανικό σύστημα που περιλαμβάνει έναν αντιδραστήρα ατμού που οδηγεί έναν ατμοστρόβιλο και σε συνδυασμό με ένα διπλό μειωτήρα πριν την έλικα. Όλες οι εκτιμήσεις για την σωστή θέση του πυρηνικού αντιδραστήρα στο πλοίο καταγράφονται στο παρακάτω Πίνακα λαμβάνοντας υπόψη και κινδύνους (hazards) καθώς και γεγονότα (events) με σκοπό την επιλογή βέλτιστης θέσης, δεδομένου ότι πρόκειται για έναν μικρό αντιδραστήρα 70 MW για ένα Suezmax Tanker.

Πίνακας 12 Συσχετισμός θέσης στο πλοίο του πυρηνικού αντιδραστήρα με διάφορους κινδύνους (Hirdaris et al, 2014)

<b>Option</b>	<b>Location</b>	<b>Collision Damage</b>	<b>Cargo Tanks &amp; Fire/Explosion</b>	<b>Motions &amp; vibrations</b>
A	Aft end – Under Funnel	High	Low	Medium
B	Aft of Cargo Tanks	Low	Medium	Medium
C	Amidships	Medium	High	low
D	Forward of Cargo Tanks	High	Medium	High

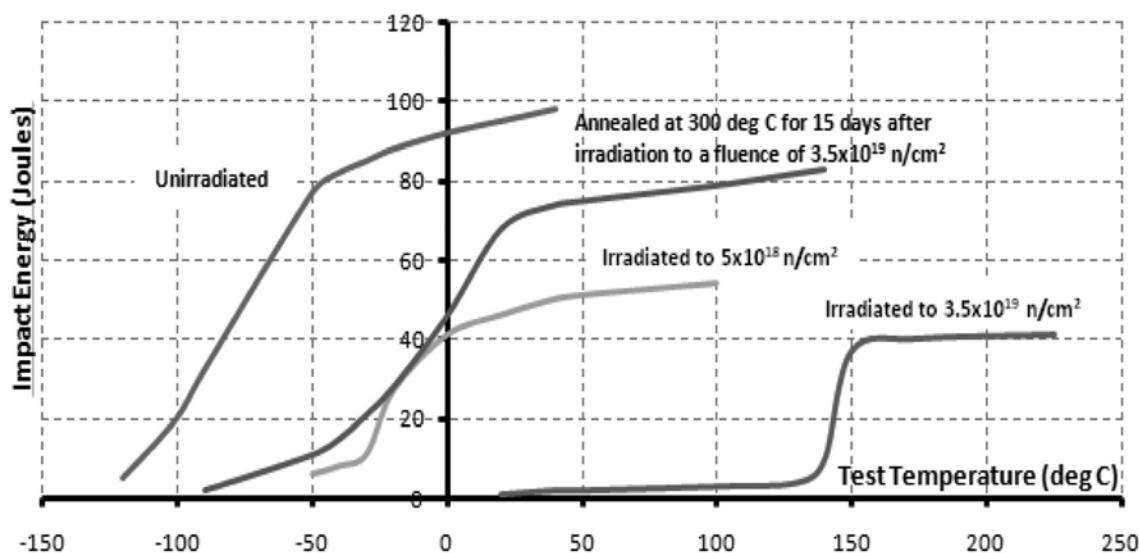
### Προστασία του πυρηνικού αντιδραστήρα

Εκτός από τη μελέτη των κινδύνων και την εκτίμηση του ρίσκου όσον αφορά τη θέση του πυρηνικού αντιδραστήρα στο πλοίο, εξίσου σημαντικό ρόλο παίζει και η κατασκευή του διαμερίσματος του αντιδραστήρα με στόχο την προστασία του. Ορισμένα στοιχεία για την ασφάλεια του αντιδραστήρα και κάποιες κατασκευαστικές παραμέτρους περιλαμβάνουν οι προσωρινοί κανονισμοί (Provisional Rules) του Lloyd's.

Η θαλασσοταραχή, οι κραδασμοί και οι δονήσεις καθώς και η διάβρωση θα πρέπει να μην επηρεάζουν την ασφαλή λειτουργία του αντιδραστήρα αλλά και του πρωτοβάθμιου συστήματος. Πέρα , λοιπόν, από το σχεδιασμό κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα ενός αντιδραστήρα ακόμη και στην περίπτωση της ελαστοπλαστικής κατάρρευσης, με στοιχεία απορρόφησης και διάχυσης της ενέργειας από τυχόν πρόσκρουση, προσάραξη ή άλλου είδους ατύχημα, θα πρέπει να γίνεται και σοβαρή μελέτη για την ευστάθεια μετά από βλάβη του πλοίου (damage stability).

#### Επίδραση της ακτινοβολίας στη γάστρα του πλοίου

Η ακτινοβολία δημιουργεί με το πέρασμα των ετών προβλήματα στη μικροδομή του χάλυβα. Η σκληρότητα του χάλυβα μειώνεται αισθητά με τα χρόνια και κατά αυτό τον τρόπο ο χάλυβας χάνει τις αρχικές του ιδιότητες. Με την αύξηση της ακτινοβολίας, η μετάβαση από την όλκιμη στην ψαθυρή κατάσταση κινείται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 51.



Σχήμα 51 Impact energy versus temperature curves for ASTM 203 grade D steel (Carlton et al, 2011)

Καθίσταται λοιπόν σαφές, πως κατά την σχεδίαση ενός πυρηνοκίνητου πλοίου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι ο χρησιμοποιούμενος χάλυβας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερης σκληρότητας για να προβλέπεται και η αποσκλήρυνση κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου.

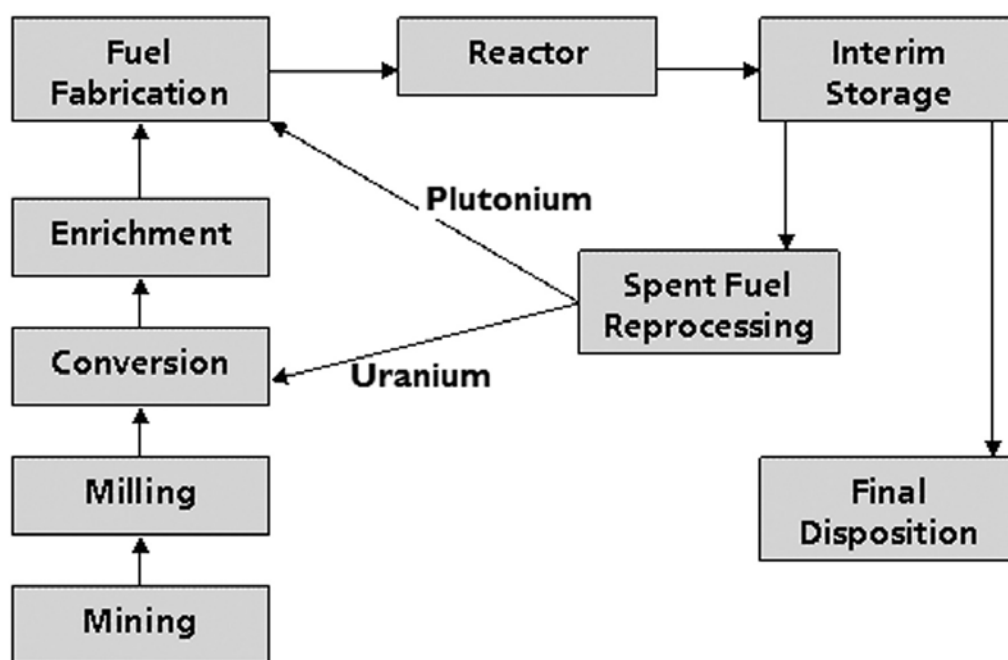
#### Ανεφοδιασμός καυσίμου

Ο ανεφοδιασμός στα πυρηνοκίνητα πλοία συμβαίνει **κάθε πέντε με επτά έτη**, ανάλογα με το βαθμό εμπλουτισμού του καυσίμου. Ο σχεδιασμός ενός πυρηνοκίνητου πλοίου θα πρέπει να γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να είναι δυνατόν να γίνει εύκολα η ανάκτηση του χρησιμοποιημένου καυσίμου από το πλοίο. Εάν δεν γίνεται αυτό, τότε θα συνυπάρχουν εντός του πλοίου τα καύσιμα προς χρήση και το ήδη χρησιμοποιημένο που νοείται ως πυρηνικό απόβλητο.

Οι διαδικασίες απομάκρυνσης ή/και αποθήκευσης των αποβλήτων εμπεριέχουν μεγάλο ρίσκο, λόγω της ακτινοβολίας γάμμα και των ασταθών ισοτόπων που υπάρχουν στα ήδη χρησιμοποιημένα καύσιμα. Σε αντίθεση ο ανεφοδιασμός είναι μία διαδικασία περισσότερο ελεγχόμενη και παρουσιάζει λιγότερη ακτινοβολία.

Η σύγχρονη αρχιτεκτονική προτείνει ως λύση για τον εύκολο ανεφοδιασμό και την επίσης ευκολότερη απομάκρυνση των ραδιενεργών αποβλήτων, τις ειδικές εγκάρσιες διόδους και τις ειδικές πλευρικές θύρες προς το εξωτερικό περίβλημα. Παλαιότερα στο NS Savannah, το διαμέρισμα του αντιδραστήρα ήταν άμεσα προσβάσιμο από το κύριο κατάστρωμα.

Εάν για οποιοδήποτε λόγο χρειαστεί τα πυρηνικά απόβλητα να αποθηκευτούν εντός του πλοίου, θα πρέπει οπωσδήποτε να αποθηκεύονται σε ειδική δεξαμενή με σύστημα ψύξης νερού και με ειδικές συνθήκες που περιγράφονται από τον κανονισμό INF. Στο Σχήμα 52 φαίνεται ο κύκλος του πυρηνικού καυσίμου:



Σχήμα 52 The nuclear fuel cycle (Carlton et al, 2011)

### Πειραματικά σχέδια πλοίου με χρήση πυρηνικής ενέργειας

Παρακάτω, παρουσιάζονται ορισμένα σχέδια από τη μελέτη Χειρδάρη για δεξαμενόπλοιο μεγέθους Suezmax με πρόωση μέσω μικρού πυρηνικού αντιδραστήρα 70 MW. Θα περίμενε κανείς, ότι λόγω του ενδιαφέροντος για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αλλά και λόγω των προτερημάτων της πυρηνικής πρόωσης, να υπάρχουν πολλές τέτοιες μελέτες που να υποδεικνύουν κατασκευαστικά σχέδια πλοίων με χρήση της πυρηνικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, οι μελέτες παγκοσμίως είναι ελάχιστες. Διαφαίνεται, επομένως, ότι ακόμη η ναυτιλιακή κοινότητα δεν έχει αποδεχτεί πλήρως την χρήση της πυρηνικής ενέργειας και θα χρειαστούν ακόμη



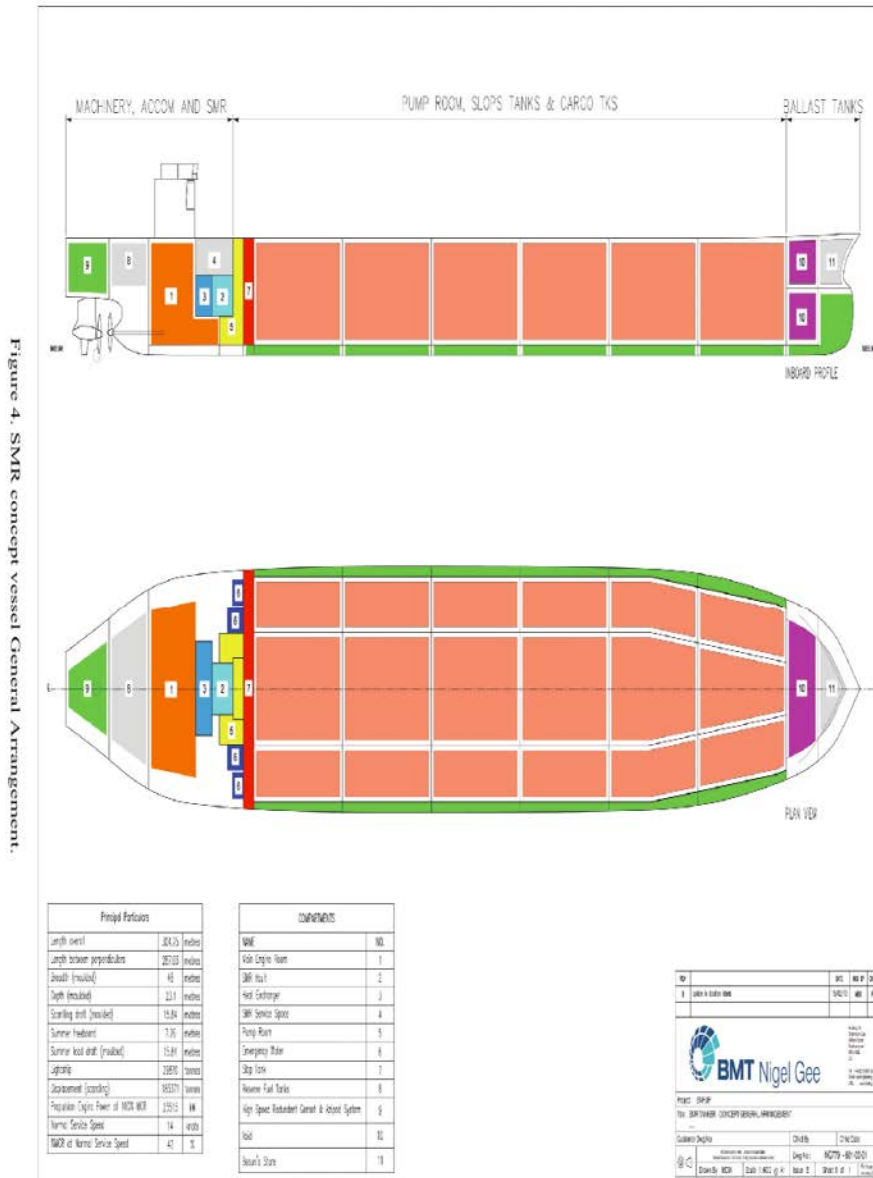
αρκετές μελέτες για να ξεκινήσουν οι ναυπηγήσεις τέτοιων πλοίων. Το στοιχείο αυτό, αποτελεί κι ένα δείγμα της αποδοχής της πυρηνικής ενέργειας γενικότερα, συζήτηση που δεν είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας, παρόλα αυτά είναι ένα στοιχείο που επηρεάζει κατά πολύ την συνολική πορεία της έρευνας.

Στο Σχήμα 53 φαίνεται το σχέδιο γενικής διάταξης που προέκυψε από τη μελέτη της ομάδας Χειρδάρη για δεξαμενόπλοιο μεγέθους Suezmax με πρόωση μέσω μικρού πυρηνικού αντιδραστήρα 70 MW.

Τα χαρακτηριστικά του πλοίου φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

**Πίνακας 13** Principal Particulars and Details of General arrangement of a NS Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014)

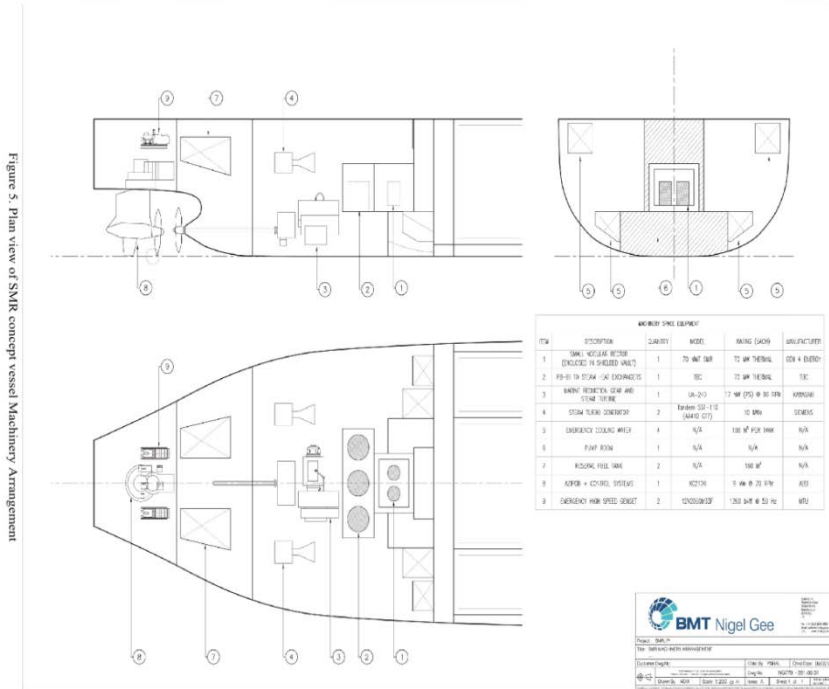
Principal Particulars		Compartments	
		Name	No
LOA	304.25 m	Main Engine Room	1
LBP	287.03 m	SMR vault	2
B (moulded)	48 m	Heat Exchange	3
D(moulded)	23.1 m	SMR Service space	4
T (scantling, moulded)	15.84 m	Pump Room	5
Summer Freeboard	7.26 m	Energy Water	6
Summer leed draft (moulded)	15.84 m	Slop tank	7
Lightship	29870 tons	Reserve Fuel Tanks	8
Displacement (scantling)	185371 tons	High Speed Redundert and Azipod System	9
Propulsion Engene power at 100% MCR	23515 kW	Void	10
Normal Service speed	14 knots	Bozun's Store	11
% MCR at normal service speed	47 %		



**Σχήμα 53** Concept General arrangement of a NS Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014)

Στο Σχήμα 54 φαίνεται ένα σχέδιο γενικής διάταξης της μηχανολογικής εγκατάστασης του πλοίου που μελέτησε η ερευνητική ομάδα Χειρδάρη.

Η θέση του πυρηνικού αντιδραστήρα είναι η θέση ένα του σχήματος, πάνω ακριβώς από το αντλιοστάσιο. Στον τελευταίο πίνακα φαίνονται οι λεπτομέρειες από το σχέδιο γενικής διάταξης της μηχανολογικής εγκατάστασης. Η εν λόγω εργασία είναι βέβαια πειραματική



Σχήμα 54 Plan view of SMR concept vessel Machinery Arrangement for a Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014)

Πίνακας 14 Details of the plan view of SMR concept vessel Machinery Arrangement for a Suezmax tanker powered by a 70 MW small modular reactor (Hirdaris et al, 2014)

MACHINERY SPACE EQUIPMENT					
ITEM	DESCRIPTION	QUANTITY	MODEL	RATING	MANUFACTURER
1	Small Modular Reactor	1	70 MWT SMR	70 MWT THERMAL	GEN 4 ENERGY
2	PB-BI TO Steam Heat Exchangers	1	TBC	70 MWT THERMAL	TBC
3	Marine Reduction Gear and Steam Turbine	1	UA – 240	17 MW(PS)-90 RPM	KAWASAKI
4	Steam Turbo Generator	2	Tandem SST-110	10 MWe	SIEMENS
5	Emergency Cooling Water	4	N/A	100 m <sup>3</sup> Per tank	N/A
6	Pump Room	1	N/A	N/A	N/A
7	Reserve Fuel Tank	2	N/A	160 m <sup>3</sup>	N/A
8	Azipod + Control Systems	1	XC2100	9 MW @ 70 RPM	ABB
9	Emergency High Speed Genset	2	12V200M33F	1260 Bkw @ 50 Hz	MTU

Καθίσταται σαφές ότι η μελέτη σχεδίασης ενός πλοίου με πυρηνική πρόωση είναι εντελώς πολύπλοκη διαδικασία καθώς θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι. Τα μοντέλα σχεδίασης θα πρέπει να μην είναι ντετερμινιστικά αλλά πιθανοθεωρητικά, καθώς πολλοί παράγοντες καθορίζουν μία τέτοια κατασκευή. Επίσης, θα πρέπει να υπάρξει περαιτέρω έρευνα αλλά και επανεξέταση των υπάρχοντων κανονισμών που αφορούν τα πλοία με πυρηνική πρόωση, με έμφαση στις παραμέτρους αναλυτικής σχεδίασης.

