



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

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Στατιστική μελέτη και ανάλυση ατυχημάτων πλοίων τύπου Pure Car Carrier. Εφαρμογή τεχνητού νευρωνικού δικτύου σε δεδομένα ναυτικών ατυχημάτων.»

ΤΡΥΦΩΝΟΠΟΥΛΟΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ

Επιβλέπων: Δρ Νικόλαος Π. Βεντίκος, Αναπληρωτής Καθ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2018



Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

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 σε αυτή τη διπλωματική εργασία, εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή του τομέα μελέτης πλοίων και θαλασσίων μεταφορών, της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Δρ. Νικόλαο Π. Βεντίκο, για την εμπιστοσύνη που υπέδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση του συγκεκριμένου θέματος.

Όπως επίσης και τον υποψήφιο διδάκτωρ, Κωσταντίνο Λούζη, για την πολύτιμη βοήθεια και ηθική υποστήριξη καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τρυφωνόπουλος Ελευθέριος

Αθήνα, Ιούλιος 2018



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία μελετά τα ναυτικά ατυχήματα των αμιγώς οχηματαγωγών πλοίων (pure car carrier ships) κατά την χρονική περίοδο 1996-2016. Η στατιστική ανάλυση βασίζεται σε πληροφορίες ατυχημάτων, οι οποίες προέρχονται από δύο διαφορετικές πηγές, τις βάσεις δεδομένων Sea-Web και Clarksons αντίστοιχα (<https://maritime.ihs.com>, <https://www.clarksons.com>). Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι να αναλυθούν τα ατυχήματα αυτών των πλοίων ως προς συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους, να γίνει υπολογισμός των συχνοτήτων ατυχημάτων και τέλος να κατασκευαστεί ένα κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο που θα δημιουργήσει ένα μοντέλο ταξινόμησης ως προς τον τύπο του ατυχήματος.





## **ABSTRACT**

This paper studies the marine casualties of Pure Car Carrier ships (PCCs) during the period of 1996-2016. The statistical analysis based on the data maintained by two individual databases, which are the “Sea-Web” and the “Clarksons” database respectively (<https://maritime.ihs.com>, <https://www.clarksons.com>). The aim of this paper is to analyze the marine casualties of PCC ships through various significant attributes, to calculate accident rates and finally to design, train and test a suitable artificial neural network, in order to generate a classification model in terms of the casualty type attribute (target class).



## Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων .....	3
Κατάλογος Πινάκων .....	4
Κατάλογος Σχημάτων .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Αμιγώς οχηματαγωγά πλοία (Pure Car Carrier Ships, PCCs) .....	11
1.1 Ιστορική εξέλιξη των πλοίων μεταφοράς οχημάτων .....	11
1.2 Ο σύγχρονος τύπος πλοίων PCCs .....	14
1.3 Ορισμός του ναυτικού ατυχήματος .....	21
1.4 Σφοδρότητα (Severity) ναυτικών ατυχημάτων .....	22
1.5 Τύποι ναυτικών ατυχημάτων (Casualty Types) .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Στατιστική μελέτη και ανάλυση ατυχημάτων πλοίων PCCs .....	24
2.1 Εισαγωγικές έννοιες .....	24
2.2 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016) .....	26
2.3 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ηλικία .....	27
2.4 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σφοδρότητα του ατυχήματος (Severity) .....	31
2.5 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την χώρα κατασκευής (Country of Built) .....	32
2.6 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σημαία (Flag) .....	33
2.7 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την γεωγραφική ζώνη (Zone) .....	34
2.8 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο του ατυχήματος (Casualty Type) .....	37
2.9 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την χωρητικότητα οχημάτων .....	40
2.10 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το Gross Tonnage .....	42
2.11 Συνέπειες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το περιβάλλον (Pollution) .....	43
2.12 Συνέπειες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το ανθρώπινο δυναμικό (Killed, Missing) .....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs .....	48
3.1 Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs .....	48
3.2 Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων .....	53
3.3 Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ηλικία .....	60
3.4 Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο ατυχήματος .....	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Εξόρυξη Δεδομένων (Data Mining) .....	68
4.1 Εισαγωγή .....	68
4.2 Εξόρυξη δεδομένων (Data Mining) .....	69
4.3 Ταξινόμηση (Classification) .....	70
4.4 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks, ANNs).....	72
4.5 Εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων στην ναυτιλία .....	75
4.6 Νευρωνικά δίκτυα στην γλώσσα προγραμματισμού MATLAB.....	76
4.7 Επιλογή δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή του νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης των ατυχημάτων .....	81
4.7.1 Στατιστικός έλεγχος ανεξαρτησίας $\chi^2$ .....	82
4.7.2 Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου ανεξαρτησίας $\chi^2$ .....	84
4.8 Το νευρωνικό δίκτυο για Classification ατυχημάτων πλοίων PCCs .....	88
4.9 Κώδικας MATLAB νευρωνικού δικτύου και αποτελέσματα .....	99
4.9.1 Αποτελέσματα 1 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων $(X_i, T_i)$ .....	102
4.9.2 Αποτελέσματα 2 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων $(X_i, T_i)$ .....	104
4.9.3 Αποτελέσματα 3 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων $(X_i, T_i)$ .....	107
4.10 Εφαρμογή σε εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο .....	109
4.11 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του νευρωνικού δικτύου στα ατυχήματα των πλοίων PCCs .....	112
Βιβλιογραφία .....	115