## 4.9 Βιβλιογραφία 4<sup>ο</sup> Κεφαλαίου

### Ξένη Βιβλιογραφία

- ✚ Anitropov et al, «Dismantlement of surface vessels with nuclear power installations and nuclear service ships», Saint Petersburg, 2007
- ✚ Carlton et al, «The nuclear propulsion of merchant ships: Aspects of engineering, science and technology», Journal of Marine Engineering and Technology, Volume 10 - Issue 2 April 2011
- ✚ Hirdaris et al, «Concept Design For a Suezmax Tanker Powered by a 70MW small Modular reactor, Trans RINA, Vol. 156, Part A1, Intl J Maritime Eng, Jan-Mar 2014
- ✚ Ragheb M., «Nuclear Marine Propulsion», March 2014, University of Illinois
- ✚ Scott W., «Nuclear Energy used in the propulsion of ships», article for <http://www.brighthubengineering.com/>, March 2010

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- ✚ Δάγκινης Ι., Νικητάκος Ν., «Κατασκευαστική Εξέλιξη Συστημάτων Πλοίων», Maritech News (τεύχος 18), Μάρτιος / Απρίλιος 2012
- ✚ Δελημπάσης Κ., «Ατυχήματα πυρηνικών υποβρυχίων», άρθρο για την ιστοσελίδα [www.e-telescope.gr](http://www.e-telescope.gr), 2002
- ✚ Δελημπάσης Κ., «Πυρηνοκίνητα σκάφη και Περιβάλλον», άρθρο για την ιστοσελίδα [www.e-telescope.gr](http://www.e-telescope.gr), 2002

### Διαλέξεις / Σεμινάρια / Συνέδρια

- ✚ Haas B., «Strategies for the Success of Nuclear Powered Commercial Shipping», Connecticut Maritime Association, March 2014

### Ιστοσελίδες

- ✚ Marine Buzz: Marine News, Shipping, Training, [www.marinebuzz.com](http://www.marinebuzz.com) (Access, July 2014)
- ✚ Rosatom State Nuclear Energy Corporation, [www.rosatom.ru/en/](http://www.rosatom.ru/en/) (Access June, 2014)
- ✚ International Maritime Organization, [www.imo.org](http://www.imo.org) (Access, March 2014)

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# 5

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΑΞΗ ΣΕ ΠΛΟΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 5.1 Πορεία εργασίας

Με το παρόν Κεφάλαιο ξεκινάει ο βασικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας που είναι η μελέτη ναυτικών ατυχημάτων σε πλοία που χρησιμοποιούν την πυρηνική ενέργεια για την πρόωσή τους. Σε αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσονται οι παράμετροι εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη δύο ειδών ατυχημάτων, της σύγκρουσης και της προσάραξης ενός τέτοιου είδους πλοίου. Χρησιμοποιήθηκε η βάση **IHS Sea Web** για τη μελέτη ατυχημάτων σύγκρουσης και προσάραξης συμβατικών πλοίων και μελετήθηκε η λίστα που παρατίθεται στο πρώτο κεφάλαιο του συνόλου των πυρηνικών ατυχημάτων στη στεριά μαζί με τα πυρηνικά ατυχήματα που συνέβησαν κατά καιρούς στη θάλασσα κι αναπτύσσονται στο τέταρτο κεφάλαιο.

Στη μελέτη για τη σύγκρουση ενός πλοίου που χρησιμοποιεί την πυρηνική ενέργεια για την πρόωσή του, διεξήχθη βιβλιογραφική ανασκόπηση τριών επιπέδων.

Το πρώτο επίπεδο αφορά τα πυρηνικά ατυχήματα. Αρχικά, έγινε ενδελεχής μελέτη όλων των πυρηνικών ατυχημάτων που έχουν συμβεί με έμφαση στην εύρεση του αναρκτήριου γεγονότος και στην σειρά των επόμενων γεγονότων που ακολουθήθηκε. Μελετήθηκαν τα αίτια και οι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν σε ένα πυρηνικό ατύχημα, όπως παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο και αλλού και καταγράφηκαν σε ειδική βάση δεδομένων που κατασκευάστηκε για αυτό το σκοπό.

Στο δεύτερο επίπεδο έγινε μία καταγραφή σημαντικών συγκρούσεων και προσαράξεων συμβατικών πλοίων, με τη βοήθεια της βάσης SEA WEB, με έμφαση στις αιτίες που οδήγησαν στα εν λόγω ατυχήματα. Μαζί με άλλες καταγεγραμμένες περιπτώσεις έπειτα από έρευνα στη διεθνή βιβλιογραφία, σχηματίστηκε μία πρότυπη ροή γεγονότων για κάθε είδος ατυχήματος η οποία κατόπιν υποβλήθηκε στην ανάλυση μέσω δέντρων γεγονότων.

Στο τρίτο επίπεδο, έγινε βιβλιογραφική έρευνα ατυχημάτων μη πολεμικών πυρηνοκίνητων πλοίων. Όπως ειπώθηκε στην εισαγωγή τα στοιχεία είναι ελάχιστα και δύσκολο να γίνουν γνωστά. Να σημειωθεί, στο σημείο αυτό ότι δεν υπάρχει καταγεγραμμένη μέθοδος τυπικής ανάλυσης ασφάλειας (FSA) για πυρηνοκίνητα πλοία. Οι πληροφορίες είναι ελάχιστες, παρόλα αυτά είναι σχεδόν επαρκείς για την

εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων – ιδίως αν γίνει συσχετισμός σε ορισμένα στοιχεία και με κάποια ατυχήματα συμβατικών πλοίων για το πώς εξελίχθηκαν τα ατυχήματα.

Ο στόχος αυτού του τμήματος της έρευνας είναι να γίνει **προσδιορισμός των κινδύνων (Hazard Identification)** και να αναπτυχθούν σενάρια που θα αποτυπώνουν τα διάφορα δυνητικά ατυχήματα. Κατόπιν, ομάδα εμπειρογνομόνων θα αξιολογήσει τα υψηλής επικινδυνότητας σενάρια που θα προκύψουν και θα προσπαθήσει να προσδιορίσει τις συνέπειες από ένα ατύχημα, όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Η παραγωγή των σεναρίων μέσω των δέντρων γεγονότων όπως παρουσιάζεται παρακάτω, είναι απολύτως χρήσιμη για κάθε ερευνητή με στόχο την ασφαλή μελέτη και σχεδίαση πυρηνοκίνητων πλοίων.

## 5.2 Σενάρια σύγκρουσης πλοίων

Κατόπιν μελέτης ναυτικών ατυχημάτων σύγκρουσης αποφασίστηκε οι πύλες που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του δέντρου γεγονότων να είναι οι εξής:

- **Weather conditions** (good weather conditions or bad weather conditions)  
Καιρικές συνθήκες
- **Human and organizational error** (yes or no – such as crew error, misjudgement, bad maintenance etc.)  
Ανθρώπινο/οργανωτικό λάθος
- **High density of maritime traffic** (yes or no)  
Υψηλή θαλάσσια κίνηση
- **Vessel speed** (less than 5 knots and equal or more than 5 knots)  
Ταχύτητα πλοίων (μεγαλύτερη ή μικρότερη ή ίση των 5 κόμβων)
- **Angle of collision** (less than 45° and equal or more than 45°) Γωνία πρόσκρουσης
- **Collision** - Σύγκρουση
- **Striking/Struck vessel**  
Πλοίο που προκαλεί τη σύγκρουση/πλοίο που δέχεται τη σύγκρουση
- **Ratio of vessel masses** (more than one and less than one – more than one means that the vessel under examination is larger than the other vessel involved in the collision while less than one means that the vessel under examination is smaller than the other vessel involved in collision)  
Λόγος μαζών των εμπλεκόμενων πλοίων (μεγαλύτερος του ενός σημαίνει ότι το πλοίο που εξετάζουμε είναι μεγαλύτερο από το άλλο εμπλεκόμενο στο ατύχημα πλοίο)

- **On-board area of collision** (cargo area and E/R)  
Περιοχή του πλοίου που υπέστη την πρόσκρουση (με απαντήσεις περιοχή φορτίου ή μηχανοστάσιο)
- **Water intake** (yes or no)  
Εισροή υδάτων
- **Usage of safe rescue** (yes or no)  
Χρήση μέσων διάσωσης
- **Fire** (yes or no)  
Πυρκαγιά
- **Black out** (yes or no)  
Μπλακάουτ
- **Nuclear accident** (yes or no)  
Πυρηνικό ατύχημα

Οι συνέπειες ελήφθησαν υπόψη όπως περιγράφηκαν στο τρίτο κεφάλαιο:

## CONSEQUENCES

(According to IMO. (2005). Casualty-related matters – reports on marine casualties and incidents. Revised harmonized reporting procedures – reports required under SOLAS regulation I/21 and MARPOL 73/78, articles 8 and 12, MSC-MEPC.3/Circ.1, London, UK.)

- **Less serious**
- **Serious**
- **Very serious (incl. total loss)**

Οι συνέπειες ενός πυρηνικού ατυχήματος περιγράφονται παρακάτω όπως ακριβώς λήφθηκαν υπόψη στην κατασκευή δέντρου γεγονότων στο τέταρτο κεφάλαιο:

- **No radiation leakage**
- **Minor radiation leakage**
- **Significant/Major radiation leakage**

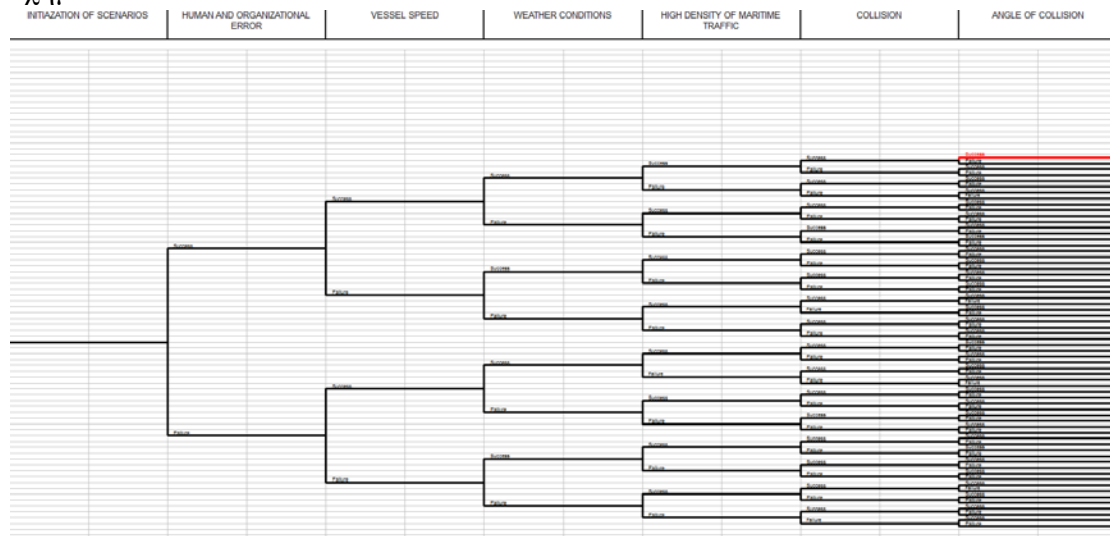
Στον παρακάτω Πίνακα διαφαίνεται η κατάταξη των κόμβων – πυλών του δέντρου γεγονότων. Χωρίζονται σε Hazards (κινδύνους), Identity of collision (ταυτότητα της σύγκρουσης), Impacts (αποτελέσματα) και Consequences (συνέπειες).



Πίνακας 15 The classification of the barriers/event gates of the generic event tree for collision accidents (i.e. Hazards, identity of collision, impacts and consequences)

<u>HAZARDS</u>	<u>IDENTITY OF COLLISION</u>	<u>IMPACTS</u>	<u>CONSEQUENCE</u> <u>S</u>
Weather conditions	Angle of collision	Water intake	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Less serious</li> <li>• Serious</li> <li>• Very serious</li> </ul>
Human and organizational error	Striking/stricken vessel	Usage of safe rescue	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No radiation leakage</li> <li>• Minor radiation leakage</li> <li>• Significant/Major radiation leakage</li> </ul>
High density of maritime traffic	Ratio of vessel masses	Fire	
Vessel speed	On-board area of collision	Black out	
		Nuclear accident	

Η πορεία εργασία / κατασκευής των δέντρων γεγονότων φαίνεται στα παρακάτω 4 Σχήματα.



Σχήμα 55 Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της σύγκρουσης



πως η τελευταία στήλη δεν είναι συμπληρωμένη με κάποια συγκεκριμένη συνέπεια, έστω κι αν αυτή προέκυπτε από το δέντρο γεγονότων καθώς ρωτήθηκαν οι ειδικοί οι οποίοι και συμπλήρωσαν αντίστοιχα ερωτηματολόγια, η επεξεργασία των οποίων παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

### **HIGH SEVERITY SCENARIOS FOR COLLISION**

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → engine room area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → engine room area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → engine room area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → engine room area → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → engine room → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → engine room → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → cargo area → engine room area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → cargo area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → engine room area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → cargo area → engine room area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → cargo area → engine room area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → cargo area → engine room area → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → cargo area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → cargo area → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck vessel → engine room → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → struck → engine room → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → engine room area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → engine room area → water intake → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → engine room area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → engine room area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → engine room area → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → cargo area → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → engine room → water intake → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

Human and organizational error → high density of maritime traffic → collision → stricken vessel → engine room → fire → black out → loss of cooling system of reactor → rupture of reactor → high severity consequences

### 5.3 Σενάρια προσάραξης πλοίων

Με μελέτη ναυτικών ατυχημάτων προσάραξης αποφασίστηκε οι πύλες που θα συγκροτούν το δέντρο γεγονότων να είναι οι εξής:

- **Weather conditions** (bad or good weather conditions)  
Καιρικές συνθήκες
- **Human and Organizational Error** (yes or no – such as crew error, misjudgement, bad maintenance etc.)  
Ανθρώπινο κι οργανωτικό λάθος (όπως κακή εκτίμηση, κακή συντήρηση κ.α.)
- **Shallow waters** (yes or no)  
Πηχά νερά
- **Vessel speed** (less than 5 knots and equal or more than 4 knots)  
Ταχύτητα πλοίου (μεγαλύτερη ή μικρότερη των πέντε κόμβων)

- **Grounding**  
Προσάραξη
- **Loading condition of vessel** (laden or ballast)  
Κατάσταση φόρτωσης του πλοίου (φορτωμένο ή σε κατάσταση ερματισμού)
- **Quality of sea bottom** (sandy or rocky)  
Ποιότητα βυθού (αμμώδης ή βραχώδης)
- **Laden / Stuck** (yes or no)  
Κολλημένο στο βυθό
- **Water intake** (yes or no)  
Εισροή υδάτων
- **Usage of safe rescue** (yes or no)  
Χρήση μέσων διάσωσης
- **Fire** (yes or no)  
Πυρκαγιά
- **Black out** (yes or no)  
Μπλακάουτ
- **Nuclear accident** (yes or no)  
Πυρηνικό ατύχημα

Οι συνέπειες ελήφθησαν υπόψη όπως περιγράφηκαν στο τρίτο κεφάλαιο:

### CONSEQUENCES

(According to IMO. (2005). Casualty-related matters – reports on marine casualties and incidents. Revised harmonized reporting procedures – reports required under SOLAS regulation I/21 and MARPOL 73/78, articles 8 and 12, MSC-MEPC.3/Circ.1, London, UK.)

- **Less serious**
- **Serious**
- **Very serious** (incl. total loss)

Οι συνέπειες ενός πυρηνικού ατυχήματος περιγράφονται παρακάτω όπως ακριβώς λήφθηκαν υπόψη στην κατασκευή δέντρου γεγονότων στο τέταρτο κεφάλαιο:

- **No radiation leakage**
- **Minor radiation leakage**

- **Significant/Major radiation leakage**

Η κατάταξη των πυλών του δέντρου γεγονότων για την προσάραξη πλοίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 16 The classification of the barriers/event gates of the generic event tree for grounding accidents (i.e. Hazards, identity of grounding, impacts and consequences)

<u>HAZARDS</u>	<u>IDENTITY OF GROUNDING</u>	<u>IMPACTS</u>	<u>CONSEQUENCES</u>
Weather conditions	Vessel speed	Water intake	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Less serious</li> <li>• Serious</li> <li>• Very serious</li> </ul>
Human and organizational errors	Loading condition of vessel	Usage of safe rescue	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No radiation leakage</li> <li>• Minor radiation leakage</li> <li>• Significant/Major radiation leakage</li> </ul>
Shallow waters	Quality of sea bottom	Fire	
	Stuck	Black out	

Στα επόμενα 3 Σχήματα φαίνεται η πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για το ατύχημα της προσάραξης.



BLACK OUT		USAGE OF SAFE RESCUE		NUCLEAR ACCIDENT	
				Success	
		Success		Failure	
Success					
				Success	
		Failure		Failure	

**Σχήμα 61** Πορεία εργασίας για την κατασκευή των δέντρων γεγονότων για την περίπτωση της προσάραξης

Παρακάτω παρατίθεται η λίστα με τα σενάρια που έχουν υψηλή επικινδυνότητα, όπως αυτά προέκυψαν από το δέντρο γεγονότων. Στο σημείο αυτό, πρέπει να τονιστεί πως η τελευταία στήλη δεν είναι συμπληρωμένη – όπως και με τα σενάρια σύγκρουσης - με κάποια συγκεκριμένη συνέπεια, έστω κι αν αυτή προέκυπτε από το δέντρο γεγονότων καθώς ρωτήθηκαν οι ειδικοί οι οποίοι και συμπλήρωσαν αντίστοιχα ερωτηματολόγια, η επεξεργασία των οποίων παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

**HIGH SEVERITY SCENARIOS FOR GROUNDING**

Bad weather conditions→shallow waters→vessel speed more than 5 knots→grounding→laden vessel→ rocky sea bottom → stuck →water intake →black out →nuclear accident→ high severity consequences

Bad weather conditions→human error→shallow waters→vessel speed more than 5 knots→grounding→laden vessel→rocky sea bottom→fire →black out →nuclear accident→ high severity consequences

Human and Organizational error→vessel speed more than 5 knots→grounding→ballast vessel→sandy sea bottom→ high severity consequences

Bad weather conditions→vessel speed less than 5 knots→grounding→ballastvessel→sandy sea bottom→ high severity consequences

Bad weather conditions→vessel speed more than 5 knots→grounding→ballast vessel→ rocky sea bottom→stuck →fire→ black out→nuclear accident→ high severity consequences

Bad weather conditions→shallow waters →vessel speed less than 5 knots →grounding → laden vessel → rocky sea bottom → stuck → water intake → nuclear accident → high severity consequences

Human and organizational error→ shallow waters → vessel speed more than 5 knots →grounding→ laden vessel → rocky sea bottom → stuck → fire → nuclear accident → high severity consequences

Human and organizational error→shallow waters → vessel speed more than 5 knots → grounding→ laden vessel → rocky sea bottom → stuck → fire → nuclear accident → high severity consequences

Bad weather conditions→shallow waters → vessel speed more than 5 knots → grounding → laden vessel → rocky sea bottom → stuck → water intake → usage of safe rescue → high severity consequences

Bad weather conditions→human and organizational error → shallow waters →vessel speed more than 5 knots→ grounding → laden vessel →rocky sea bottom → fire → black out → nuclear accident → high severity consequences



Bad weather conditions → human and organizational error → shallow waters → vessel speed less than 5 knots → grounding → laden vessel → rocky sea bottom → water intake → usage of safe rescue → high severity consequences

Human and organizational error → shallow waters → vessel speed less than 5 knots → grounding → laden vessel → sandy sea bottom → use of safe rescue → high severity consequences

Bad weather conditions → shallow waters → vessel speed less than 5 knots → grounding → ballast vessel → rocky sea bottom → water intake → use of safe rescue → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → shallow waters → vessel speed more than 5 knots → grounding → laden vessel → rocky sea bottom → fire → nuclear accident → high severity consequences

Bad weather conditions → human and organizational error → shallow waters → vessel speed more than 5 knots → grounding → laden vessel → sandy sea bottom → stuck → water intake → use of safe rescue → high severity consequences

Shallow waters → vessel speed more than 5 knots → grounding → laden vessel → rocky sea bottom → stuck → fire → black out → nuclear accident → high severity consequences

Shallow waters → vessel speed more than 5 knots → grounding → laden vessel → rocky sea bottom → stuck → water intake → use of safe rescue → high severity consequences

Shallow waters → vessel speed less than 5 knots → grounding → ballast vessel → sandy sea bottom → fire → black out → nuclear accident → high severity consequences

Bad weather conditions → shallow waters → vessel speed more than 5 knots → grounding → laden vessel → sandy sea bottom → stuck → water intake → usage of safe rescue → high severity consequences

Bad weather conditions → vessel speed more than 5 knots → grounding → ballast vessel → sandy sea bottom → stuck → fire → black out → nuclear accident → high severity consequences

## 5.4 Βιβλιογραφία 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου

### Ιστοσελίδα

IHS SEA WEB: [www.sea-web.com](http://www.sea-web.com) (Access, January 2014)

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# 6

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΈΚΤΟ: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΥΡΗΝΟΚΙΝΗΤΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΓΙΑ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΑΞΗ ΑΠΟ ΕΙΔΙΚΟΥΣ

### 6.1 Ανάγκη αξιολόγησης

Η παραγωγή σεναρίων ασφάλειας για σύγκρουση και προσάραξη πυρηνοκίνητων πλοίων κατάδειξε την ανάγκη να υπάρξει και ένα δεύτερο στάδιο μελέτης όπου θα αξιολογηθούν τα αποτελέσματα και θα συγκεκριμενοποιηθούν οι παράμετροι του εκάστοτε σεναρίου ναυτικού ατυχήματος.

Ειδικότερα, ο στόχος της εργασίας είναι να προσδιορίσει αν ο ορισμός των κρίσιμων σεναρίων σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται στην σχεδίαση ενός πλοίου που «τροφοδοτείται» μέσω της πυρηνικής ενέργειας, είναι παρόμοιος με εκείνο που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό των συμβατικών μηχανοκίνητων πλοίων, και εάν η απάντηση είναι αρνητική, να προσδιοριστούν οι όποιες διαφορές και να καταγραφούν.

Μετά τον εντοπισμό, επομένως, των κινδύνων ακολουθεί η ανάλυση του ρίσκου (risk analysis), η αξιολόγηση του ρίσκου (risk assessment), ο έλεγχος εναλλακτικών επιλογών, η αξιολόγηση κόστους-οφέλους-Cost Benefit Assessment (CBA) και γίνονται οι συστάσεις για λήψη αποφάσεων βάσει των πέντε βημάτων της FSA. Ο εντοπισμός των κινδύνων έχει ήδη πραγματοποιηθεί μέσω της μελέτης παλαιότερων ατυχημάτων και μέσω της σύνθεσης του δέντρου γεγονότων. Στο στάδιο αυτό γίνεται η αξιολόγηση του ρίσκου, ένας μικρός έλεγχος εναλλακτικών επιλογών και αξιολόγησης κόστους – οφέλους, έτσι όπως προκύπτει από τις απαντήσεις και δίνονται ορισμένες συστάσεις από τους ειδικούς για τη λήψη αποφάσεων. Σε αυτό το σημείο, να σημειωθεί, πως για τα πλοία με πυρηνική πρόωση δεν υπάρχει αντίστοιχη FSA και οι όποιες μελέτες έχουν γίνει μέχρι στιγμής είναι αποσπασματικές.

Επομένως, η ανάγκη αξιολόγησης σε μία έρευνα που λαμβάνει χώρα για πρώτη φορά είναι επιβεβλημένη καθώς τα πυρηνοκίνητα πλοία για μη πολεμικές εφαρμογές είναι ακόμα, εν πολλοίς, σε στάδιο μελέτης και δεν υπάρχουν πολλά στοιχεία έτσι ώστε η μελέτη ασφάλειας αυτών των πλοίων να κινείται πάνω σε πεπατημένες έτοιμες φόρμουλες. Η αξιολόγηση, επομένως, θα δώσει μία ώθηση για ευαισθητοποίηση κάποιων ειδικών αφενός και αφετέρου θα φωτίσει ορισμένα στοιχεία και θα δώσει ώθηση για νέους δρόμους έρευνας πάνω στο ζήτημα των πυρηνοκίνητων πλοίων και την ασφάλειά τους.

Τελικός σκοπός της αξιολόγησης είναι, η προσεκτική μελέτη και σχεδίαση, με έμφαση στην ασφάλεια, ενός σκάφους με πυρηνική πρόωση για εμπορικούς σκοπούς.

## 6.2 Η επιλογή των ειδικών

Η επιλογή των ειδικών αποτελεί ένα δύσκολο εγχείρημα. Εξάλλου, η ασφάλεια ενός πυρηνοκίνητου πλοίου δεν αφορά μία μόνο ειδικότητα, αλλά χρειάζεται μία σύνθεση ειδικών από πολλά επιστημονικά πεδία, έτσι ώστε να συμβάλλουν δημιουργικά στην κατεύθυνση της ορθής εκτίμησης των δεδομένων.

Κατά ταυτό τον τρόπο, αποφασίστηκε οι ειδικοί να είναι:

- Ένας ναυπηγός με εμπειρία αρχιμηχανικού σε ναυτιλιακή εταιρεία, καθώς και σε νέες κατασκευές (new buildings).
- Ένας πλοίαρχος του εμπορικού ναυτικού με ικανά έτη εμπειρίας – θαλάσσιας υπηρεσίας.
- Δύο μηχανικοί του Πολεμικού Ναυτικού με γνώσεις από τα πυρηνοκίνητα αεροπλανοφόρα και υποβρύχια ξένων κρατών.
- Έναν ειδικό περιβαλλοντολόγο με ειδίκευση στη προκαλούμενη ρύπανση από τα ναυτικά ατυχήματα.
- Έναν πυρηνικό επιστήμονα – καθηγητή πυρηνικής τεχνολογίας.
- Έναν πυρηνικό επιστήμονα – ερευνητή.

Κατόπιν της επιλογής των ειδικών, εστάλησαν τα ερωτηματολόγια προς απάντηση. Επιπλέον, διενεργήθηκε και προσωπική συνέντευξη με επεξήγηση από πλευράς μας όπου χρειαζόταν ορισμένων σημείων αλλά και συμπλήρωση από τους ειδικούς κάποιων στοιχείων. Η συζήτηση κατέληξε και σε επιπλέον συμπεράσματα τα οποία καταγράφηκαν και παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

## 6.3 Τα ερωτηματολόγια για τη σύγκρουση και την προσάραξη

Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας, παρατίθενται τα ερωτηματολόγια για τη σύγκρουση και την προσάραξη όπως ακριβώς εστάλησαν στους ειδικούς.

Πρώτα παρουσιάζονται τα ερωτηματολόγια για τα σενάρια σύγκρουσης πυρηνοκίνητων πλοίων και κατόπιν για τα σενάρια προσάραξης.

Οι ερωτήσεις είναι πρωτότυπες και ουσιαστικές και ο τρόπος απάντησης εύχρηστος. Γίνεται αντιληπτό ότι με τη χρήση ερωτήσεων οι απαντήσεις μπορεί να γίνουν πολλαπλές σε αντίθεση με τα δέντρα που οι απαντήσεις είναι δυαδικές. Για παράδειγμα, εδώ δεν ενδιαφερόμαστε για το εάν απλά υπήρξε εισροή υδάτων αλλά και πού συνέβη αυτό. Οι απαντήσεις, δηλαδή, παύουν να είναι δυαδικές Αυτό οδηγεί σε ασφαλέστερα συμπεράσματα κι εκτιμήσεις για την συμπεριφορά της κατασκευής, στην συγκεκριμένη περίπτωση του πλοίου με χρήση πυρηνικής ενέργειας για την πρόωσή του, σε περίπτωση ατυχήματος.

Τα ερωτηματολόγια περιλαμβάνουν τις εξής ομάδες ερωτήσεων:

- Πρώτα από όλα ερωτήσεις που αφορούν έναν αριθμό σεναρίων υψηλής επικινδυνότητας όπως προέκυψαν από τα δέντρα γεγονότων, στα οποία καλούνται οι ειδικοί να προβλέψουν τις πιθανές συνέπειες όσον αφορά το ναυτικό ατύχημα και το πυρηνικό ατύχημα (ερώτηση 1).
- Δεύτερον ερωτήσεις στις οποίες καλούνται να κατασκευάσουν τα δικά τους σενάρια δεδομένης της υψηλής σοβαρότητας για τις αναμενόμενες συνέπειες (ερώτηση 2).
- Τρίτον ερωτήσεις που αφορούν την αξιολόγηση – κατάταξη σημαντικότητας των παραμέτρων των σεναρίων σε σχέση με τις συνέπειες μετά το ατύχημα (ερωτήσεις 3 και 7).
- Τέταρτον ερωτήσεις που εξετάζουν τη συνάφεια, τη συνέπεια και τη συσχέτιση (correlation), μέσα από μία σειρά πινάκων, μεταξύ των παραμέτρων των σεναρίων (ερωτήσεις 4, 5 και 6).

Στους δύο πυρηνικούς επιστήμονες διατυπώθηκαν από κοντά πιο εξειδικευμένες ερωτήσεις που έχουν σχέση με την συμπεριφορά του πυρηνικού αντιδραστήρα σε τυχόν ρωγή της κατασκευής, κατόπιν πυρκαγιάς, κατόπιν κατάκλυσης του διαμερίσματος καθώς και ερωτήσεις που αφορούν την έκλυση ακτινοβολίας και πώς μπορεί να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα της κατασκευής ή να προκαλέσει το οποιοδήποτε άλλο ατύχημα. Στους συγκεκριμένους **δεν δόθηκαν αυτά τα ερωτηματολόγια**, αλλά παρουσιάστηκαν, συνοπτικά, οι απαντήσεις των υπόλοιπων ειδικών με σκοπό το γόνιμο διάλογο και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Σε όλους τους ερωτώμενους, στο τέλος, παρατέθηκε μία τελευταία σειρά ερωτήσεων που αφορά τα δημογραφικά τους στοιχεία.

Να σημειωθεί πως και στις δύο περιπτώσεις έγινε ευρεία συζήτηση με τους ειδικούς και διευρύνθηκαν οι παράμετροι που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και εξειδικεύτηκαν κατάλληλα. Ουσιαστικά, κατασκευάστηκε από την αρχή μία νέα σειρά γεγονότων με βάση την υπάρχουσα και δόθηκαν προς κρίση τα καινούρια σενάρια.

## 6.4 Επεξεργασία απαντήσεων

### 6.4.1. Η περίπτωση της σύγκρουσης

Ξεκινώντας από την πρώτη ερώτηση, όπου οι ειδικοί συμπλήρωναν τις συνέπειες στα διάφορα σενάρια, η ανάλυση έδειξε πως σε όλα τα σενάρια αυτά – τα οποία έτσι κι αλλιώς χαρακτηρίζονταν ως high severity scenarios – οι ειδικοί συμπλήρωσαν τις κατά σχεδόν αντίστοιχο τρόπο με την ανάλυση δέντρων γεγονότων τις συνέπειες των ατυχημάτων.

Στους ειδικούς δόθηκε, επίσης, ένα πλήθος σεναρίων, που **περιελάμβανε κινδύνους (hazards) τη γεωμετρία του εκάστοτε ατυχήματος (identity of accident), τα αποτελέσματα (impacts) και τις συνέπειες (consequences)** και καλούνταν να

επιλέξουν τα πλέον πιθανά σενάρια για τις πλέον απευκταίες – σημαντικές συνέπειες (Ερώτηση 2).

Ο διαχωρισμός των παραμέτρων στην περίπτωση της σύγκρουσης είναι ο παρακάτω:

### **COLLISION:**

- ✓ Hazards: a) bad weather conditions, b) human and organizational error, c) high density of maritime traffic
- ✓ Parameters related to collision geometry: a) vessel speed more than 5 knots, b) angle of collision more than  $60^\circ$ , c) ratio of vessels masses more than 1, d) collision location: Engine room
- ✓ Impacts: a) water intake, b) usage of safe rescue c) black out, d) fire.

Σε όλα τα σενάρια που σχημάτισαν οι ειδικοί, εντύπωση μας έκανε ότι στην περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος, οι συνέπειες ήταν της κλάσης very serious, ενώ όπου δεν επιλεγόταν η παράμετρος nuclear accident αυτό δεν θεωρούταν δεδομένο.

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την επεξεργασία της ερώτησης 3 κατά την οποία βαθμονομούνται οι παράμετροι της σύγκρουσης.

Στην τρίτη ερώτηση ζητήσαμε από τους ειδικούς να μας βαθμολογήσουν τις παραμέτρους ενός συμβάντος (ατυχήματος) σύγκρουσης, θέτοντας τις σε σειρά από την πλέον σημαντική στην πλέον ασήμαντη κατά αυτούς παράμετρο. Επιπλέον ο κάθε ένας από τους ειδικούς είχε την ευχέρεια να προσθέσει όσες επιπλέον παραμέτρους πίστευε ότι καθορίζουν το συγκεκριμένο ατύχημα.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, βρήκαμε τον μέσο όρο της βαθμολογίας από τους ειδικούς για κάθε παράμετρο, την διάμεσο για κάθε παράμετρο και κατατάξαμε τις παραμέτρους με σειρά αύξουσας διαμέσου (από την σημαντικότερη στην λιγότερο σημαντική).

Σημειωτέον, ότι η διάμεσος X δείχνει ότι πάνω από τους μισούς ερωτηθέντες κατέταξαν μία παράμετρο σε υψηλότερη θέση ή στην θέση X στην λίστα των παραμέτρων. Ο μέσος όρος, δείχνει τη μέση θέση σύμφωνα με την κατάταξη των ερωτηθέντων.

Στην πρώτη στήλη του πίνακα βρίσκεται διάμεσος με αύξουσα σειρά, από τις απαντήσεις που δόθηκαν, στη δεύτερη ο μέσος όρος και στην τρίτη το είδος της παραμέτρου.

Τα αποτελέσματα για την σύγκρουση των πλοίων είναι τα εξής:

### **COLLISION:**

Πίνακας 17 Αποτελέσματα βαθμονόμησης παραμέτρων σύγκρουσης από τους ειδικούς κατά αύξουσα διάμεσο και το αντίστοιχο μέσο όρο

Parameters/Barriers	Median	Average	Type
Human and organizational error	1	6.4	Hazard
Vessel speed	3	6.6	Hazard
Weather conditions	5	8.2	Hazard
Angle of collision	5	6.0	Identity
Striking/struck vessel	5	8.2	Identity
Ratio of vessel masses	6	7.2	Identity
Water intake in E/R	8	9.0	Impact
Water intake in cargo area	8	10.8	Impact
Water intake in pump room in case of tankers	8	9.4	Impact
Fire in E/R	8	8.6	Impact
Fire in cargo area	9	9.6	Impact
High density of maritime traffic	10	11.0	Hazard
On-board area of collision (cargo area)	10	9.0	Identity
Fire in pump room in case of tankers	10	9.4	Impact
Fire in forecastle	10	12.6	Impact
Black out	10	9.4	Impact
Usage of safe rescue	10	7.6	Impact
On-board area of collision (E/R)	12	11.6	Identity
Water intake in forecastle	15	13.0	Impact
Fire in accommodation	15	13.2	Impact

Βάσει της διαμέσου, διαπιστώνουμε για την σύγκρουση ότι το 50% των σημαντικότερων παραμέτρων είναι οι εξής: **Human and organizational error, Vessel speed, Weather conditions, Angle of collision, Striking/struck vessel, Ratio of vessel masses, Water intake in E/R, Water intake in cargo area, Water intake in pump room in case of tankers, Fire in E/R, Fire in cargo area.**

Βάσει του μέσου όρου το 50% των σημαντικότερων παραμέτρων είναι οι εξής: **Water intake in cargo area, Water intake in pump room in case of tankers, Fire in cargo area, High density of maritime traffic, Fire in pump room in case of tankers, Fire in forecastle, Black out, On board area of collision (E/R), Water intake in forecastle, Fire in accommodation.**

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι κοινές σημαντικοί παράμετροι βάσει της διαμέσου και του μέσου όρου με τις αντίστοιχες τιμές τους.

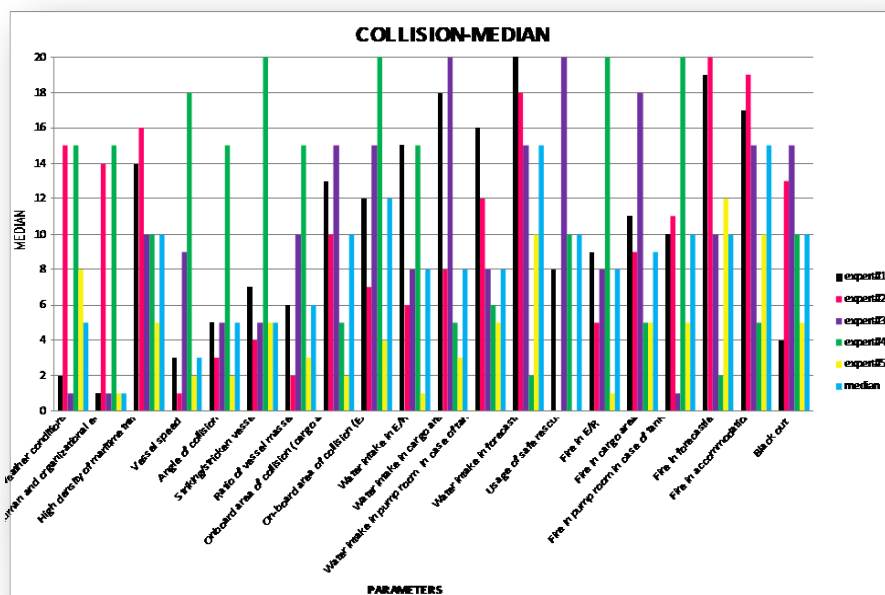
Πίνακας 18 Κοινές βάσει της διαμέτρου και του μέσου όρου σημαντικοί παράμετροι της σύγκρουσης όπως προέκυψαν από τις απαντήσεις των ειδικών

PARAMETER	MEDIAN	AVERAGE
Water intake in cargo area	8	10,8
Water intake in pump room in case of tankers	8	9,4
Fire in cargo area	9	9,6

Όσον αφορά τη σύγκρουση, πρέπει να τονιστεί ότι οι παρακάτω παράγοντες *On-board area of collision (cargo area), Fire in pump room in case of tankers, Black out usage of safe rescue*, έχουν μικρό μέσο όρο σε σχέση με τη διάμεσό τους κι αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπάρξει περαιτέρω έρευνα.