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Σύστημα Lift-On/Lift-Off (Πηγή: <a href="http://www.mol.co.jp/ishin/en/carcarrier/past">http://www.mol.co.jp/ishin/en/carcarrier/past</a> ) .....	11
Εικόνα 2: USNS “Comet” (Πηγή: US Department of Transportation, <a href="https://www.marad.dot.gov/sh/ShipHistory/Detail/1077/">https://www.marad.dot.gov/sh/ShipHistory/Detail/1077/</a> ) .....	13
Εικόνα 3: PCC Ship “Adriatic Highway” (Πηγή: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=ggUqjE-1pDc">https://www.youtube.com/watch?v=ggUqjE-1pDc</a> ) .....	15
Εικόνα 4: PCC Ship “Adriatic Highway” (Πηγή: <a href="https://www.marinetraffic.com">https://www.marinetraffic.com</a> ) .....	15
Εικόνα 5: Τυπικό κατάστρωμα οχημάτων πλοίου PCC (Πηγή: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=zAQ-DpOxUw8">https://www.youtube.com/watch?v=zAQ-DpOxUw8</a> ) .....	17
Εικόνα 6: Ασφάλιση οχήματος βαρέος τύπου με ιμάντες (Πηγή: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=V3mY30VavX0">https://www.youtube.com/watch?v=V3mY30VavX0</a> ) .....	19
Εικόνα 7: Πυραμιδικός νευρώνας εγκεφάλου (Πηγή: [10] Figure 1.2).....	73
Εικόνα 8: Εφαρμογή νευρωνικού δικτύου στην MATLAB για Classification ατυχημάτων πλοίων PCCs (Πηγή: MATLAB 2017a) .....	89
Εικόνα 9: Παράδειγμα γραφήματος ROC νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης σε δύο κλάσεις (Πηγή: [19]).....	96
Εικόνα 10: Παράδειγμα Confusion Matrix νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης σε δύο κλάσεις, “1” και “2” (Πηγή: [19]) .....	97
Εικόνα 11: Παράδειγμα γραφήματος Network Performance νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης (Πηγή: [19]) .....	98

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Αριθμός ατυχημάτων πλοίων PCCs κατά έτος (1996-2016) .....	48
Πίνακας 2: Στόλος πλοίων PCCs 1996-2016 (Sea-Web/Clarksons) .....	50
Πίνακας 3: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων 1996-2016 (Sea-Web) .....	53
Πίνακας 4: Στατιστικά στόλου πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας (Sea-Web, 1996-2016).....	54
Πίνακας 5: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων 1996-2016 (Clarksons) .....	55
Πίνακας 6: Στατιστικά στόλου πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας (Clarksons, 1996-2016).....	56
Πίνακας 7: Ατυχήματα πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων 1996-2016 ..	57
Πίνακας 8: Στόλος πλοίων PCCs ανά πενταετία και ανά ομάδα ηλικίας (1996-2016) .....	62
Πίνακας 9: Ατυχήματα πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας ανά πενταετία (1996-2016).....	63
Πίνακας 10: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016) .....	64
Πίνακας 11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου $\chi^2$ .....	88
Πίνακας 12: Τεταγμένες των διανυσμάτων Z, C, και F.....	91
Πίνακας 13: Σύγκριση εξόδου νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης $Y_i$ και διανύσματος target class $T_i$ .....	95
Πίνακας 14: Αποτελέσματα ταξινόμησης εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου .....	111