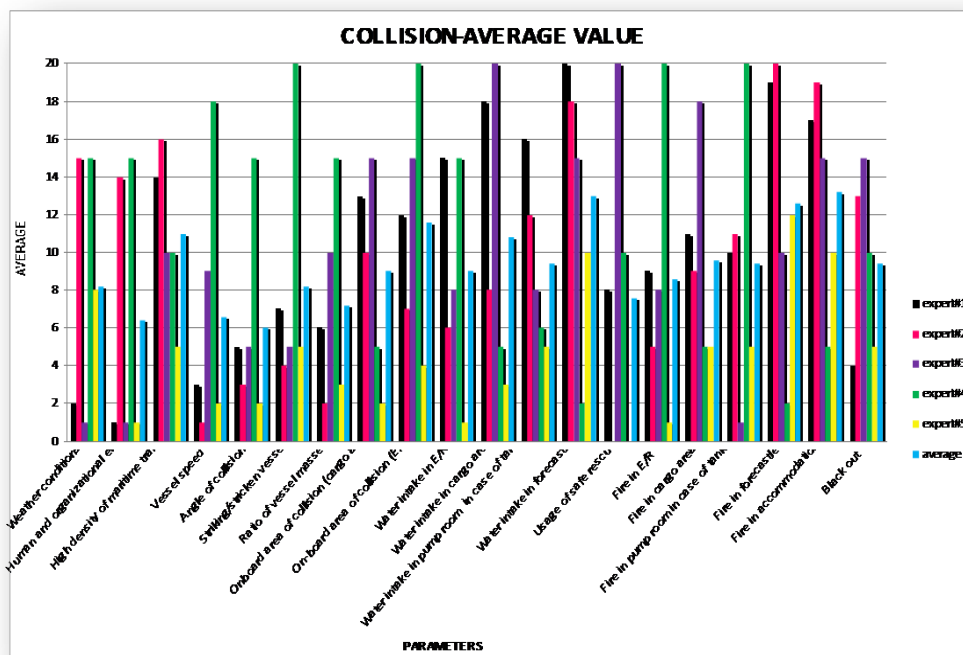
Στο Σχήμα 62, φαίνεται η κατάταξη των παραμέτρων της σύγκρουσης βάσει της διαμέσου.

Σχήμα 62 Ranking the parameters of collision in relation with the median





Στο Σχήμα 63 φαίνεται η κατάταξη των παραμέτρων της σύγκρουσης βάσει του μέσου όρου



Σχήμα 63 Ranking the parameters of collision in relation with the average

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάποιοι από τους ερωτηθέντες ειδικούς προσέθεσαν και τις δικές τους παραμέτρους στο πεδίο των κινδύνων (Hazards) που είναι οι εξής:

- i. Equipment failure (e.g. rudder) (πχ αστοχία – καταστροφή του πηδαλίου)
- ii. Experience/training/skills of crew (η συγκεκριμένη παράμετρος από πολλούς εντάσσεται στον ανθρώπινο παράγοντα αλλά από άλλους όπως σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ξεχωριστή με την έννοια ότι δεν υπάρχει ενεργητική ενοχή του ανθρώπου ως προς ένα ατύχημα αλλά αυτό είναι εξαιτίας της κακής του εκπαίδευσης και της ελλιπούς εμπειρίας και προσόντων)
- iii. Luck (Τύχη)
- iv. Act of God unexpected (έχει να κάνει με οποιοδήποτε απρόβλεπτο και πέρα της συνήθους λογικής παράγοντα πρόκλησης ατυχήματος)
- v. Natural phenomena (εμείς βέβαια τα εντάξαμε στις καιρικές συνθήκες)

Κατά την επεξεργασία του τέταρτου ερωτήματος έγινε προσπάθεια να φανεί η κριτική συσχέτιση των παραμέτρων μεταξύ τους με ερώτηση ως προς το αν αυτή η συσχέτιση μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω ανάπτυξη του ατυχήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 64, όπου με κόκκινο χρώμα έχουν σημειωθεί οι κριτικοί συνδυασμοί παραμέτρων για τις οποίες συμφωνεί το σύνολο των ειδικών, με κυανό χρώμα οι τέσσερις στους πέντε ειδικούς και με πράσινο χρώμα οι τρεις στους πέντε ειδικούς.

Ως πλέον κρίσιμους συνδυασμούς θεωρήσαμε αυτούς που συμφωνούν όλοι οι ειδικοί ή οι τέσσερις στους πέντε, λόγω του μικρού δείγματος απαντήσεων και τους παρουσιάζουμε παρακάτω, στο Σχήμα 64.

**Σχήμα 64** Πίνακας βαθμολόγησης της συσχέτισης των παραμέτρων μεταξύ τους από τους ειδικούς για την περίπτωση της σύγκρουσης

	Weather	HOE	Traffic	Speed	Angle	Striking/ Stricken	Masses	Area	Water intake	Safe rescue	Fire	Black out	Nuclear accident
Weather	Black	Blue	Blue	Red				Blue	Red		Green		Blue
HOE		Black	Blue	Blue	Green	Green	Green	Blue		Green		Green	Blue
Traffic	Green	Green	Black	Blue									
Speed		Green		Black			Green	Green	Green				
Angle					Black	Green	Blue	Green	Blue				
Striking/ Stricken		Green		Green		Black	Green	Green	Green				
Masses				Green			Black		Green				
Area								Black	Blue		Green		Blue
Water intake							Green		Black				
Safe rescue										Black	Green		Green
Fire											Black	Green	Green
Black out											Green	Black	Green
Nuclear accident		Green											Black

Παρατηρώντας κανείς πολύ προσεκτικά τον πίνακα και τις απαντήσεις των ειδικών, φαίνεται ότι οι δύο πιο κρίσιμοι συσχετισμοί παραμέτρων που μπορεί να οδηγήσουν σε περαιτέρω ανάπτυξη ενός ατυχήματος (κόκκινο χρώμα) είναι οι εξής:

- **Water Intake ~ Bad weather conditions**
- **Vessel Speed ~ Bad weather conditions**

Οι επόμενοι συνδυασμοί που συμφώνησαν οι τέσσερις από τους πέντε ειδικούς (κυανό χρώμα) είναι οι εξής:

- **Human and organizational error ~ Bad weather conditions**
- **Traffic ~ Bad weather conditions**
- **Area of collision ~ Bad weather conditions**
- **Nuclear accident ~ Bad weather conditions**
- **Traffic ~ Human and organizational error**
- **Speed ~ Human and organizational error**
- **Area ~ Human and organizational error**

- **Nuclear Accident ~ Human and organizational error**
- **Speed ~ Traffic**
- **Ratio of masses of ships ~ Angle**
- **Water intake ~ Angle**
- **Water intake ~ Area of collision**
- **Nuclear accident ~ Area of collision**

Στο πέμπτο ερώτημα έγινε μεγαλύτερη εξειδίκευση, ζητώντας από τους ειδικούς τη συσχέτιση των κινδύνων με τα χαρακτηριστικά του ατυχήματος της σύγκρουσης και των χαρακτηριστικών του ατυχήματος με τα αποτελέσματα και των αποτελεσμάτων με τις συνέπειες. Παρουσιάζονται οι συσχετίσεις με τη μέγιστη συχνότητα – συμφωνία ειδικών. Ξεκινώντας από την κριτική συσχέτιση των κινδύνων με τα χαρακτηριστικά της σύγκρουσης καταλήγουμε στις εξής συσχετίσεις βάσει των απαντήσεων των ειδικών:

- **Human and organizational error ~ Angle of collision**
- **Speed of vessels ~ Angle of collision, ratio of vessel masses, area of collision**

Πίνακας 19 Κριτική συσχέτιση των κινδύνων με τα χαρακτηριστικά της σύγκρουσης βάσει των απαντήσεων των ειδικών

	Angle	Striking / Stricken	Masses	Area
Weather				
HOE	X			
Traffic				
Speed	X		X	X

Παρακάτω, φαίνονται οι κύριες συσχετίσεις κατόπιν επεξεργασίας των απαντήσεων των ειδικών σε ότι αφορά την κατηγορία των παραμέτρων που συνιστούν τα χαρακτηριστικά του ατυχήματος ή αλλιώς τη γεωμετρία της σύγκρουσης και την κατηγορία των παραμέτρων που θεωρούνται τα πρώτα άμεσα αποτελέσματα στην διαδοχική σειρά των γεγονότων που συνιστούν ένα σενάριο.

Πίνακας 20 Κριτική συσχέτιση των χαρακτηριστικών της σύγκρουσης με τα αποτελέσματα του ατυχήματος βάσει των απαντήσεων των ειδικών

	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident
Angle	X	X		X
Striking/stricken		X		X
Masses	X			X
Area			X	X

Βάσει των απαντήσεων των ειδικών, οι κρίσιμοι συνδυασμοί είναι οι εξής:

- **Angle ~ Water intake**
- **Angle ~ Fire**
- **Angle ~ Nuclear accident**
- **Ratio of vessel masses ~ Water intake**
- **Ratio of vessel masses ~ Nuclear accident**
- **Area of collision ~ Nuclear accident**

Τέλος, στον παρακάτω Πίνακα φαίνεται η συσχέτιση των παραγόντων που χαρακτηρίζονται ως αποτελέσματα με τις συνέπειες του ατυχήματος, βάσει των απαντήσεων με τη μέγιστη συχνότητα:

**Πίνακας 21** Κριτική συσχέτιση αποτελεσμάτων – συνεπειών ατυχήματος σύγκρουσης βάσει των απαντήσεων των ειδικών

	<b>Less serious</b>	<b>Serious</b>	<b>Very serious (incl. Total loss)</b>	<b>No radiation leakage</b>	<b>Minor radiation Leakage</b>	<b>Major/significant radiation leakage</b>
<b>Water intake</b>		X	X			
<b>Fire</b>		X			X	
<b>Black out</b>	X	X				
<b>Nuclear accident</b>			X		X	X

Από αυτή την περίπτωση καταλήγουμε ότι very serious consequences (incl. total loss) μπορεί να επιφέρει η εισροή υδάτων και το πυρηνικό ατύχημα, κι ότι εξαιρετική έκλυση ραδιενέργειας πραγματοποιείται κατόπιν πυρηνικού ατυχήματος. Serious consequences (σοβαρές συνέπειες) προκαλούνται από την εισροή υδάτων, την πυρκαγιά και το μπλακάουτ.

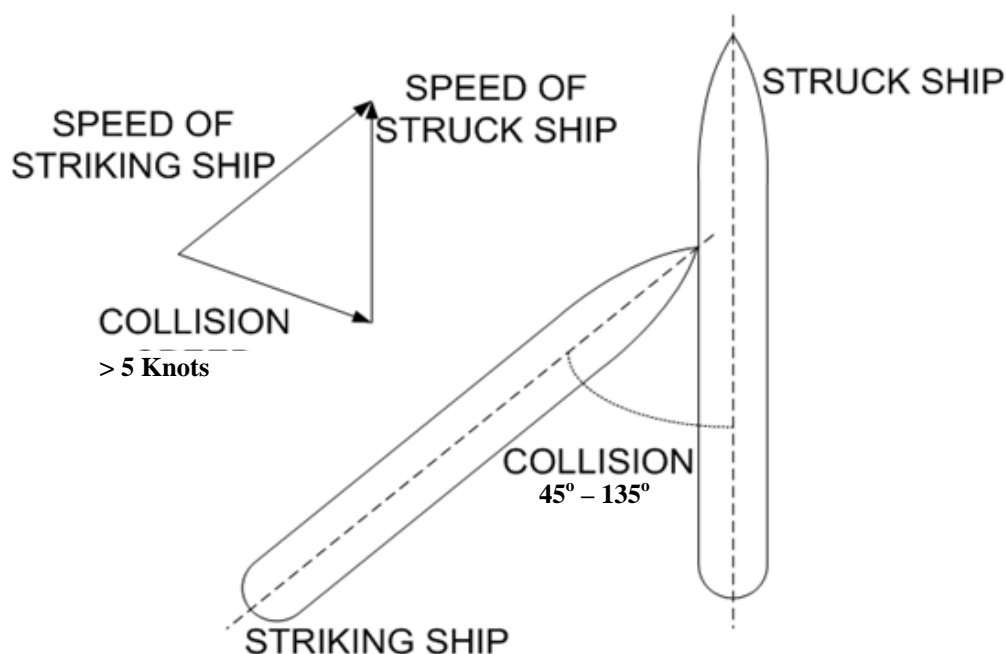
Στην έκτη ερώτηση έγιναν κάποιες θεωρητικές ερωτήσεις οι οποίες αφορούσαν και στοιχεία ναυτικής ασφάλειας αλλά και θέματα ραδιενέργειας και πυρηνικών ατυχημάτων. Τα αποτελέσματα της έκτης ερώτησης που είναι κοινή και για τις δύο περιπτώσεις ατυχημάτων, συμπεριλαμβάνονται στο επόμενο κεφάλαιο που παρατίθενται αναλυτικά τα συμπεράσματα από την έρευνα.

Όσον αφορά την σύγκρουση πλοίων, θεωρείται κρίσιμη περιοχή στην κατάσταση ballast του πλοίου η περιοχή του μηχανοστασίου και σε κατάσταση φόρτωσης, η περιοχή των χώρων φορτίου.

Οι απαντήσεις των ειδικών πυρηνικών επιστημόνων αναλύονται κι αυτές, επίσης, στο επόμενο κεφάλαιο, παρόλα αυτά έχει αξία να γραφτεί, ότι στην περίπτωση της

σύγκρουσης, είναι εξαιρετικά δύσκολο να υπάρξει αστοχία του περιβλήματος ενός μικρού πυρηνικούς αντιδραστήρα.

Τέλος, η έβδομη ερώτηση αφορούσε τη γεωμετρία της σύγκρουσης. Συγκεκριμένα, δόθηκε ένα σχήμα στους ερωτηθέντες ειδικούς από τους οποίους ζητούνταν να εκτιμηθούν οι τιμές διαφόρων παραγόντων που θεωρούσαν ότι είναι κρίσιμες για την περαιτέρω εξέλιξη του ατυχήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 65:



Σχήμα 65 Βαθμονόμηση από τους ειδικούς των κρίσιμων μεγεθών της σύγκρουσης

Στο σχήμα αυτό διαπιστώνουμε από τις απαντήσεις των ειδικών, ότι η συνισταμένη της ταχύτητας των δύο πλοίων, η ταχύτητα σύγκρουσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα όσον αφορά την περαιτέρω εξέλιξη του ατυχήματος και την αρνητική διαβάθμιση των συνεπειών όταν είναι μεγαλύτερη από πέντε κόμβους. Επίσης η γωνία σύγκρουσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, βάσει των απαντήσεων των ειδικών, όταν βρίσκεται μεταξύ 45° και 135°.

#### 6.4.2 Η περίπτωση της προσάραξης

Ξεκινώντας από την πρώτη ερώτηση, όπου οι ειδικοί συμπλήρωναν τις συνέπειες στα διάφορα σενάρια, η ανάλυση έδειξε πως σε όλα τα σενάρια αυτά – τα οποία έτσι κι αλλιώς χαρακτηρίζονταν ως high severity scenarios – οι ειδικοί συμπλήρωσαν τις δυσμενέστερες των συνεπειών, κατά σχεδόν αντίστοιχο τρόπο με την ανάλυση δέντρων γεγονότων.

Στους ειδικούς δόθηκε, επίσης, ένα πλήθος σεναρίων, που περιελάμβανε **κινδύνους (hazards) τη γεωμετρία του εκάστοτε ατυχήματος, τα αποτελέσματα (impacts)**

και τις συνέπειες (consequences) και καλούνταν να επιλέξουν τα πλέον πιθανά σενάρια για τις πλέον απευκταίες – σημαντικές συνέπειες (Ερώτηση 2).

Η ομαδοποίηση των παραμέτρων για την περίπτωση της προσάραξης είναι η εξής:

#### **GROUNDING:**

- ✓ Hazards: a) bad weather conditions, b) human and organizational error, c) engine failure, d) forward trim, e) vessel speed in restricted areas and reduced vessel speed, f) laden vessel, g) rocky sea bottom
- ✓ Parameters related to the identity of grounding: a) stranded vessel, b) location of first contact along the length of vessel
- ✓ Impacts: a) water intake, b) fire, and c) black out.

Να σημειωθεί ότι ως engine failure θεωρούμε, την οποιαδήποτε βλάβη στο δευτεροβάθμιο σύστημα ενός πυρηνοκίνητου πλοίου.

Σε όλα τα σενάρια που σχημάτισαν οι ειδικοί, εντύπωση μας έκανε ότι στην περίπτωση πυρηνικού ατυχήματος, οι συνέπειες ήταν της κλάσης very serious, ενώ όπου δεν επιλεγόταν η παράμετρος nuclear accident αυτό δεν θεωρούταν δεδομένο.

Συνεχίζουμε την ανάλυση με την επεξεργασία της ερώτησης 3 κατά την οποία βαθμονομούνται οι παράμετροι της προσάραξης.

Στην τρίτη ερώτηση ζητήσαμε από τους ειδικούς να μας βαθμολογήσουν τις παραμέτρους ενός συμβάντος (ατυχήματος) προσάραξης, θέτοντας τις σε σειρά, από την πλέον σημαντική στην πλέον ασήμαντη κατά αυτούς παράμετρο. Επιπλέον ο κάθε ένας από τους ειδικούς είχε την ευχέρεια να προσθέσει όσες επιπλέον παραμέτρους πίστευε ότι καθορίζουν το συγκεκριμένο ατύχημα.

Κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, βρήκαμε τον μέσο όρο της βαθμολογίας από τους ειδικούς για κάθε παράμετρο, την διάμεσο για κάθε παράμετρο και κατατάξαμε τις παραμέτρους με σειρά αύξουσας διαμέσου (από την σημαντικότερη στην λιγότερο σημαντική).

Σημειωτέον, ότι η διάμεσος X δείχνει ότι πάνω από τους μισούς ερωτηθέντες κατέταξαν μία παράμετρο σε υψηλότερη θέση ή στην θέση X στην λίστα των παραμέτρων. Ο μέσος όρος, δείχνει τη μέση θέση σύμφωνα με την κατάταξη των ερωτηθέντων.

Στην πρώτη στήλη του πίνακα βρίσκεται διάμεσος, από τις απαντήσεις που δόθηκαν, στη δεύτερη ο μέσος όρος και στην τρίτη το είδος της παραμέτρου (Hazard, Impact, Identity of grounding).

Τα αποτελέσματα για την προσάραξη των πλοίων είναι τα εξής:

#### **GROUNDING:**

Πίνακας 22 Αποτελέσματα βαθμονόμησης παραμέτρων προσάραξης από τους ειδικούς κατά αύξουσα διάμεσο και το αντίστοιχο μέσο όρο

<b>Parameters/Barriers</b>	<b>Median</b>	<b>Average</b>	<b>Type</b>
Water intake in more than 2 compartments	1	2.8	Impact
Human and organizational error	2	2	Hazard
Water intake in cargo area	2	2.2	Impact
Fire in cargo area	2.5	2.4	Impact
Fire in E/R	2.5	2.6	Impact
Engine failure	2.5	2	Impact
Water intake in E/R	2.5	2.6	Impact
Vessel speed	3	3	Hazard
Water intake in pump room (in case of tankers)	3	2.2	Impact
Black out	3.5	3.5	Impact
Extend of damage	3.5	3.2	Impact
Type of sea bottom	4	3.2	Hazard
Trim (forward)	4	2.6	Hazard
Weather conditions	4	4.2	Hazard
Fire in pump room in case of tankers	5	2.6	Impact
Fire in accommodation	5	5.3	Impact
Loading condition of vessel	5	3.8	Hazard
Water intake in 2 compartments	5	2.6	Impact
Water intake in 1 compartment	5	2.8	Impact
Tide (low)	5	4	Hazard
Location of first contact	5	4	Identity
Fire in forecastle	7	3.2	Impact

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα το 50% των σημαντικότερων παραμέτρων ενός ατυχήματος προσάραξης βάσει της διαμέσου είναι οι εξής: **Water intake in more than 2 compartments, Human and organizational error, Water intake in cargo area, Fire in cargo area, Fire in E/R, Engine failure, Water intake in E/R, Vessel speed, Water intake in pump room (in case of tankers), Black out, Extend of damage, Type of sea bottom, Trim (forward), Weather conditions.**

Βάσει του μέσου όρου, το 50% των σημαντικότερων παραμέτρων ενός ατυχήματος προσάραξης είναι οι εξής: **Fire in accommodation, Weather conditions, Tide, Location of first contact, Loading condition of vessel, Black out, Extend of damage, Type of sea bottom, Fire in forecandle, Vessel speed, Water intake in more than 2 compartments, Water intake in 1 compartments.**

Στον παρακάτω Πίνακα φαίνονται οι κοινές σημαντικοί παράμετροι βάσει της διαμέσου και του μέσου όρου με τις αντίστοιχες τιμές τους.

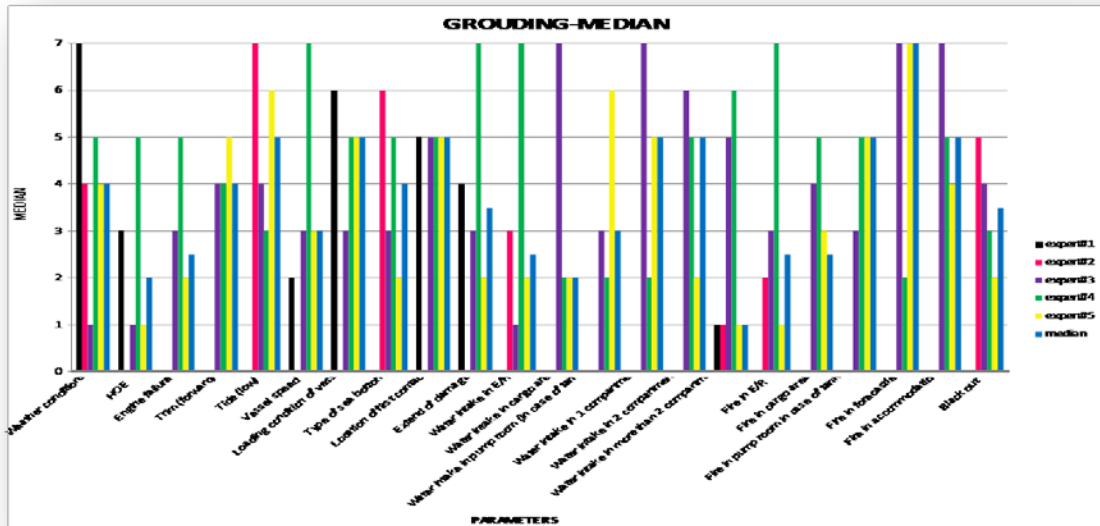
Πίνακας 23 Κοινές βάσει της διαμέτρου και του μέσου όρου σημαντικοί παράμετροι της προσάραξης όπως προέκυψαν από τις απαντήσεις των ειδικών

PARAMETER	MEDIAN	AVERAGE
Water intake in more than 2 compartments	1	2,8
Vessel Speed	3	3
Black out	3,5	3,5
Extend of damage	3,5	3,2
Type of sea bottom	4	3,2
Weather conditions	4	4,2

Όσον αφορά την προσάραξη, οι παράμετροι *Trim (forward), Fire in pump room in case of tankers, Loading condition of vessel, Water intake in 2 compartments, Water intake in 1 compartment and Fire in forecandle*, έχουν μικρό μέσο όρο σε σχέση με τη διάμεσό τους κι αυτό θα πρέπει να γίνει αντικείμενο μεγαλύτερης έρευνας.

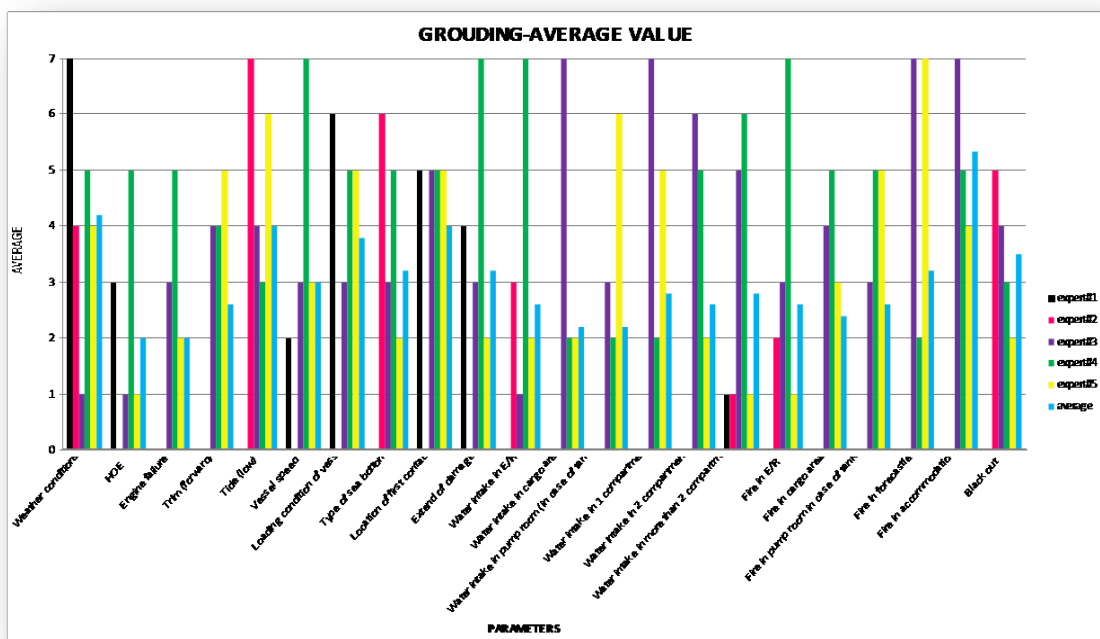
Στο Σχήμα 66, φαίνεται η κατάταξη των παραμέτρων της προσάραξης βάσει της διαμέσου:





Σχήμα 66 Ranking the parameters of grounding in relation with the median

Στο Σχήμα 67 φαίνεται η κατάταξη των παραμέτρων της προσάραξης βάσει του μέσου όρου:



Σχήμα 67 Ranking the parameters of collision in relation with the average

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάποιος από τους ερωτηθέντες ειδικούς προσέθεσε και τις δικές τους παραμέτρους στο πεδίο των κινδύνων (Hazards) που είναι οι εξής:

- i. Experience/training/skills of crew/personnel (η συγκεκριμένη παράμετρος από πολλούς εντάσσεται στον ανθρώπινο παράγοντα αλλά από άλλους όπως σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ξεχωριστή με την έννοια ότι δεν υπάρχει ενεργητική ενοχή του ανθρώπου ως προς ένα ατύχημα αλλά αυτό είναι

εξαιτίας τις κακής του εκπαίδευσης και της ελλιπούς εμπειρίας και προσόντων)

- ii. Luck (Τύχη)
- iii. Act of God unexpected (έχει να κάνει με οποιοδήποτε απρόβλεπτο και πέρα της συνήθους λογικής παράγοντα πρόκλησης ατυχήματος)
- iv. Natural phenomena (εμείς βέβαια τα εντάξαμε στις καιρικές συνθήκες)

Δεν ενέταξαν οι ειδικοί την παράμετρο equipment failure, σε αντίθεση με την περίπτωση της σύγκρουσης.

Κατά την επεξεργασία του τέταρτου ερωτήματος έγινε προσπάθεια να φανεί η κριτική συσχέτιση των παραμέτρων μεταξύ τους με ερώτηση ως προς το αν αυτή η συσχέτιση μπορεί να προκαλέσει περαιτέρω ανάπτυξη του ατυχήματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, όπου με κόκκινο χρώμα έχουν σημειωθεί οι κριτικοί συνδυασμοί παραμέτρων για τις οποίες συμφωνεί το σύνολο των ειδικών, με κυανό χρώμα οι τέσσερις στους πέντε ειδικούς και με πράσινο χρώμα οι τρεις στους πέντε ειδικούς.

Ως πλέον κρίσιμους συνδυασμούς θεωρήσαμε αυτούς που συμφωνούν όλοι οι ειδικοί ή οι τέσσερις στους πέντε. Να σημειωθεί ότι στο παρακάτω Σχήμα, 68, προστέθηκε και η παράμετρος Tide (παλίρροια), καθώς ζητήθηκε από τρεις από τους πέντε συμμετέχοντες ειδικούς στην έρευνα. Στην απόφαση εάν θα έπρεπε να συμπεριληφθεί και στις προηγούμενες ερωτήσεις, κατόπιν τηλεδιάσκεψης με τους πέντε ειδικούς οι απόψεις είχαν ποικιλία. Οι άλλες παράμετροι που προστέθηκαν και περιγράφηκαν πιο πάνω καις την περίπτωση της σύγκρουσης ήταν παράμετροι που ελεύθερα ο καθένας έθετε. Στη συγκεκριμένη, υπήρξε προβληματισμός επειδή την έθεσαν τρεις από τους πέντε ερευνητές. Παρόλα αυτά επειδή υπήρχε διαφωνία ακόμη κι από ερευνητή που έθεσε την παράμετρο εάν θα πρέπει να γίνει επανεξέταση κι αν συμπεριλαμβάνεται στην παράμετρο weather conditions, εντάχθηκε στην επόμενη ερώτηση.

Σχήμα 68 Πίνακας βαθμονόμησης της συσχέτισης των παραμέτρων μεταξύ τους από τους ειδικούς για την περίπτωση της προσάραξης

	Weather	HOE	Eng.Failure	Trim	Tide	Speed	Loading condition	Sea bottom	Stranded	Location	Damage extension	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident
Weather	Black	Green	Green	Blue	White	Green	Green	Green	Red	Green	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue
HOE	Green	Black	Green	White	White	Blue	White	White	White	White	Green	Blue	Blue	Blue	Blue
Eng.Failure	Green	White	Black	White	White	White	White	Green	White	White	White	White	Blue	Green	Blue
Trim	Green	White	White	Black	White	White	Green	Green	Blue	White	White	Blue	White	White	White
Tide	Green	White	White	White	Black	White	White	White	Blue	Green	Green	White	White	White	White
Speed	White	White	White	Green	White	Black	Green	Green	Blue	Blue	Blue	Green	White	White	Green
Loading condition	Green	White	White	White	White	White	Black	White	Green	White	White	Green	White	White	White
Sea bottom	Green	White	White	White	White	White	White	Black	Blue	Green	Blue	Blue	White	White	White
Stranded	Green	White	White	Green	White	White	White	White	Black	Blue	Green	Green	White	White	White
Location	White	White	White	White	White	White	White	Green	White	Black	Blue	White	White	White	White
Damage extension	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	Black	White	White	White	White
Water intake	White	White	White	Green	Green	White	White	White	White	White	White	Black	White	White	White
Fire	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	Black	Green	Green
Black out	White	White	Green	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	Black	Green
Nuclear accident	Green	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	White	Black

Παρατηρώντας κανείς πολύ προσεκτικά τον πίνακα και τις απαντήσεις των ειδικών, φαίνεται ότι οι πιο κρίσιμοι συσχετισμοί παραμέτρων που μπορεί να οδηγήσουν σε περαιτέρω ανάπτυξη ενός ατυχήματος (κόκκινο χρώμα) είναι οι εξής:

- **Weather conditions ~ Stranded ship**

Οι επόμενοι συνδυασμοί που συμφώνησαν οι τέσσερις από τους πέντε ειδικούς (κυανό χρώμα) είναι οι εξής:

- **Weather conditions ~ Trim**
- **Weather conditions ~ Extend of damage**
- **Weather conditions ~ Water intake**
- **Human and organizational error ~ Vessel speed**
- **Human and organizational error ~ Water intake**
- **Human and organizational error ~ Fire**
- **Human and organizational error ~ Black out**
- **Engine failure ~ Fire**
- **Engine failure ~ Nuclear Accident**
- **Trim ~ Stranded ship**
- **Trim-water intake**
- **Tide ~ Stranded ship**
- **Vessel speed ~ Stranded ship**
- **Vessel speed ~ Location of first contact**
- **Vessel speed ~ Damage extension**
- **Sea bottom ~ Stranded ship**
- **Sea bottom ~ Extend of damage**
- **Sea bottom ~ Water intake**
- **Stranded ship ~ Location of first contact**
- **Location of first contact ~ Extend of damage**

Στο πέμπτο ερώτημα έγινε μεγαλύτερη εξειδίκευση, ζητώντας από τους ειδικούς τη συσχέτιση των κινδύνων με τα χαρακτηριστικά του ατυχήματος της προσάραξης και των χαρακτηριστικών του ατυχήματος με τα αποτελέσματα και των αποτελεσμάτων με τις συνέπειες. Παρουσιάζονται οι συσχετίσεις με τη μέγιστη συχνότητα – συμφωνία ειδικών.

Ξεκινώντας από την κριτική συσχέτιση των κινδύνων με τα χαρακτηριστικά της σύγκρουσης καταλήγουμε στις εξής συσχετίσεις βάσει των απαντήσεων των ειδικών:

- **Human and organizational errors ~ Stranded ship**
- **Engine failure ~ Stranded ship**
- **Trim ~ Location of first contact**

Πίνακας 24 Κριτική συσχέτιση των κινδύνων και των χαρακτηριστικών της προσάραξης βάσει των απαντήσεων των ειδικών

	Stranded	Location of first contact
Weather		
HOE	X	
Engine failure	X	
Trim		X
Tide		
Speed		
Loading condition		
Sea bottom		

Παρακάτω, φαίνονται οι κύριες συσχετίσεις κατόπιν επεξεργασίας των απαντήσεων των ειδικών σε ότι αφορά την κατηγορία των παραμέτρων που συνιστούν τα χαρακτηριστικά του ατυχήματος ή αλλιώς τη γεωμετρία της προσάραξης και την κατηγορία των παραμέτρων που θεωρούνται τα πρώτα άμεσα αποτελέσματα στην διαδοχική σειρά των γεγονότων που συνιστούν ένα σενάριο.

Πίνακας 25 Κριτική συσχέτιση χαρακτηριστικών της προσάραξης και αποτελεσμάτων βάσει των απαντήσεων των ειδικών

	Extend of damage	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident
Stranded	X	X			
Location of first contact					

Από αυτό το ερώτημα προκύπτουν οι εξής συσχετίσεις:

- **Stranded ~ Extend of damage**
- **Stranded ~ Water intake**

Τέλος, στον παρακάτω Πίνακα φαίνεται η συσχέτιση των παραγόντων που χαρακτηρίζονται ως αποτελέσματα με τις συνέπειες του ατυχήματος, βάσει των απαντήσεων με τη μέγιστη συχνότητα:

Πίνακας 26 Κριτική συσχέτιση των αποτελεσμάτων και των συνεπειών βάσει των απαντήσεων των ειδικών στην περίπτωση της προσάραξης

	Less serious	Serious	Very Serious (Incl. Total loss)	No radiation leakage	Minor radiation Leakage	Major/significant radiation leakage
Extend of damage						X
Water intake			X			
Fire		X				
Black out		X				
Nuclear accident		X	X			X

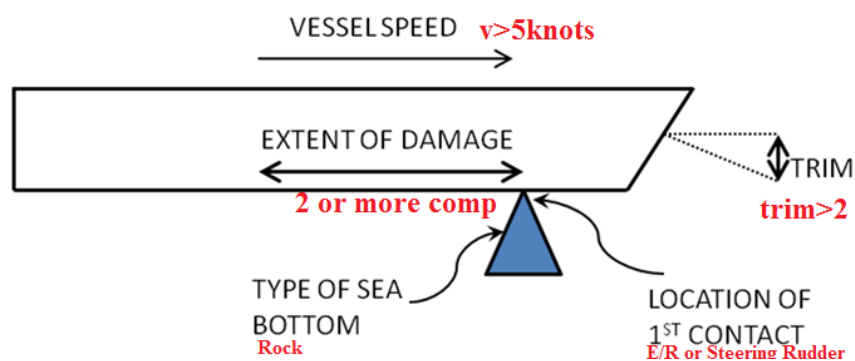
Από αυτό τον πίνακα προκύπτει πως οι παράμετροι fire, black out, nuclear accident μπορούν να προκαλέσουν serious consequences. Very serious consequences (incl. total loss) επιφέρει η εισροή υδάτων και το πυρηνικό ατύχημα. Τέλος, όπως μας επεξήγησαν οι ειδικοί, εάν το μέγεθος της καταστροφής μετά την προσάραξη είναι

μεγάλο, μπορεί να προκληθεί μεγάλη έκλυση ραδιενέργειας. Το ίδιο κρίσιμος συνδυασμός είναι και το πυρηνικό ατύχημα με την μεγάλη έκλυση ραδιενέργειας.

Στην έκτη ερώτηση έγιναν κάποιες θεωρητικές ερωτήσεις οι οποίες αφορούσαν και στοιχεία ναυτικής ασφάλειας αλλά και θέματα ραδιενέργειας και πυρηνικών ατυχημάτων. Τα αποτελέσματα της έκτης ερώτησης που είναι κοινή και για τις δύο περιπτώσεις ατυχημάτων, συμπεριλαμβάνονται στο επόμενο κεφάλαιο που παρατίθενται αναλυτικά τα συμπεράσματα από την έρευνα.

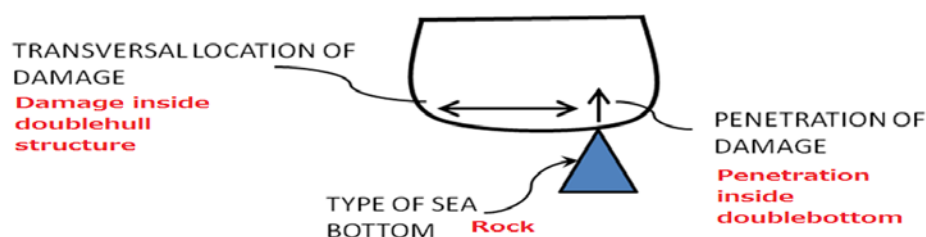
Όσον αφορά την προσάραξη, από τις ερωτήσεις προέκυψε ότι το πλέον ευαίσθητο σημείο για το ατύχημα της προσάραξης είναι η περιοχή του μηχανοστασίου, όπου το ατύχημα της προσάραξης χαρακτηρίζεται κι ως σοβαρό. Όταν το πλοίο είναι έμφορτο, κρίσιμη περιοχή θεωρείται και η περιοχή των χώρων φορτίου.

Τέλος, παρακάτω παρουσιάζονται δύο σχήματα στα οποία βαθμονομήθηκαν οι κρίσιμες παράμετροι όπως ζητήθηκε στο ερώτημα 7. Στο πρώτο Σχήμα, 69, φαίνεται πως η κρίσιμη τιμή της ταχύτητας για την αρνητική εξέλιξη του ατυχήματος της προσάραξης ως προς τις συνέπειες είναι πέντε κόμβοι και άνω. Το είδος του βυθού παραμετροποιείται ως βραχώδες για να είναι κρίσιμο μέγεθος ως προς την αρνητική εξέλιξη του ατυχήματος. Ως κρίσιμο σημείο πρώτης επαφής θεωρείται ο χώρος του μηχανοστασίου ή το πηδάλιο. Τέλος, κρίσιμη διαγωγή θεωρείται βάσει των απαντήσεων πάνω από 2 μέτρα και κρίσιμη διαμήκης καταστροφή του πλοίου για πάνω από δύο κλειστά συνεχή διαμερίσματα.



Σχήμα 69 Βαθμονόμηση κρίσιμων μεγεθών προσάραξης πλοίου κατά τους ειδικούς κατά το διάμηκες του πλοίου

Στο επόμενο Σχήμα, 70, φαίνεται εντελώς διαγραμματικά, μία μέση τομή ενός πλοίου. Κρίσιμα μεγέθη θεώρησαν οι ειδικοί την διείσδυση μέσα από τα διπύθμενα του πλοίου και την καταστροφή μέσα από τα διπλά τοιχώματα του πλοίου.