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατανομή έτους κατασκευής πλοίων PCCs που πήραν μέρος σε ατύχημα την περίοδο 1996-2016 .....	24
Σχήμα 2: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016) .....	26
Σχήμα 3: Ετήσια διασπορά ηλικίας ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016) .....	27
Σχήμα 4: Μέσος όρος ηλικίας πλοίων ατυχημάτων και πλοίων στόλου PCCs (1996-2016) ..	28
Σχήμα 5: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας (1996-2016).....	29
Σχήμα 6: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας (1996-2016).....	30
Σχήμα 7: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας ως προς την σφοδρότητα του ατυχήματος (1996-2016) .....	30
Σχήμα 8: Συγκεντρωτική κατανομή σφοδρότητας ατυχημάτων πλοίων PCCs .....	31
Σχήμα 9: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων PCC ως προς “Severity” .....	31
Σχήμα 10: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την χώρα κατασκευής .....	32
Σχήμα 11: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σημαία .....	33
Σχήμα 12: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την γεωγραφική ζώνη .....	35
Σχήμα 13: Γεωγραφική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σφοδρότητα του ατυχήματος.....	36
Σχήμα 14: Γεωγραφική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο του ατυχήματος .....	37
Σχήμα 15: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο του ατυχήματος (1996-2016).....	38
Σχήμα 16: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016) .....	38
Σχήμα 17: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs με κριτήριο την σφοδρότητα του ατυχήματος (1996-2016).....	39
Σχήμα 18: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs με κριτήριο την συνέπεια Total Loss (1996-2016) .....	40
Σχήμα 19: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς της κατηγορίες χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016 .....	41
Σχήμα 20: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016 .....	41
Σχήμα 21: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το GT (1996-2016) .....	42
Σχήμα 22: Κατανομή τύπου ατυχήματος πλοίων PCCs ανά κατηγορία GT (1996-2016) .....	42
Σχήμα 23: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ρύπανση του περιβάλλοντος (1996- .....	43
Σχήμα 24: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs με πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον (1996-2016) .....	44
Σχήμα 25: Συγκεντρωτική κατανομή τύπου ατυχήματος πλοίων PCCs ως προς την περιβαλλοντική ρύπανση (1996-2016) .....	44
Σχήμα 26: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs με πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον (1996-2016) .....	45
Σχήμα 27: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον αριθμό των νεκρών και αγνοούμενων (1996-2016).....	46
Σχήμα 28: Κατανομή νεκρών και αγνοουμένων από ατυχήματα πλοίων PCCs (1996-2016) .	47
Σχήμα 29: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016).....	49

Σχήμα 30: Στόλος πλοίων PCCs 1996-2016 (Sea-Web/Clarksons) .....	51
Σχήμα 31: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs, 1996-2016 (Sea-Web/Clarksons) .....	52
Σχήμα 32: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Sea-Web).....	54
Σχήμα 33: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Clarksons).....	56
Σχήμα 34: Αναλογία ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς της κατηγορίες χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016 .....	58
Σχήμα 35: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016 .....	58
Σχήμα 36: Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Sea-Web).....	59
Σχήμα 37: Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Clarksons).....	59
Σχήμα 38: Κατανομή του στόλου των πλοίων PCCs ως προς την ηλικία (1996-2016) .....	60
Σχήμα 39: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ηλικία (1996-2016) .....	60
Σχήμα 40: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs κατά ομάδες ηλικίας .....	61
Σχήμα 41: Στόλος πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016) .....	63
Σχήμα 42: Ατυχήματα πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016).....	64
Σχήμα 43: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016) .....	65
Σχήμα 44: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά πενταετία (1996-2016) .....	66
Σχήμα 45: Συχνότητες τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά πενταετία (1996-2016) .....	67
Σχήμα 46: Μη γραμμικό μοντέλο νευρώνα τεχνητού νευρωνικού δικτύου (Πηγή: [10] Figure 1.5).....	74
Σχήμα 47: Απλός νευρώνας νευρωνικού δικτύου της MATLAB .....	77
Σχήμα 48: Νευρωνικό δίκτυο της MATLAB με ένα επίπεδο νευρώνων (One layer neural network) .....	79
Σχήμα 49: Νευρωνικό δίκτυο της MATLAB με 3 επίπεδα νευρώνων (3-layer feedforward neural network) .....	80
Σχήμα 50: Κατανομή ατυχημάτων ως προς τις ομάδες ηλικίας των πλοίων (Ships' Age) και τον τύπο του ατυχήματος (Casualty Type) .....	85
Σχήμα 51: Κατανομή ατυχημάτων ως προς το GT (Gross Tonnage) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type) .....	85
Σχήμα 52: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την χωρητικότητα οχημάτων (Vehicles) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type) .....	86
Σχήμα 53: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την γεωγραφική ζώνη ατυχήματος (Zone) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type) .....	86
Σχήμα 54: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την χώρα κατασκευής (Country of Built) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type).....	87
Σχήμα 55: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την σημαία του πλοίου (Flag) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type).....	87
Σχήμα 56: Γράφημα ROC 1 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων.....	102
Σχήμα 57: Γράφημα Confusion Matrix 1 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων .....	103
Σχήμα 58: Γράφημα Network Performance 1 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων.....	104
Σχήμα 59: Γράφημα ROC 2 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων .....	105
Σχήμα 60: Γράφημα Confusion Matrix 2 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων .....	106
Σχήμα 61: Γράφημα Network Performance 2 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων.....	106
Σχήμα 62: Γράφημα ROC 3 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων .....	107
Σχήμα 63: Γράφημα Confusion Matrix 3 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων .....	108



Σχήμα 64: Γράφημα Network Performance 3 <sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων.....	109
Σχήμα 65: Γράφημα ROC εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου .....	110
Σχήμα 66: Γράφημα Confusion Matrix εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου .....	110
Σχήμα 67: Γράφημα Network Performance 3 <sup>ης</sup> ομάδας διανυσμάτων .....	111



## Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την στατιστική μελέτη και ανάλυση ατυχημάτων του παγκόσμιου στόλου των αμιγώς οχηματαγωγών πλοίων (Pure Car Carriers, PCCs), τα οποία έλαβαν χώρα την χρονική περίοδο από το έτος 1996 μέχρι και το έτος 2016.

Η μελέτη περιορίζεται στα στατιστικά στοιχεία που προέρχονται από δύο γνωστές βάσεις δεδομένων, οι οποίες είναι η Sea-Web και η Clarksons αντίστοιχα, χωρίς να γίνεται διερεύνηση των αιτιών που οδήγησαν στα ατυχήματα αυτά. Η μόνη αναφορά στις αιτίες των ατυχημάτων γίνεται για την διάκριση και την ταξινόμησή τους για τον σκοπό της στατιστικής ανάλυσης.

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφονται τα πλοία PCCs. Παρουσιάζεται η ιστορική τους διαδρομή, η σύγχρονη μορφή τους, καθώς και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους γνωρίσματα, κατασκευαστικά και λειτουργικά, τα οποία αναδεικνύουν την ιδιαιτερότητα των πλοίων αυτών σε σχέση με τα υπόλοιπα εμπορικά πλοία. Επίσης, παρουσιάζονται οι ορισμοί των ναυτικών ατυχημάτων.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται, μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων και σχημάτων, τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των ατυχημάτων των πλοίων PCCs ως προς σημαντικά χαρακτηριστικά τους, όπως είναι για παράδειγμα η ηλικία του πλοίου, η γεωγραφική ζώνη ατυχήματος, ο τύπος ατυχήματος, κλπ.

Στο Κεφάλαιο 3 υπολογίζονται οι συχνότητες των ατυχημάτων ανά ημερολογιακό έτος, ηλικιακή ομάδα, κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων και τύπο ατυχήματος. Επίσης, γίνεται σύγκριση των δύο βάσεων δεδομένων ως προς τον εξαγόμενο στόλο των πλοίων PCCs, που αντιστοιχεί στην χρονική περίοδο της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ταξινόμησης, το οποίο αποτελεί μια σύγχρονη τεχνική Data Mining. Το νευρωνικό δίκτυο υλοποιείται ψηφικά μέσω κώδικα στο λογισμικό MATLAB (έκδοση 2017a). Το νευρωνικό δίκτυο δημιουργεί ένα μοντέλο ταξινόμησης ως προς τον τύπο του ατυχήματος των πλοίων PCCs, χρησιμοποιώντας για τον σκοπό αυτό ορισμένα χαρακτηριστικά των ατυχημάτων, από το σύνολο εκείνων που χρησιμοποιήθηκαν στην στατιστική ανάλυση.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Αμιγώς οχηματαγωγά πλοία (Pure Car Carrier Ships, PCCs)

## 1.1 Ιστορική εξέλιξη των πλοίων μεταφοράς οχημάτων

Τα πλοία μεταφοράς οχημάτων, μέχρι να αποκτήσουν την σημερινή τους μορφή, ξεκίνησαν να εξελίσσονται περίπου από την δεκαετία του 1950. Από τότε και μέχρι τις αρχές του 1970 πραγματοποιούνται δοκιμές μεταφοράς οχημάτων με διάφορους τύπους πλοίων. Οι δοκιμές αυτές δεν ήταν πάντα διαδοχικές, αλλά πολλές από αυτές γίνονταν την ίδια χρονική περίοδο. Κάποιες κρίθηκαν ακατάλληλες ή ασύμφωτες και εγκαταλήφθηκαν, ενώ κάποιες άλλες βελτιώθηκαν και εξελίχθηκαν, μέχρι τελικά τα πλοία μεταφοράς οχημάτων να πάρουν την σημερινή τους μορφή. Στόχος όλων των μεταβολών ήταν πάντοτε η ταχύτατη και ασφαλή μεταφορά των οχημάτων, η γρήγορη φορτο-εκφόρτωση, η μεγάλη χωρητικότητα του πλοίου και φυσικά η κερδοφορία από την χρήση του. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά των σημαντικότερων σταδίων της εξέλιξης των πλοίων μεταφοράς οχημάτων από τα πρώτα χρόνια, μέχρι την σύγχρονη εποχή.