Σχήμα 70 Βαθμονόμηση των κρίσιμων μεγεθών κατά ενός ειδικούς κατά την εγκάρσια τομή του πλοίου

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# 7

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΈΒΔΟΜΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 7.1 Γενικά

Η ανάλυση των σεναρίων αλλά και η βιβλιογραφική μελέτη ενός εν λόγω εργασίας, κατέδειξε ορισμένα σημεία που πρέπει οπωσδήποτε να προσεχθούν και κατέληξε σε πολλά και χρήσιμα συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα που παρατίθενται αμέσως πιο κάτω, προκύπτουν από ενός απαντήσεις των ειδικών στα ερωτηματολόγια κι από την βιβλιογραφική μελέτη πάνω στην κατασκευή πυρηνοκίνητων πλοίων αλλά και στα πυρηνικά και ναυτικά ατυχήματα. Ενός, συμπεράσματα προκύπτουν κι από ενός απαντήσεις των ειδικών πυρηνικών επιστημόνων, οι δίνουν μία διαφορετική οπτική γωνία. Τέλος, χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν και από ενός μελέτες που παρατέθηκαν στο τέταρτο κεφάλαιο και αφορούν

### 7.2 Γενικά συμπεράσματα για την περίπτωση ενός σύγκρουσης

Η περίπτωση ενός σύγκρουσης θα πρέπει να είναι μία απευκταία κατάσταση όχι μόνο για πυρηνοκίνητα πλοία αλλά και για κάθε είδος πλοίου. Στην έρευνα αυτή δεν εξετάστηκε η περίπτωση ενός πρόληψης αναλυτικά, αλλά κάποια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και σε αυτό τον τομέα.

Βάσει των ερωτηματολογίων, όσον αφορά το **ατύχημα ενός σύγκρουσης τα συμπεράσματα είναι τα εξής:**

- **Ο ανθρώπινος παράγοντας και τα τυχόν οργανωτικά λάθη, η ταχύτητα των πλοίων όταν είναι μεγαλύτερη των πέντε κόμβων, γωνία ενός σύγκρουσης όταν βρίσκεται μεταξύ 45° και 135 ° είναι οι πλέον κρίσιμοι παράγοντες για το συγκεκριμένο ατύχημα.** Ενός, κρίσιμοι παράγοντες είναι η εισροή υδάτων στο χώρο φορτίου, στο αντλιοστάσιο στην περίπτωση των τάνκερ και η πρόκληση πυρκαγιάς κυρίως στο χώρο φορτίου.
- **Το μηχανοστάσιο αποτελεί τον πλέον κρίσιμο χώρο του πλοίου στην περίπτωση ενός σύγκρουσης.** Η πρόκληση πυρκαγιάς ή η εισροή υδάτων από το ατύχημα είναι επικίνδυνη για την περαιτέρω συνέχιση του ατυχήματος και τη συνακόλουθη εκδήλωση αρνητικών συνεπειών με την πρόκληση πυρηνικού ατυχήματος. **Ιδιαίτερα πρέπει να τονιστεί, ότι στην ballast κατάσταση ενός πλοίου είναι επικίνδυνο ένα ατύχημα σύγκρουσης στο**

**χώρο του μηχανοστασίου. Σε κατάσταση φόρτωσης επικίνδυνη περιοχή είναι η περιοχή των χώρων φορτίου.**

- Κατόπιν συζήτησης με ενός ειδικούς προέκυψε, ενός, το συμπέρασμα πως η πρόκληση πυρκαγιάς έχει χαμηλή πιθανότητα σε περίπτωση ατυχήματος σύγκρουσης.
- Εάν η πρώτη επαφή συμβεί στο χώρο του μηχανοστασίου είναι πιθανόν ένα πυρηνικό ατύχημα.

Ιδιαίτερα θα πρέπει να προσεχτεί ο ανθρώπινος παράγοντας στα ατυχήματα σύγκρουσης. Τα περισσότερα ατυχήματα, παγκόσμια, έχουν προκληθεί από ανθρώπινα λάθη ή παραλείψεις. Πέρα του σωστού σχεδιασμού, σημασία έχει βέβαια και η σωστή αντιμετώπιση του συμβάντος. Αυτό το γεγονός μαζί με το λόγω των μαζών των δύο πλοίων και ενός ενός παραμέτρους που ενδεχομένως ποικίλλουν από ατύχημα σε ατύχημα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν έχει μόνο σημασία ποιο πλοίο δέχεται τη σύγκρουση αφού οι συνέπειες μπορεί να είναι πολλαπλάσιες και για το πλοίο που την προκαλεί.

Τέλος, οι πλέον επικίνδυνοι συνδυασμοί παραμέτρων είναι οι κακές καιρικές συνθήκες σε συνδυασμό με ταχύτητα πλοίων άνω των πέντε κόμβων και οι κακές καιρικές συνθήκες με εισροή υδάτων σε οποιοδήποτε μέρος του πλοίου και ιδιαίτερα στο μηχανοστάσιο. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν και οι επί μέρους συνδυασμοί, όπου μεγάλο ρόλο έπαιζε και η γωνία σύγκρουσης.

### **7.3 Γενικά συμπεράσματα για την περίπτωση ενός προσάραξης**

Η περίπτωση ενός προσάραξης είναι λίγο διαφορετική από την περίπτωση ενός σύγκρουσης. Είναι προφανές ότι και εδώ παίζει ρόλο ο ανθρώπινος παράγοντας και τα οργανωτικά λάθη. Πλέον με ενός σύγχρονες καταγραφές του βυθού, θεωρητικά δεν δικαιολογείται ένα τέτοιου είδους ατύχημα. Είναι, ενός διαφορετικό από την φύση του καθώς με την προσάραξη προστίθενται νέες δυνάμεις στο πλοίο κι αλλάζει τελείως το κέντρο ενός ισάλου επιφάνειας LCF. Δεν έχουμε απλά μία περίπτωση καταστροφής τμήματος του πλοίου αλλά μία περίπτωση όπου το πλοίο έχει καταστραφεί και ενός φορές δεν είναι δυνατή η ανέλκυσή του από το σημείο ενός προσάραξης. Για αυτό το λόγο, ενός ειπώθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο κατά τον IMO ένα προσαραγμένο πλοίο ισοδυναμεί με ένα βυθισμένο πλοίο.

**Στην περίπτωση ενός προσάραξης:**

- **Η εισροή υδάτων σε περισσότερα από δύο διαμερίσματα, τα ανθρώπινα και τα οργανωτικά λάθη, η φωτιά στο μηχανοστάσιο και ενός χώρους φορτίου καθώς και η εισροή υδάτων στο μηχανοστάσιο και ενός χώρους φορτίου είναι οι πλέον κρίσιμοι παράγοντες για το συγκεκριμένο ατύχημα.** Σημαντικοί, ενός, παράγοντες αποτελούν τυχόν άσχημα φυσικά φαινόμενα ενός η παλίρροια καθώς και η κατάσταση φόρτωσης του πλοίου.



Από τη βιβλιογραφία, προκύπτει ότι σημαντικός παράγοντας είναι και το είδος του βυθού.

- **Τυχόν προσάραξη κάτω από ενός χώρους φορτίου είναι κρίσιμη και μάλιστα, ενός κατηγορηματικά τονίστηκε από ενός ειδικούς μπορεί να είναι και χειρότερη μία προσάραξη σε αυτή την περιοχή από μία σύγκρουση. Ο λόγος είναι ότι η προσάραξη ενδεχομένως δημιουργήσει και μετατοπίσεις στο φορτίο τέτοιες που να προκαλέσουν αλυσιδωτά άλλα αρνητικά αποτελέσματα. Σε περίπτωση φορτωμένου πλοίου εξίσου επικίνδυνη είναι και η προσάραξη στην περιοχή των χώρων φορτίου.**
- **Κρίσιμα μεγέθη για το ατύχημα ενός προσάραξης είναι η ταχύτητα άνω των πέντε κόμβων, η διαγωγή άνω των δύο μέτρων, ο βραχώδης βυθός και η διεύθυνση διαμέσου των διπύθμενων και του διπλού τοιχώματος.**
- Ενός και στην περίπτωση ενός σύγκρουσης, εάν η πρώτη επαφή συμβεί στο χώρο του μηχανοστασίου είναι πιθανόν ένα πυρηνικό ατύχημα.
- Οι πλέον κρίσιμοι συνδυασμοί για τη περαιτέρω εξέλιξη του ατυχήματος ενός προσάραξης είναι οι κακές καιρικές συνθήκες σε συνδυασμό με το πλοίο να είναι προσαραγμένο.

Να σημειωθεί ότι η εισροή υδάτων και οι κακές καιρικές συνθήκες δημιουργούν ενός φάνηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο κρίσιμους συνδυασμούς για την περαιτέρω εξέλιξη του ατυχήματος.

#### 7.4 Η γνώμη των πυρηνικών επιστημόνων

Κατόπιν εξειδικευμένης συζήτησης με ερωτήσεις με ενός ειδικούς πυρηνικούς επιστήμονες, εξήχθησαν τα ακόλουθα χρήσιμα συμπεράσματα:

- **Για ενός μικρούς αντιδραστήρες, προβλέπεται η λεγόμενη κατάσταση *scram*, στην οποία περιέρχονται μέσα σε 60 δευτερόλεπτα. Κατά αυτή την κατάσταση παράγουν το 7% ενός μέγιστης ενέργειας ενός και θα πρέπει οπωσδήποτε αυτή η ενέργεια με κάποιο τρόπο να απορροφάται. Αυτό αποτελεί κρίσιμο ερώτημα στην περίπτωση ενός πλοίου και είναι ένα σημείο ενός διερεύνηση του πώς μπορεί να απορροφηθεί αυτή η ενέργεια.**
- Κατόπιν ενός κατάστασης **ο αντιδραστήρας θέλει περίπου 2 ώρες για να αποκαταστήσει την πλήρη λειτουργία του** και να παράγει την απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται το πλοίο για ενός λειτουργικές του ανάγκες.
- **Δεν υπάρχουν ισχύουσες απαιτήσεις για τη συμπεριφορά των μικρών αντιδραστήρων κάτω από κρουστικά φορτία**, ενός είναι τα φορτία που δέχεται ένα πλοίο. Ενδεχομένως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ιαπωνικά σεισμικά πρότυπα και να υπάρξει μία συσχέτιση, σε πρώτη φάση μεταξύ των σεισμικών δονήσεων και των θαλάσσιων κρουστικών φορτίων
- **Η δομή στήριξης του αντιδραστήρα καθώς και ο κλωβός του αντιδραστήρα θα πρέπει να απορροφούν και να μην μεταβιβάζουν τα επιχειρησιακά ή τυχαία φορτία που εφαρμόζονται στη γάστρα του πλοίου.**

- **Κατόπιν ατυχήματος θα πρέπει να εξετάζεται εάν υπάρχει ρωγμή στον κλωβό του αντιδραστήρα.** Εάν υπάρχει ρωγμή και εισροή υδάτων, παρόλο που το νερό παρέχει μία ειδική προστασία, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η διάβρωση που μπορεί να υποστεί ο κλωβός. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να τονιστεί ότι λόγω ενός αλατότητας, το θαλασσινό νερό καθίσταται ιδιαίτερα ραδιενεργό.
- **Η θωράκιση ενός μικρού αντιδραστήρα είναι συνήθως εξαιρετική.**

## 7.5 Συμπεράσματα και εκτιμήσεις για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας στις θαλάσσιες μεταφορές

Η έρευνα για τα ναυτικά ατυχήματα πλοίων που χρησιμοποιούν πυρηνική πρόωση, με έμφαση στα ατυχήματα της σύγκρουσης και της προσάραξης, έφερε διαρκώς το ερώτημα κατά πόσον τελικά είναι εύκολη, δόκιμη, οικονομική και ασφαλής η κατασκευή πλοίων με πυρηνική πρόωση. Τα προτερήματα είναι πολλά, όμως και η ασφάλεια θα πρέπει να είναι υψηλή και η συντήρηση και προστασία διαρκής.

Στα θετικά, αυτού του είδους των πλοίων λογίζεται το **μικρό κόστος λειτουργίας λόγω του πυρηνικού καυσίμου**. Ο μέσος χρόνος είναι πέντε με δέκα χρόνια για κάθε περίοδο χρήσης καυσίμου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μεγάλη παραγωγή ενέργειας, που μπορεί να υπερκαλύψει τις ανάγκες ενός πλοίου, καθιστούν αυτά τα πλοία εξαιρετικά. Πέραν του οικονομικού οφέλους, η πυρηνική ενέργεια είναι ανεξάντλητη καθώς στηρίζεται στη σχάση των πυρήνων σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα των οποίων τα αποθέματα εξαντλούνται διαρκώς. Ένα ακόμη θετικό στοιχείο της χρήσης πυρηνικής ενέργειας είναι **η μη εκπομπή ρύπων** για τις οποίες τόσο ο ΙΜΟ όσο και η ΕΕ, έχει ζητήσει την σταδιακή μείωσή τους. Τέλος, αποτελεί πολύ θετικό στοιχείο η εφαρμογή της πυρηνικής πρόωσης σε εξειδικευμένες περιπτώσεις, όπως τα παγοθραυστικά πλοία, όπου οι ενεργειακές ανάγκες είναι αυξημένες.

Η πυρηνική πρόωση, όμως, είναι ασφαλής; Όπως αναλύθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο οι μικροί αντιδραστήρες των πλοίων, υστερούν σε παθητική ασφάλεια. Η παραγωγή ενέργειας εξακολουθεί ακόμη και μετά το απότομο κλείσιμο του αντιδραστήρα, σε σημείο που και μία μέρα μετά ακόμη παράγει το 0,5% της μέγιστης ενέργειάς του. Όπως, προειπώθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο, σε αντίθεση με τις εφαρμογές της στεριάς, η όποια επιδιόρθωση ή προσπάθεια εκμετάλλευσης της παραγόμενης θερμότητας είναι εξαιρετικά δύσκολη και σε πολλές περιπτώσεις μετά από ατύχημα τεχνικά αδύνατη. Η λύση, λοιπόν, είναι η εξής:

- ✓ Πρώτον, **η κατασκευή του περιβλήματος του πυρήνα** να είναι τέτοια έτσι ώστε να αποφεύγονται οι ρωγμές, από οποιαδήποτε αιτία.
- ✓ Δεύτερον, η κατασκευή να διαθέτει **μηχανισμούς απορρόφησης των κραδασμών και των δονήσεων**, διότι αυτές αποτελούν αιτία για την κακή λειτουργία του αντιδραστήρα.

- ✓ **Η επιλογή αντιδραστήρων προηγμένης τεχνολογίας** ( 4<sup>ης</sup> και τύπου 3 των μικρών και μεσαίων μεγεθών), όπου ο πυρήνας πολύ δύσκολα έρχεται σε τήξη, καθώς υπάρχουν προηγμένα συστήματα ασφάλειας.
- ✓ Επίσης, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη χρήση πυρηνικού αντιδραστήρα σε πλοία ότι οι **μηχανισμοί μείωσης ισχύος με την αύξηση της θερμοκρασίας εντός του αντιδραστήρα**, αποτελούν βασικό στοιχείο σχεδιασμού και κατασκευής των ναυτικών αντιδραστήρων.
- ✓ Στους υπάρχοντες κινητήρες, επίσης, θα πρέπει να προσεχτούν **οι σωλήνες μεταφοράς του ψυκτικού υγρού** και να υπάρξει προστασία από τη διάβρωση.
- ✓ Η μελέτη εντοπισμού των κινδύνων σε ένα υπό σχεδίαση πλοίο με χρήση της πυρηνικής ενέργειας θα πρέπει επίσης να εστιάσει στο ζήτημα της **θέσης και της στήριξης – προστασίας του πυρηνικού αντιδραστήρα**. Η επιλογή θέσης στην οποία οι ταλαντώσεις και οι δονήσεις θα είναι ελάχιστες, όπου θα υπάρχει η μέγιστη προστασία από την περίπτωση της σύγκρουσης και της προσάραξης και όπου φυσικά ο κίνδυνος πυρκαγιάς είναι μικρός.
- ✓ **Ο κίνδυνος πυρκαγιάς** φυσικά και εξετάζεται αλλά γενικά λόγω της έλλειψης των υδρογονανθράκων δεν αποτελεί βασικό κίνδυνο. Αντίθετα, η μελέτη ενός πλοίου με πυρηνική πρόωση θα πρέπει να εστιάζει ιδιαίτερα στην ευστάθεια του πλοίου μετά από βλάβη, καθώς η θέση του αντιδραστήρα δεν πρέπει να διασαλεύεται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του αφενός, αφετέρου το θαλασσινό νερό μπορεί να λειτουργήσει για λίγο ως ψυκτικό μέσον, σε περίπτωση όμως ρωγμής καθίσταται ιδιαίτερα ραδιενεργό κι επικίνδυνο.
- ✓ Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στις ζώνες κινδύνου από την **έκλυση ραδιενέργειας**. Στο πλοίο, αυτές οι ζώνες περιγράφονται στο κεφάλαιο 4, και πιο συγκεκριμένα στο υποκεφάλαιο 4.8. Στις επικίνδυνες ζώνες είναι άκρως απαραίτητο να υπάρχουν δυνατότητες διαφυγής μετά από ατύχημα με ταυτόχρονη προστασία από την έκλυση της ραδιενέργειας και σε άλλες περιοχές του πλοίου. Επίσης, από τη στιγμή που μιλάμε για την εμπορική ναυτιλία, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας ότι το προσωπικό χρειάζεται μία απαραίτητη εκπαίδευση και προετοιμασία κι επίσης, ενδεχομένως οι συμβάσεις για εργασία στο πλοίο θα πρέπει να διαρκούν ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που δημιουργεί σκεπτικισμό για τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας είναι ο **ανεφοδιασμός του πυρηνικού καυσίμου** εν πλω και η αποθήκευση των μπλοκ του χρησιμοποιημένου καυσίμου. Πρώτα από όλα, η θέση του πυρηνικού αντιδραστήρα στο πλοίο θα πρέπει να είναι τέτοια, έτσι ώστε να είναι εύκολη η διαδικασία του ανεφοδιασμού. Όμως, ο ανεφοδιασμός δημιουργεί ιδιαίτερα πολλών ειδών απόβλητα, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.4, ενώ δεν είναι μία γνωστή διαδικασία και δεν είναι διαδεδομένη σε μεγάλη κλίμακα, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν είναι έτοιμη ακόμη η εμπορική ναυτιλία για τη μαζική χρήση της πυρηνικής πρόωσης.

Τέλος, η επιλογή του χάλυβα κατασκευής του πλοίου αποτελεί μείζον ζήτημα για την κατασκευή ενός πυρηνοκίνητου σκάφους. **Εξαιτίας της ραδιενέργειας, ο χάλυβας υφίσταται αποσκλήρυνση και χάνει μεγάλο μέρος των μηχανικών ιδιοτήτων του, ενώ κινδυνεύει ευκολότερα από διάβρωση υπό μηχανική καταπόνηση.**

## 7.6 Πρόταση επιλογής προωστήριας εγκατάστασης

Μία πρόταση πρόωσης που προκύπτει από την μελέτη των πυρηνοκίνητων πλοίων είναι η **χρήση αντιδραστήρα ψύξης υγρού άλατος με δευτεροβάθμιο σύστημα αεροστρόβιλο και ηλεκτρική πρόωση με τη χρήση αζιμουθιακού συστήματος πρόωσης (pod system)**. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται οι κραδασμοί και οι δονήσεις από το κλασικό αξονικό σύστημα αφενός και αφετέρου οι ελικτικές ικανότητες ενός πλοίου είναι σαφέστατα καλύτερες σε σχέση με τα κλασικά συστήματα πρόωσης κι επομένως, είναι ευκολότερη η αποφυγή κινδύνων που μπορεί να οδηγήσουν σε σύγκρουση και προσάραξη. Αυτό συμβαίνει λόγω της γρηγορότερης απόκρισης σε σχέση με τα συμβατικά πλοία. Η γρηγορότερη απόκριση επιτυγχάνεται μέσω της γρήγορης εναλλαγής πορείας αλλά και ταχύτητας του πλοίου, λόγω της συνεχούς μεταβολής της ταχύτητας της έλικας από 0 έως 100%.