Την δεκαετία του 1950 αναπτύσσεται η βιομηχανία επιβατικών αυτοκινήτων κυρίως στην Ευρώπη, Ιαπωνία και Αμερική. Οι εμπορικές συναλλαγές με το νέο προϊόν ξεπερνούν τα όρια των εγχώριων αγορών, οπότε και εμφανίζεται η ζήτηση για μεταφορά μέσω της θάλασσας. Η μεταφορά των αυτοκινήτων παραγματοποιείται με πλοία γενικού φορτίου (General Cargo Ships), στα οποία τα αυτοκίνητα στοιβάζονταν μαζί και με άλλα εμπορεύματα, χωρίς να λαμβάνονται ιδιαίτερες προφυλάξεις. Αποτέλεσμα ήταν να συμβαίνουν συχνά ζημιές στα αυτοκίνητα λόγω των συγκρούσεων μεταξύ τους ή με άλλα φορτία του πλοίου κατά την διάρκεια του ταξιδιού.



Εικόνα 1: Σύστημα Lift-On/Lift-Off  
(Πηγή: <http://www.mol.co.jp/ishin/en/carcarrier/past>)

Η φορτο-εκφόρτωση των αυτοκινήτων στα πλοία αυτά γινόταν με ένα σύστημα που λεγόταν Lift-On/Lift-Off (LO-LO), Εικόνα 1, και αποτελείτο από δύο μέρη: τον γερανό του πλοίου και μια πλατφόρμα κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να μπορεί να παραλαμβάνει τα αυτοκίνητα. Η πλατφόρμα αυτή προσδενόταν στον γερανό του πλοίου με την βοήθεια συρματοσχοίνου. Το σύστημα μπορούσε να μεταφέρει ένα αυτοκίνητο κάθε φορά. Αυτός ο τρόπος φορτο-εκφόρτωσης ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρος και ποσοτικά δεν ξεπερνούσε τα δεκαπέντε αυτοκίνητα την ώρα.

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1950, λόγω της αύξησης του εμπορίου επιβατικών αυτοκινήτων μεταξύ Ευρώπης και Ηνωμένων Πολιτειών, κάνουν την εμφάνισή τους πλοία με την ονομασία Car-Bulkers. Τα πλοία αυτά ήταν τα γνωστά πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην (Bulk Carrier Ships), στα οποία, μέσα στον χώρο του φορτίου, είχαν τοποθετηθεί καταστρώματα για την μεταφορά των αυτοκινήτων.

Αυτά τα καταστρώματα δεν ήταν μόνιμα τοποθετημένα, αλλά είχαν την δυνατότητα να αναδιπλώνονται με ευκολία. Έτσι, τα πλοία Car-Bulkers σε ένα ταξίδι μπορούσαν να μεταφέρουν αυτοκίνητα, ενώ σε κάποιο άλλο ταξίδι, μετά από την αναδίπλωση των καταστρωμάτων, μπορούσαν να μεταφέρουν και πάλι φορτίο χύδην. Όμως, αυτή η εφαρμογή ήταν ασύμφορη εξαιτίας της μικρής μεταφορικής ικανότητας (η αναλογία ήταν 1 αυτοκίνητο ανά 13 DWT, ενώ στα σύγχρονα PCCs η αναλογία αυτή είναι μικρότερη από 1 αυτοκίνητο ανά 3 DWT), του πρόσθετου βάρους των καταστρωμάτων, της χρονοβόρας φορτο-εκφόρτωσης και του αυξημένου κινδύνου πρόκλησης ζημιών κατά την διάρκεια του ταξιδιού [1]. Η φορτο-εκφόρτωση των αυτοκινήτων και στα πλοία Car-Bulkers γινόταν με το σύστημα LO-LO.

Την δεκαετία του 1960, καθώς η ζήτηση μεταφοράς αυτοκινήτων έχει πλέον εδραιωθεί στις θαλάσσιες μεταφορές, γίνεται πλέον επιτακτική η ανάγκη ναυπήγησης ενός νέου τύπου πλοίου, που θα προορίζεται αποκλειστικά για την μεταφορά των αυτοκινήτων. Μάλιστα, έχει προηγηθεί η κατασκευή του πλοίου USNS "COMET" στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, το 1957, από το ναυπηγείο Sun Shipbuilding and Drydock, καθώς και η εμπειρία των οχηματαγωγών πολεμικών πλοίων του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου Πολέμου.

Το πλοίο "COMET", Εικόνα 2, θεωρείται ότι είναι το πρώτο πλοίο τύπου RO-RO και ο προπάππος των σύγχρονων πλοίων PCCs. Ήταν εξοπλισμένο με μία πρυμναία ράμπα φορτο-εκφόρτωσης καθώς και εσωτερικές, οι οποίες επέτρεπαν την εύκολη κίνηση των οχημάτων από το λιμάνι προς τα καταστρώματα του χώρου φορτίου. Τον χώρο του φορτίου συνέθεταν δύο συνεχή κατά μήκος καταστρώματα εξοπλισμένα με σύστημα πρόσδεσης των οχημάτων και επίσης διέθεται ένα σύστημα εξαερισμού για την απομάκρυνση των καυσαερίων που δημιουργούνταν από την λειτουργία των οχημάτων κατά την φορτο-εκφόρτωση. Με αυτή την δομή του πλοίου επιταγύθηκε ραγδαία ο χρόνος της φορτο-εκφόρτωσης και μειώθηκε αισθητά ο χρόνος παραμονής στο λιμάνι.

Έτσι, στις αρχές του 1970, κάνουν την πρώτη τους εμφάνιση πλοία με εντελώς διαφορετική σχεδίαση και νέα εσωτερική διάταξη, σε σύγκριση με τα μέχρι τότε υπόλοιπα εμπορικά πλοία. Τα πλοία αυτά ήταν τα πρώτα αμιγώς οχηματαγωγά πλοία (Pure Car Carriers, PCCs), που αρχικά προορίζονταν να μεταφέρουν αποκλειστικά και μόνο επιβατικά αυτοκίνητα, αλλά αργότερα, βέβαια, ο ρόλος τους επεκτάθηκε στην μεταφορά παντός είδους οχημάτων. Τα PCCs είναι πλοία τύπου RO-RO (Roll-On/Roll-Off) και δεν διαθέτουν γεραμούς. Ο τύπος RO-RO δεν είναι κάποια συγκεκριμένη κατασκευή που εκτελεί την φορτο-εκφόρτωση, αλλά

περιγράφει συνολικά την υποδομή που διαθέτουν τα πλοία PCCs, η οποία εξυπηρετεί την θαλάσσια μεταφορά οχημάτων.



Εικόνα 2: USNS "Comet"

(Πηγή: US Department of Transportation, <https://www.marad.dot.gov/sh/ShipHistory/Detail/1077/>)

Τα πλοία PCCs διαθέτουν πρόσβαση για την είσοδο-έξοδο των οχημάτων, που βρίσκεται συνήθως στην περιοχή της πρύμνης. Η πρύμνη του πλοίου είναι εξοπλισμένη με μια ράμπα που γεφυρώνει το πλοίο με την προβλήτα του λιμανιού. Ο χώρος του φορτίου αποτελείται από αλλεπάλληλα καταστρώματα μεταφοράς οχημάτων, τα οποία ξεκινούν από το εσωτερικό της γάστρας του πλοίου και συνεχίζουν και εκτός αυτής ως υπερκατασκευές. Τα καταστρώματα εξυπηρετούνται από εσωτερικούς διαδρόμους και ράμπες, μέσω των οποίων τα οχήματα μπορούν με ευκολία να κινούνται κατά μήκος, αλλά και από το ένα κατάστρωμα στο άλλο.

Την δεκαετία του 1980, κάνει την είσοδό του ένας νέος τύπος πλοίου που ονομάζεται *rig car and truck carrier* (PCTC). Τα πλοία PCTCs προορίζονται για την μεταφορά, εκτός από επιβατικά αυτοκίνητα, και μεγάλων και βαρέων οχημάτων, όπως φορτηγά, λεωφορεία, γεωργικά μηχανήματα, ακόμα και ογκώδη μηχανήματα εργοταξίων. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 και μετά, τα περισσότερα πλοία που κατασκευάστηκαν ήταν τύπου PCTC λόγω της αύξησης της ζήτησης μεταφοράς τέτοιων φορτίων. Σήμερα, σχεδόν όλα τα πλοία μεταφοράς οχημάτων είναι τύπου PCTC.

Το κύριο χαρακτηριστικό των πλοίων PCTCs είναι ότι τα καταστρώματα οχημάτων έχουν ενισχυθεί για την παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων και επίσης διαθέτουν ορισμένο αριθμό καταστρωμάτων με δυνατότητα κατακόρυφης μετακίνησης, ώστε να γίνεται δυνατή η φόρτωση οχημάτων που έχουν ύψος μεγαλύτερο από αυτό ενός συνηθισμένου επιβατικού οχήματος. Το φορτίο των πλοίων PCTCs είναι ένας συνδυασμός μικρών και μεγάλων-βαρέων οχημάτων μετά από κατάλληλη διάταξη των καταστρωμάτων.