Η επιλογή αυτού του συστήματος επίσης, στο οποίο δεν υπάρχει πηδάλιο, αφού οι ελιγμοί γίνονται συνολικά από το αζιμουθιακό σύστημα που είναι εμβυτισμένο στο νερό, δημιουργεί μεγαλύτερο ωφέλιμο χώρο και αναπληρώνει κατά πολύ τον χαμένο χώρο λόγω του διαμερίσματος του πυρηνικού αντιδραστήρα. Υπάρχει κατά αυτό τον τρόπο και μεγαλύτερη ευκολία σχεδιασμού των χώρων του πλοίου από τον μελετητή/σχεδιαστή.

Τέλος, το σύστημα αυτό είναι το πλέον αξιόπιστο και ασφαλές λόγω της παράλληλης σύνδεσης πολλών συστημάτων και της δυνατότητας απομόνωσης σε περίπτωση ατυχήματος, ενώ είναι εύκολη η δυνατότητα αυτοματισμού/αυτόματου έλεγχου.

Τα αρνητικά αυτού του συστήματος πρόωσης είναι το σχετικά υψηλό κόστος και κάποια προβλήματα ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας που πρέπει να αντιμετωπίζονται με εξειδικευμένες μελέτες από την αρχική φάση του σχεδιασμού.

## 7.7 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όπως προκύπτει από την έρευνα, οι μελέτες για τα πυρηνοκίνητα πλοία βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες προτάσεις για εμβάθυνση πάνω στη χρήση πυρηνικής ενέργειας στα πλοία. Αυτές είναι οι εξής:

- Μελέτη των ναυτικών ατυχημάτων της φωτιάς και της έκρηξης για πλοία που χρησιμοποιούν πυρηνική πρόωση.

- Μελέτη της συμπεριφοράς του ναυτικού πυρηνικού αντιδραστήρα κατόπιν ατυχήματος.
- Μελέτη προστασίας του ανθρώπινου δυναμικού από την έκλυση ραδιενέργειας.
- Μελέτη των κανονισμών για τη μεταφορά των πυρηνικών αποβλήτων σε πλοία.
- Επέκταση της FSA για πυρηνοκίνητα πλοία και προσχέδια νέων κωδίκων τύπου ISM για εταιρείες που διαχειρίζονται τέτοιου είδους πλοία.
- Μελέτη συμπεριφοράς του πυρηνικού αντιδραστήρα από τους κραδασμούς, τους θορύβους και τις δονήσεις που υφίσταται λόγω της λειτουργίας στο θαλάσσιο περιβάλλον.
- Μελέτη και προτάσεις για την ασφαλή στήριξη και προστασία ενός ναυτικού πυρηνικού αντιδραστήρα.
- Εξειδικευμένες μελέτες για πλοία με αυξημένες ενεργειακές ανάγκες που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η πυρηνική πρόωση, πχ κρουαζιερόπλοια.
- Μελέτη για την προετοιμασία και την εκπαίδευση του προσωπικού σε θέματα χρήσης της πυρηνικής ενέργειας εν πλω.
- Μελέτες για την προστασία του χάλυβα και της κατασκευής από τις επιπτώσεις της ραδιενέργειας.
- Μελέτη της περίπτωσης του ατυχήματος επαφής και των παραμέτρων ασφάλειας στο πλοίο αλλά και στο σταθερό πλωτό μέσο ή τη στεριά.
- Μελέτη και εκτίμηση επιπτώσεων από πυρηνικό ατύχημα στη θάλασσα.

Οι συγκεκριμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα είναι ενδεικτικές και μαζί με τις υπάρχουσες μελέτες και την μικρή εμπειρία από τη χρήση της πυρηνικής ενέργειας κυρίως για πολεμικές εφαρμογές, θα συμβάλλουν στην ευρεία και ασφαλή χρήση της πυρηνικής ενέργειας για εμπορικές χρήσεις στη ναυτιλία σε ευρεία κλίμακα.

Τέλος, να αναφερθεί ότι η όποια μελέτη για τα πυρηνοκίνητα πλοία θα πρέπει να βρίσκεται διαρκώς υπό την κρίση όχι μόνο ναυπηγών μηχανικών, μελετητών ναυτικής ασφάλειας, μηχανολόγων μηχανικών και λοιπών επιστημόνων γύρω από τη ναυπηγική και ναυτιλιακή βιομηχανία, αλλά και ειδικών πυρηνικών επιστημόνων και πυρηνικών τεχνολόγων που θα μπορέσουν να κρίνουν τα αποτελέσματα της εκάστοτε έρευνας και να δώσουν ιδιαίτερα στοιχεία που μπορεί να βοηθήσουν την θετική εξέλιξή της.

## 7.8 Επίλογος

Όλα αυτά καθιστούν τη χρήση της πυρηνικής πρόωσης ένα θέμα υπό μελέτη, τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Θα πρέπει πέρα από τους διάφορους κατασκευαστικούς παράγοντες, να ληφθεί υπόψη η μηδενική εμπειρία του προσωπικού και η χαμηλή εξειδίκευση που υπάρχει σε θέματα πυρηνικής πρόωσης. Εάν θελήσει ο κόσμος της εμπορικής ναυτιλίας να στραφεί στην πυρηνική πρόωση,

θα πρέπει να είναι έτοιμος να διαθέσει χρόνο, χρήμα και υπομονή για την εκπαίδευση του προσωπικού πάνω σε θέματα της πυρηνικής ενέργειας.

Επίσης, είναι επιτακτικό πέρα από το προσωπικό της ναυτιλίας σε επίπεδο ναυτικών, στελεχών ναυτιλιακών εταιρειών (αρχιμηχανικών , αρχιπλοιάρχων κλπ), επιστημόνων και μηχανικών που εργάζονται στους νηογνώμονες, να υπάρξουν αξιόπιστα ναυπηγεία με ειδικές προδιαγραφές τα οποία να αναλαμβάνουν τη ναυπήγηση τέτοιων πλοίων.

Τέλος, ο IMO καθώς και οι διάφοροι νηογνώμονες πρέπει να συγκεκριμενοποιήσουν τα στάνταρ ασφαλείας των συγκεκριμένων πλοίων και **ο IMO να διευρύνει τους Provisional Rules**. Σε τέτοια δύσκολα εγχειρήματα, όπως η κατασκευή και η λειτουργία ενός πυρηνοκίνητου πλοίου, οι πιστοποιήσεις θα πρέπει να δίνονται αυστηρά και οι προδιαγραφές να είναι σε επίπεδο ALARP για την ασφάλεια μετά από ατυχήματα.

Ολοκληρώνοντας, τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής έγιναν μετά από εκτενή – ενδελεχή μελέτη των σύγχρονων τάσεων όσον αφορά τα πυρηνοκίνητα πλοία. Η ασφάλειά τους αποτελεί ένα διφορούμενο θέμα λόγω και της αρνητικής άποψης μεγάλου μέρους της κοινής γνώμης για την πυρηνική ενέργεια. Είναι, επομένως, απαραίτητο, αυτό το μεγάλο βήμα για την εμπορική ναυτιλία να συνοδευτεί και από ακριβείς μελέτες ασφαλείας με ακόμα πιο ακριβείς εφαρμογές των μελετών αυτών με ταυτόχρονη επεξήγηση στην κοινή γνώμη τι θα πει χρήση πυρηνικής ενέργειας στις θαλάσσιες μεταφορές. Εξάλλου, οι κυβερνήσεις και τα πολιτικά συμφέροντα βρίσκονται σε άμεση συσχέτιση με την άποψη της κοινής γνώμης μίας χώρας, οπότε θα πρέπει να υπάρχει μία ισορροπία των αποφάσεων που θα λαμβάνονται με το κοινό αίσθημα των πολιτών.

Η σελίδα αυτή παραμένει σκόπιμα λευκή...

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣ ΕΙΔΙΚΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΡΟΣΑΡΑΞΗΣ ΠΥΡΗΝΟΚΙΝΗΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

### QUESTIONNAIRE FOR COLLISION ACCIDENTS INVOLVING NUCLEAR POWER SHIP(S)

This questionnaire is part of a research conducted by the School of Naval Architecture and Marine Engineering of the National Technical University of Athens focusing on the safety of nuclear-powered ships. In particular, the target of this effort is to explore the correlation between marine hazards that can escalate to conventional marine accidents (i.e. collision) which in their turn may lead to (significant) problems of the onboard nuclear plant, or more generally put to all possible severe consequences. In this context, the research has selected the following parameters/barriers (i.e. hazards, events, marine accident, safeguards and consequences) for the development of employed scenarios:

- Weather conditions (good weather conditions or bad weather conditions);
- Human and organizational error (yes or no – such as crew error, misjudgement, bad maintenance etc);
- High density of maritime traffic (yes or no);
- Vessel speed (this is the relative speed of striking to stricken vessel, the threshold is set to 5 knots);
- Angle of collision (less than 60° and equal or more than 60°);
- **COLLISION;**
- Striking/stricken vessel;
- Ratio of vessel masses (more than one and less than one – more than one means that the vessel under examination is larger than the other vessel involved in the collision while less than one means that the vessel under examination is smaller than the other vessel involved in collision);
- Onboard area of collision (cargo area and E/R);
- Water intake (yes or no);
- Usage of safe rescue (yes or no);
- Fire (yes or no);
- Black out (yes or no);
- Nuclear accident (yes or no);

#### CONSEQUENCES:

(According to IMO. (2005). *Casualty-related matters – reports on marine casualties and incidents. Revised harmonized reporting procedures – reports required under SOLAS regulation 1/21 and MARPOL 73/78, articles 8 and 12, MSC-MEPC.3/Circ.1, London, UK.*)

- Less serious;
- Serious;
- Very serious (incl. total loss).

(Integrating the onboard nuclear reactor in the examined system potential complementary consequences as result of a reactor failure/rupture are given below)

- No radiation leakage;
- Minor radiation leakage;
- Significant/Major radiation leakage.

The following table shows the classification of the parameters/barriers (i.e. hazards, identity of collision, impacts and consequences).

<u>HAZARDS</u>	<u>IDENTITY OF COLLISION</u>	<u>IMPACTS</u>	<u>CONSEQUENCES</u>
Weather conditions	Angle of collision	Water intake	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Less serious</li> <li>• Serious</li> <li>• Very serious</li> </ul>
Human and organizational error	Striking/stricken vessel	Usage of safe rescue	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No radiation leakage</li> <li>• Minor radiation leakage</li> <li>• Significant/Major radiation leakage</li> </ul>
High density of maritime traffic	Ratio of vessel masses	Fire	
Vessel speed	On-board area of collision	Black out	



		Nuclear accident	
--	--	------------------	--

It is expected by the experts to complete as best as they can the next parts of this questionnaire based on their experience and knowledge. The questionnaire comprises two parts; namely the first one that addresses the judgment of the expert group in relation to various set issues (mainly from the perspective of the structure of the involved vessel(s)) and the second part which focuses on very simple demographic data.

In particular, the first (and main) part of the questionnaire can be divided in the following groups:

- A number of developed **scenarios** are provided to them in order to receive their feedback with regards to the perceived **consequences**.
- They are asked to **construct** a limited number of their own collision **scenarios given** the degree of severity for the expected **consequences**.
- They should provide a **ranking list** showing the **importance** of selected parameters of collision scenarios with regards to the **consequences** following the accident of a nuclear powered vessel.
- Through a number of tables and questions the judgment of the experts is required for the identification of **correlations** between the **parameters** on which the scenarios for collision for nuclear powered vessels were based upon.

**1. Please study the following scenarios and give according to your judgment the consequences that you expect as result for each scenario; please use only the options for consequences provided to you earlier in this questionnaire (i.e. severity of accident and/or radiation leakage)**

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → vessel speed more than 5 knots → angle of collision more than 60° → collision → stricken vessel → ratio of masses of vessels involved less than 1 → E.R → water intake → black out → nuclear accident → ..... + .....

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → vessel speed more than 5 knots → angle of collision more than 60° → collision → striking vessel → ratio of masses of vessels involved more than 1 → fire → black out → nuclear accident → ..... + .....

Human and organizational error → high density of maritime traffic → vessel speed more than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → stricken vessel → ratio of masses of vessels involved less than 1 → E.R → water intake → black out → nuclear accident → ..... + .....

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → vessel speed more than 5 knots → angle of collision more than 60° → collision → stricken vessel → ratio of masses of vessels involved less than 1 → cargo area → water intake → black out → nuclear accident → ..... + .....

Bad weather conditions → human and organizational error → high density of maritime traffic → vessel speed more than 5 knots → angle of collision more than 60° → collision → stricken vessel → ratio of masses of vessels involved less than 1 → cargo area → fire → black out → nuclear accident → ..... + .....

Human and organizational error → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → striking vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → water intake → use of safe rescue → ..... + .....

Bad weather conditions → vessel speed more than 5 knots → collision → angle of collision less than 60° → collision → ratio of vessel masses involved less than 1 → stricken vessel → water intake → use of safe rescue → ..... + .....

High density of maritime traffic → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → stricken vessel → cargo area → ratio of masses of vessels involved more than 1 → water intake → use of safe rescue → ..... + .....

High density of maritime traffic → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → stricken vessel → E.R → ratio of masses of vessels involved more than 1 → water intake → use of safe rescue → black out → ..... + .....

Bad weather conditions → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → striking vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → fire → black out → nuclear accident → ..... + .....

Bad weather conditions → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → striking vessel → ratio of vessel masses involved more than 1 → fire → black out → nuclear accident

.....+.....

Bad weather conditions → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → stricken vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → E.R → fire → black out → nuclear accident →

.....+.....

Bad weather conditions → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → stricken vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → cargo area → fire → black out → nuclear accident →

.....+.....

Bad weather conditions → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → stricken vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → cargo area → water intake → use of safe rescue →

.....+.....

Human and organizational error → vessel speed more than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → striking vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → fire → black out →

.....+.....

Human and organizational error → high density of maritime traffic → vessel speed less than 5 knots → angle of collision less than 60° → collision → stricken vessel → ratio of masses of vessels involved less than 1 → cargo area → water intake → black out → nuclear accident →

..... + .....

Human and organizational error → vessel speed more than 5 knots → angle of collision more than 60° → collision → stricken vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → cargo area → fire → black out → nuclear accident →

.....+.....

Vessel speed more than 5 knots → collision → angle of collision more than 60° → collision → stricken vessel → ratio of vessel masses involved less than 1 → cargo area → fire → black out → nuclear accident →

.....+.....

Vessel speed more than 5 knots → collision → angle of collision more than

60° → collision → striking vessel → ratio of vessel masses less than 1 → water intake →

.....+.....

High density of maritime traffic → vessel speed more than 5 knots → angle of collision more than 45° → collision → stricken vessel → cargo area → ratio of masses of vessels involved less than 1 → fire → black out → nuclear accident →

.....+.....

2. Please mark (encircle) your appropriate choices per column of the following tables to reach to the consequence given at the utmost right column (i.e. Consequences). Please note the column of Nuclear Accident covers possible problems that can lead to the failure of the onboard nuclear system. Please feel free to construct your own scenario in the last two empty tables in case that you think that there is an important scenario not covered (e.g. some parameters are missing, or different threshold values should be used).

Weather conditions	Human and organizational error	High density of maritime traffic	Vessel speed (knots)	Angle of collision	COLLISION	Striking/stricken vessel	Ratio of vessel masses	On-board area of collision	Water intake	Usage of safe rescue	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCE
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	YES	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	VERY SERIOUS
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

Weather conditions	Human and organizational error	High density of maritime traffic	Vessel speed (knots)	Angle of collision	COLLISION	Striking/stricken vessel	Ratio of vessel masses	On-board area of collision	Water intake	Usage of safe rescue	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCE
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	YES	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	VERY SERIOUS
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

Weather conditions	Human and organizational error	High density of maritime traffic	Vessel speed (knots)	Angle of collision	COLLISION	Striking/stricken vessel	Ratio of vessel masses	On-board area of collision	Water intake	Usage of safe rescue	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCE
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	YES	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	VERY SERIOUS
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>VERY SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>VERY SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>VERY SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>VERY SERIOUS</b>

Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	
------	----	----	-----	-------	--	----------	--------------	-----	----	----	----	----	----	--

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>VERY SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>VERY SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>VERY SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>

	<i>error</i>	<i>traffic</i>	<i>(knots)</i>		<b>YES</b>	<i>vessel</i>		<i>collision</i>		<i>rescue</i>					<b>SERIOUS</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°		Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SERIOUS</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>



Bad	Yes	Yes	<5	<45°	YES	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	YES	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	YES	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	YES	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE</b>
Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>High density of maritime traffic</i>	<i>Vessel speed (knots)</i>	<i>Angle of collision</i>	<b>COLLISION</b>	<i>Striking/stricken vessel</i>	<i>Ratio of vessel masses</i>	<i>On-board area of collision</i>	<i>Water intake</i>	<i>Usage of safe rescue</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
Bad	Yes	Yes	<5	<45°	<b>YES</b>	Striking	>1 (Larger)	Cargo area	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION</b>

Good	No	No	>=5	>=45°		Stricken	<1 (Smaller)	E/R	No	No	No	No	No	<b>LEAKAGE</b>
------	----	----	-----	-------	--	----------	--------------	-----	----	----	----	----	----	----------------

					<b>COLLISION</b>									<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
					<b>YES</b>									Yes	<b>VERY SERIOUS</b>
														No	

					<b>COLLISION</b>									<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCE</b>
					<b>YES</b>									Yes	<b>SIGNIFICANT/MAJOR RADIATION LEAKAGE</b>
														No	

3. Please grade from 1 to 20 the importance of the parameters/barriers presented in the following table with regards to the consequences following a collision involving a nuclear-powered ship. (1 stands for the most important, while 20 for the less important). Please feel free to complete any parameter/barrier that you think that it is important and it is omitted by this table (scenarios).

Parameters/Barriers	Grade
Weather conditions	
Human and organizational error	
High density of maritime traffic	
Vessel speed	
Angle of collision	
Striking/stricken vessel	
Ratio of vessel masses	
Onboard area of collision (cargo area)	
On-board area of collision (E/R)	
Water intake in E/R	
Water intake in cargo area	
Water intake in pump room in case of tankers	
Water intake in forecastle	
Usage of safe rescue	
Fire in E/R	
Fire in cargo area	
Fire in pump room in case of tankers	
Fire in forecastle	
Fire in accommodation	
Black out	

4. Please indicate (with an X) on the following table and from the shown parameters which of them according to your judgment present between them a critical correlation for the further development of a collision accident (involving a nuclear-powered vessel). Some options may be independent to each other.

	Weather	HOE	Traffic	Speed	Angle	Striking Stricken	Masses	Area	Water intake	Safe rescue	Fire	Black out	Nuclear accident
Weather													
HOE													
Traffic													
Speed													
Angle													
Striking/Stricken													
Masses													
Area													
Water intake													
Safe rescue													
Fire													
Black out													
Nuclear accident													

5. Please mark on the following three tables the correlation between the provided parameters; namely between hazards and issues of the identity of collision, of the identity of collision with impacts, and finally of impacts with the predetermined consequences of an accident. You can also add a parameter in case you think that something is omitted from these tables.

	Angle	Striking / Stricken	Masses	Area	
Weather					
HOE					
Traffic					
Speed					

	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident	
Angle					
Striking/stricken					
Masses					
Area					

	None serious	Serious	Total loss	No radiation leakage	Minor radiation Leakage	Major/significant radiation leakage
Water intake						
Fire						
Black out						
Nuclear accident						

--	--	--	--	--	--	--

6. Please answer if you can the following questions.

Which is the behaviour of stainless steel after a radiation leakage?

Do you know any specific safety procedures that should be applied on the onboard nuclear plant to avoid a nuclear accident?

Do you think that the area where the collision takes place plays an important role with regards to the severity of the consequences?

Which are the most critical collision angles?