Με την είσοδο στον 21<sup>ο</sup> αιώνα ο σχεδιασμός των νέων πλοίων PCCs στοχεύει κυρίως στην μεγιστοποίηση της χωρητικότητάς τους σε οχήματα και στην μείωση των λειτουργικών τους εξόδων. Έχουν ήδη κατασκευαστεί πολλά πλοία PCCs χωρητικότητας άνω των 8000 οχημάτων, όπως είναι για παράδειγμα το πλοίο “MORNING LADY” (2010, Hyundai Heavy Industries) και το πλοίο “HOEGH TARGET” (2015, Xiamen Shipbuilding Industries). Για την μείωση των λειτουργικών εξόδων των PCCs γίνονται βελτιστοποιήσεις σε πολλά τμήματα του πλοίου, τόσο δομικά, όσο και μηχανολογικά. Αναφέρονται για παράδειγμα η βελτίωση της γάστρας ως προς την αντίσταση τριβής, της μηχανολογικής εγκατάστασης ως προς την κατανάλωση καυσίμου, της έλικας και της περιοχής της πρύμνης του πλοίου, η οποία επιπλέον εμφανίζει και έντονα προβλήματα κραδασμών λόγω της συγκέντρωσης βάρους από το σύστημα πρόωσης και την πρυμναία ράμπα φορτο-εκφόρτωσης. Επίσης, γίνονται δοκιμές για ηλεκτρική πρόωση των πλοίων αυτών κατά την διάρκεια που κινούνται στην περιοχή των λιμανιών. Τέλος, εξαιτίας της μεγάλης επιφάνειας των εξάλων, τα πλοία PCCs κατά την πλεύση τους αναπτύσσουν σημαντική αντίσταση λόγω του αέρα, η οποία αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου, αλλά και δυσχεραίνει τον χειρισμό τους. Δοκιμές με πιο αεροδυναμικές μορφές της περιοχής των εξάλων δείχνουν σημαντική μείωση στην αντίσταση του αέρα και κατά επέκταση στις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 10% περίπου [2].

## 1.2 Ο σύγχρονος τύπος πλοίων PCCs

Τα σύγχρονα πλοία PCCs έχουν πλέον εξελιχθεί σε πλοία ικανά για μεταφορά τροχοφόρων αυτοκινούμενων οχημάτων παντός τύπου και μεγέθους, από μικρά επιβατικά μέχρι μεγάλα και ογκώδη SUV, από λεωφορεία και φορτηγά μέχρι γεωργικά μηχανήματα, εκσκαφείς εργοταξίων και ορυχείων, αλλά και τροχοφόρων φορείων που μπορούν να παραλάβουν containers, βαγόνια τρένων, μικρά σκάφη αναψυχής και οποιοδήποτε άλλο ογκώδες όχημα και μηχανήμα υπό μορφή συσκευασίας. Η ονομασία των πλοίων αυτών είναι pure car and truck carriers (PCTCs). Τα τελευταία χρόνια ναυπηγούνται και πλοία με την ονομασία large car and truck carriers (LCTCs) με χωρητικότητες που ξεπερνούν κατά πολύ τα 6000 οχήματα. Επίσης, εξακολουθούν να κατασκευάζονται και πλοία αμιγώς για μεταφορά επιβατικών αυτοκινήτων (PCCs).

Αυτές οι τρεις παραλλαγές πλοίων μεταφοράς οχημάτων, που αναφέρθηκαν, αποτελούν μία ενιαία κατηγορία εμπορικών πλοίων και δεν γίνεται διάκριση μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα αποτελούν υποκατηγορία των πλοίων τύπου RO-RO. Όταν μάλιστα γίνεται γενική αναφορά σε αυτά, αναφέρονται απλά ως PCCs. Το κύριο σημείο διαφοράς μεταξύ ενός PCC και ενός PCTC ή LCTC, εντοπίζεται στην ενίσχυση των καταστρωμάτων και των ραμπών, ώστε να δύναται να εξυπηρετούν βαρύτερο φορτίο. Έτσι, επισημαίνεται ότι και στην παρούσα διπλωματική εργασία τα πλοία αυτά θεωρούνται ότι είναι μία κατηγορία και χρησιμοποιείται η γενική ονομασία PCC Ships.