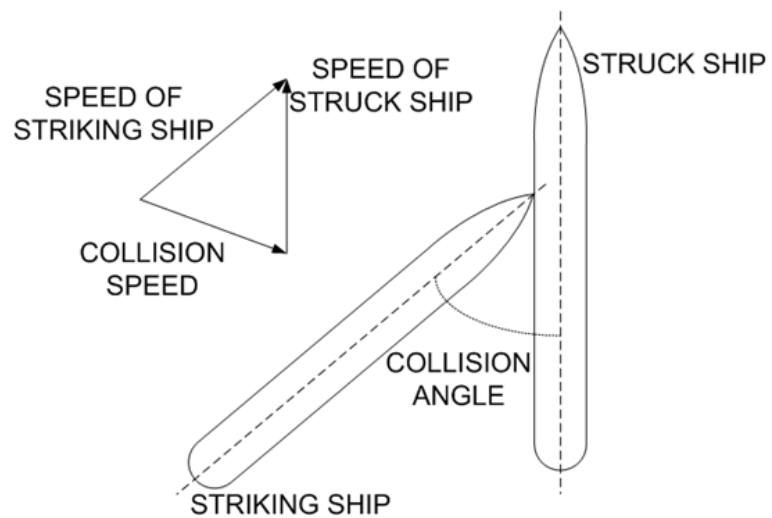
**In which collision cases it is important to take into account the speed of the struck vessel?**

**Which are the least critical locations of damage resulting from the collision in the case of nuclear powered ship?**



Is there a threshold for the speed below which the collision will not have very serious consequences?

7. Please indicate on the following sketch the values of the variables shown that you consider critical. (In the questions given above you may have already covered some of these values for the specific variables. Please write them on the sketch again.)



**QUESTIONNAIRE FOR GROUNDING ACCIDENTS INVOLVING NUCLEAR POWER SHIP(S)**

This questionnaire is part of a research conducted by the School of Naval Architecture and Marine Engineering of the National Technical University of Athens focusing on the safety of nuclear-powered ships. In particular, the target of this effort is to explore the correlation between marine hazards that can escalate to conventional marine accidents (i.e. grounding) which in their turn may lead to (significant) problems of the on-board nuclear plant, or more generally put to all possible severe consequences. In this context, the research has selected the following parameters/barriers (i.e. hazards, events, marine accident, safeguards and consequences) for the development of employed scenarios and kindly request your assistance for the determination of their like hood and dependency:

- Weather conditions (bad or good weather conditions);
- Human and organizational error (yes or no – such as crew error, misjudgement, bad maintenance *etc*);
- Engine failure(yes or no)
- Trim (forward or other)
- Tide (zero or significant)
- Vessel speed (speed in open sea, speed in restricted area, speed reduced, stop engine);
- Loading condition of vessel (laden or ballast);
- Type of sea bottom (smooth or rocky);
- **GROUNDING;**
- Stranded (yes or no);
- Location of first contact (along the length and specific compartment (e.g. E/R));
- Extend of damage;(more than 2 compartments or less than 2 compartments)
- Water intake ; (yes or no)
- Fire(yes or no);
- Black out (yes or no);
- Nuclear accident (yes or no);
- **CONSEQUENCES**

*(According to IMO. (2005). Casualty-related matters – reports on marine casualties and incidents. Revised harmonized reporting procedures – reports required under SOLAS regulation I/21 and MARPOL 73/78, articles 8 and 12, MSC-MEPC.3/Circ.1, London, UK.)*

- Less serious;
- Serious;
- Very serious (incl. total loss).

*(Integrating the on-board nuclear reactor in the examined system potential complementary consequences as result of a reactor failure/rupture are given below)*

- No radiation leakage;
- Minor radiation leakage;
- Significant/Major radiation leakage.

The following table shows the classification of the parameters/barriers (i.e. hazards, identity of grounding, impacts and consequences) :

<b>HAZARDS</b>	<b>IDENTITY OF GROUNDING</b>	<b>IMPACTS</b>	<b>CONSEQUENCES</b>
Weather conditions (bad/good)	Stranded (yes/no)	Extend of damage (more than 2	● Less serious

		compartments/less than 2 compartments)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Serious</li> <li>• Very serious</li> </ul>
Human and organizational errors (yes/no)	Location of first contact (along the length/specific compartment (e.g. E/R))	Water intake (yes/no)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No radiation leakage</li> <li>• Minor radiation leakage</li> <li>• Significant/Major radiation leakage</li> </ul>
Engine failure (yes/no)		Fire (yes/no)	
Trim (forward/other)		Black out (yes/no)	
Tide (zero/significant)		Nuclear accident (yes/no)	
Vessel speed (speed in open sea/speed in restricted area/speed reduced/stop engine)			
Loading condition of vessel (laden/ ballast)			
Type of sea bottom (smooth/rocky)			

It is expected by the experts to complete as best as they can the next parts of this questionnaire based on their experience and knowledge. The questionnaire comprises two parts; namely the first one that addresses the judgement of the expert group in relation to various set issues (mainly from the perspective of the structure of the involved vessel(s)) and the second part which focuses one very simple demographic data.

In particular, the first (and main) part of the questionnaire can be divided in the following groups:

- A number of developed **scenarios** are provided to them in order to receive their feedback with regards to the perceived **consequences**.
- They are asked to **construct** a limited number of their own grounding **scenarios given** the degree of severity for the expected **consequences**.
- They should provide a **ranking list** showing the **importance** of selected parameters of grounding scenarios with regards to the **consequences** following the accident of a nuclear powered vessel.
- Through a number of tables and questions the judgement of the experts is required for the identification of **correlations** between the **parameters** on which the scenarios for grounding for nuclear powered vessels were based upon.
  1. *Please study the following scenarios and give according to your judgment the consequences that you expect as result for each scenario; please use only the options for consequences provided to you earlier in this questionnaire (i.e. severity of accident and/or radiation leakage)*
    - Bad weather conditions →forward trim →engine failure →vessel speed in open sea →laden vessel →rocky sea bottom →grounding →stranded →first contact along the length →extend of damage in more than 2 compartments →water intake →black out →nuclear accident →  
.....+.....
    - Bad weather conditions →human and organizational error →significant tide →vessel speed in open sea →laden vessel →rocky sea bottom →grounding →first contact along the length →extend of damage in more than 2 compartments →fire →black out →nuclear accident →  
.....+.....
    - Bad weather conditions →forward trim →vessel speed in open sea →ballast vessel →rocky sea bottom →grounding →stranded →first contact in cargo room →extend of damage in less than 2 compartments →fire →black out →nuclear accident →  
.....+.....
    - Bad weather conditions →human and organizational error →shallow waters →significant tide→ vessel speed reduced →laden vessel →smooth sea bottom→ grounding →stranded →first contact in E/R →extend of damage in less than 2 compartments →water intake →nuclear accident →  
.....+.....
    - Human and organizational error →significant tide →vessel speed in restricted area →laden vessel →rocky sea bottom →grounding →stranded →first contact along the length →extend of damage in more than 2 compartments →fire →nuclear accident →  
.....+.....

- Human and organizational error →forward trim →vessel speed in open sea →ballast vessel →rocky sea bottom →grounding →stranded →first contact in E/R →extend of damage in more than 2 compartments →water intake →nuclear accident →  
.....+.....
- Bad weather conditions →significant tide →engine failure →forward trim →significant tide →vessel speed in stop engine condition →grounding → stranded →first contact in cargo area →extend of damage in more than 2 compartments →water intake →black out →  
.....+.....
- Bad weather conditions →human and organizational error →no forward trim →zero tide →vessel speed in restricted area →laden vessel →rocky sea bottom →grounding →first contact in E/R →extend of damage in less than 2 compartments →water intake →black out →nuclear accident →  
.....+.....
- Human and organizational error →forward trim →engine failure →laden vessel →smooth sea bottom →vessel speed reduced →grounding →first contact in cargo area →extend of damage in less than 2 compartments) →water intake →black out →  
.....+.....

2. Please mark (encircle) your appropriate choices per column of the following tables to reach to the consequence given at the utmost right column (i.e. Consequences). Please note the column of Nuclear Accident covers possible problems that can lead to the failure of the on-board nuclear system. Please feel free to construct your own scenario in the last two empty tables in case that you think that there is an important scenario not covered (e.g. some parameters are missing, or different threshold values should be used).

Weather conditions	Human and organizational error	Engine failure	Trim	Tide	Vessel speed	Loading position of vessel	Type of sea bottom	GROUNDING	Stranded	Location of first contact	Extend damage of	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCES
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	YES	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	VERY SERIOUS
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No	
					Reduce											
					Stop engine											

Weather conditions	Human and organizational error	Engine failure	Trim	Tide	Vessel speed	Loading position of vessel	Type of sea bottom	GROUNDING	Stranded	Location of first contact	Extend damage of	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCES
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	YES	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	VERY SERIOUS
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No	
					Reduce											
					Stop engine											

Weather conditions	Human and organizational error	Engine failure	Trim	Tide	Vessel speed	Loading position of vessel	Type of sea bottom	GROUNDING	Stranded	Location of first contact	Extend damage of	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCES
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	YES	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	VERY SERIOUS
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No	
					Reduce											
					Stop engine											

Weather conditions	Human and organizational error	Engine failure	Trim	Tide	Vessel speed	Loading position of vessel	Type of sea bottom	GROUNDING	Stranded	Location of first contact	Extend damage of	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCES
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	YES	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	VERY SERIOUS
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No	
					Reduce											
					Stop engine											

Weather conditions	Human and organizational error	Engine failure	Trim	Tide	Vessel speed	Loading position of vessel	Type of sea bottom	GROUNDING	Stranded	Location of first contact	Extend damage of	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident	CONSEQUENCES

	<i>error</i>					<i>vessel</i>	<i>bottom</i>	<b>YES</b>									<b>SERIOUS</b>
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth		Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes		
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No		
					Reduce												
					Stop engine												

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>Engine failure</i>	<i>Trim</i>	<i>Tide</i>	<i>Vessel speed</i>	<i>Loading position of vessel</i>	<i>Type of sea bottom</i>	<b>GROUNDING</b>	<i>Stranded</i>	<i>Location of first contact</i>	<i>Extend damage of</i>	<i>Water intake</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCES</b>	
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	<b>YES</b>	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SERIOUS</b>	
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No		
					Reduce												
					Stop engine												

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>Engine failure</i>	<i>Trim</i>	<i>Tide</i>	<i>Vessel speed</i>	<i>Loading position of vessel</i>	<i>Type of sea bottom</i>	<b>GROUNDING</b>	<i>Stranded</i>	<i>Location of first contact</i>	<i>Extend damage of</i>	<i>Water intake</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCES</b>	
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	<b>YES</b>	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT /MAJOR LEAKAGE</b>	
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No		
					Reduce												
					Stop engine												

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>Engine failure</i>	<i>Trim</i>	<i>Tide</i>	<i>Vessel speed</i>	<i>Loading position of vessel</i>	<i>Type of sea bottom</i>	<b>GROUNDING</b>	<i>Stranded</i>	<i>Location of first contact</i>	<i>Extend damage of</i>	<i>Water intake</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<b>CONSEQUENCES</b>	
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	<b>YES</b>	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT /MAJOR LEAKAGE</b>	
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No		
					Reduce												
					Stop engine												

<i>Weather</i>	<i>Human and</i>	<i>Engine</i>	<i>Trim</i>	<i>Tide</i>	<i>Vessel</i>	<i>Loading</i>	<i>Type of</i>	<b>GROUNDING</b>	<i>Stranded</i>	<i>Location of</i>	<i>Extend of</i>	<i>Water</i>	<i>Fire</i>	<i>Black</i>	<i>Nuclear</i>	<b>CONSEQUENCES</b>
----------------	------------------	---------------	-------------	-------------	---------------	----------------	----------------	------------------	-----------------	--------------------	------------------	--------------	-------------	--------------	----------------	---------------------

<i>conditions</i>	<i>organizational error</i>	<i>failure</i>			<i>speed</i>	<i>position of vessel</i>	<i>sea bottom</i>			<i>first contact</i>	<i>damage</i>	<i>intake</i>		<i>out</i>	<i>accident</i>	
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	<b>YES</b>	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT /MAJOR LEAKAGE</b>
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No	
					Reduce											
					Stop engine											

<i>Weather conditions</i>	<i>Human and organizational error</i>	<i>Engine failure</i>	<i>Trim</i>	<i>Tide</i>	<i>Vessel speed</i>	<i>Loading position of vessel</i>	<i>Type of sea bottom</i>	<b>GROUNDING</b>	<i>Stranded</i>	<i>Location of first contact</i>	<i>Extend of damage</i>	<i>Water intake</i>	<i>Fire</i>	<i>Black out</i>	<i>Nuclear accident</i>	<i>CONSEQUENCES</i>
Bad	Yes	Yes	Forward	Significant	Restricted area	laden	Smooth	<b>YES</b>	Yes	Along the length	More than 2 compartments	Yes	Yes	Yes	Yes	<b>SIGNIFICANT /MAJOR LEAKAGE</b>
Good	No	No	Other	Zero	Open sea	ballast	Rocky		No	Specific compartment	Less than 2 compartments	No	No	No	No	
					Reduce											
					Stop engine											

3. Please grade from 1 to 7 the importance of the parameters/barriers presented in the following table with regards to the consequences following a grounding involving a nuclear-powered ship. (1 stands for the most important, while 7 for the less important). Please feel free to complete any parameter/barrier that you think that it is important and it is omitted by this table (scenarios).

Barriers/Parameters	Grade
Weather conditions	
HOE	
Engine failure	
Trim (forward)	
Tide (low)	
Vessel speed	
Loading condition of vessel	
Type of sea bottom	
Location of first contact	
Extend of damage	
Water intake in E/R	
Water intake in cargo area	
Water intake in pump room (in case of tankers)	
Water intake in 1 compartment	
Water intake in 2 compartments	
Water intake in more than 2 compartments	
Fire in E/R	
Fire in cargo area	
Fire in pump room in case of tankers	
Fire in forecandle	
Fire in accommodation	
Black out	



4. Please indicate (with an X) on the following table and from the shown parameters which of them according to your judgment present between them a critical correlation for the further development of a grounding accident (involving a nuclear-powered vessel). Some options may be independent to each other.

	Weather	HOE	Engine Failure	Trim	Tide	Vessel speed	Loading condition	Sea bottom	Stranded	Location	Extend of damage	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident
Weather															
HOE															
Engine Failure															
Trim															
Tide															
Vessel speed															
Loading condition															
Sea bottom															
Stranded															
Location															
Extend of Damage															
Water intake															
Fire															
Black out															
Nuclear accident															

5. Please mark on the following three tables the correlation between the provided parameters; namely between hazards and issues of the identity of grounding, of the identity of grounding with impacts, and finally of impacts with the predetermined consequences of an accident. You can also add a parameter in case you think that something is omitted from these tables.

	Stranded	Location of first contact
Weather		
HOE		
Engine failure		
Trim		
Tide		
Speed		
Loading condition		
Sea bottom		

	Extend of damage	Water intake	Fire	Black out	Nuclear accident
Stranded					
Location of first contact					

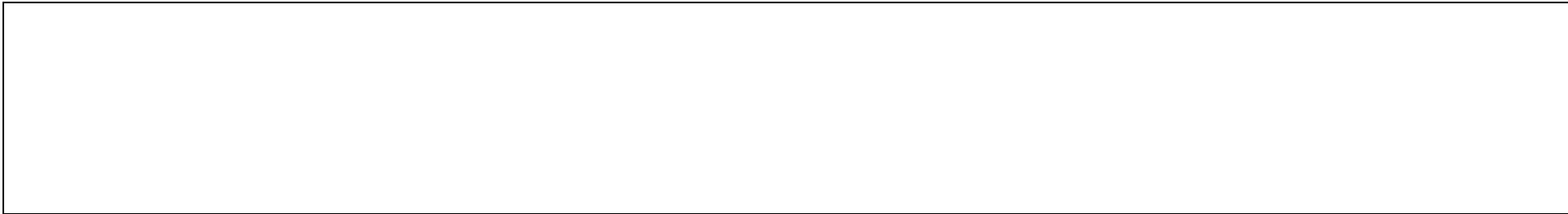
	Less serious	Serious	Very serious	No radiation leakage	Minor radiation Leakage	Major/significant radiation leakage
Extend of damage						
Water intake						
Fire						
Black out						
Nuclear accident						

6. Please answer if you can the following three questions.

Which is the behaviour of stainless steel after a radiation leakage?

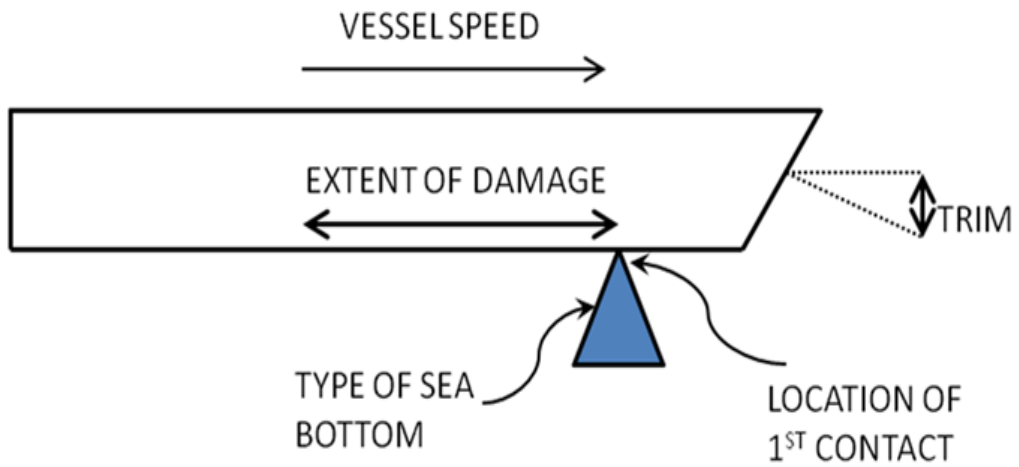
Do you know any specific safety procedures that should be applied on the onboard nuclear plant to avoid a nuclear accident?

Do you think that the area where the grounding takes place plays an important role with regards to the severity of the consequences?

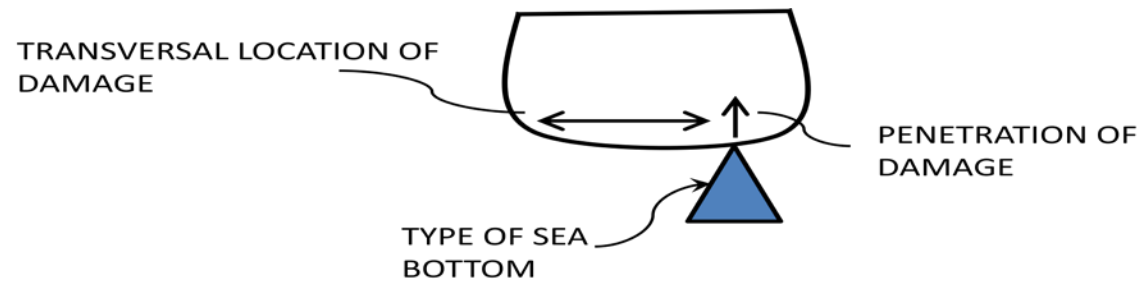


7. Please indicate on the following sketches the values of the variables shown that you consider critical. (In the questions given above you may have already covered some of these values for the specific variables. Please write them on the sketch again)

(a)



(b)



**DEMOGRAPHIC QUESTIONS**

What is your name?

What is your age?

What is your sex?

Are you seafarer?

<i>If YES please indicate your crew rank and department</i>
<i>If NO please indicate your position in the company, or other status</i>

How many years of experience at sea do you have?

How many years of experience at your field do you have?

In the last ten years on what types of ships have you worked?

Do you have any knowledge with regards to nuclear power plants?

Do you have any knowledge with regards to nuclear-powered ships?

**THANK YOU VERY MUCH FOR YOUR TIME!**