Τα PCCs είναι πλοία RO-RO κλειστού τύπου και εξωτερικά διακρίνονται αμέσως από το ογκώδες της κατασκευής τους και το σχεδόν τετραγωνικό σχήμα της κάθετης επιφάνειας των εξάλων τους. Η γέφυρα (Navigation Bridge) βρίσκεται στην περιοχή της πλώρης, στο ανώτερο κατάστρωμα. Οι χώροι ενδιαίτησης του πληρώματος βρίσκονται και αυτοί στην περιοχή της πλώρης, στο ανώτερο κατάστρωμα, συνήθως πρύμνηθεν της γέφυρας και εκτείνονται και στα



αμέσως χαμηλότερα καταστρώματα. Το ανώτερο κατάστρωμα του πλοίου είναι ελεύθερο γερανών φορτο-εκφόρτωσης και σε αυτό βρίσκονται κυρίως τα βοηθητικά μηχανήματα του συστήματος εξαερισμού του χώρου φορτίου, το σύστημα χειρισμού της πρυμναίας ράμπας και οι σωστικές λέμβοι.

Στην Εικόνα 3 φαίνεται το πλοίο PCC “Adriatic Highway”, κατασκευής 2008, αγκυροβολημένο στο λιμάνι της Hiroshima σε αναμονή για φόρτωση επιβατικών αυτοκινήτων, ενώ στην Εικόνα 4 είναι το ίδιο πλοίο κατά την πλεύση του.



Εικόνα 3: PCC Ship “Adriatic Highway”  
(Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=qgUqiE-1pDc>)



© Rolf Bridde  
MarineTraffic.com

Εικόνα 4: PCC Ship “Adriatic Highway”  
(Πηγή: <https://www.marinetraffic.com>)

Η ταχύτητα υπηρεσίας των PCCs διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου, αλλά γενικά είναι υψηλή σε σχέση με άλλου τύπου εμπορικά πλοία και κυμαίνεται μεταξύ 13 και 24 κόμβους. Τα περισσότερα διαθέτουν βολβοειδή πλώρη, που συνεισφέρει στην μείωση της αντίστασης κυματισμού, έχουν σχετικά μεγάλη ακτίνα δράσης και είναι εξοπλισμένα με πρωραίες και πρυμναίες έλικες ελιγμών (Thrusters) για την αύξηση της ελκτικής τους ικανότητας στα λιμάνια. Γενικά, τα πλοία PCCs έχουν μικρό βύθισμα που δεν ξεπερνά τα 12 μέτρα, το οποίο μεταξύ άλλων συνεισφέρει αρνητικά στην ευστάθεια.

Η μηχανολογική εγκατάσταση (Engine Room) βρίσκεται στο πρυμναίο τμήμα της γάστρας του πλοίου και αποτελείται συνήθως από μία κύρια μηχανή, η οποία συνδέεται σε μία έλικα σταθερού ή μεταβλητού βήματος. Χαρακτηριστικό του μηχανοστασίου των PCCs είναι ο περιορισμός που έχει ως προς το ύψος, συγκριτικά με άλλα εμπορικά πλοία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μηχανοστάσιο περιορίζεται καθ' ύψος από το κύριο κατάστρωμα οχημάτων, που είναι εκείνο στο οποίο βρίσκεται η πρυμναία ράμπα φορτο-εκφόρτωσης του πλοίου. Αυτός ο περιορισμός αντισταθμίζεται από το σχετικά μεγαλύτερο μήκος του μηχανοστασίου.

Η φορτο-εκφόρτωση των οχημάτων στα πλοία PCCs γίνεται από την πρυμναία ράμπα, αλλά τα περισσότερα διαθέτουν και μία πλευρική. Η πλευρική ράμπα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν τα πλοία δένουν κατά μήκος της προβλήτας του λιμανιού. Τότε είναι δυνατή η εκτέλεση ταυτόχρονης φόρτωσης και εκφόρτωσης με χρήση της πρυμναίας και της πλευρικής ράμπας, δημιουργώντας δύο ροές οχημάτων. Σε αυτή την περίπτωση μειώνεται δραματικά η παραμονή του πλοίου στο λιμάνι. Η πρυμναία ράμπα των PCCs είναι από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα του πλοίου. Ο ρόλος της είναι τόσο καταλυτικός για την λειτουργία του πλοίου, σε βαθμό που να αποτελεί έναν από τους παράγοντες που συμμετέχουν στον καθορισμό της εμπορικής του αξίας.

Οι λόγοι που συνηγορούν στην μεγάλη σημασία της πρυμναίας ράμπας των PCCs έχουν άμεση σχέση με τις δυνατότητες και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής της. Πρώτα από όλα, είναι το μοναδικό μέσο πρόσβασης των οχημάτων στο πλοίο. Οποιαδήποτε βλάβη ή ζημιά της πρυμναίας ράμπας θέτει άμεσα το πλοίο εκτός λειτουργίας. Ενισχυμένες κατασκευές ράμπας επιτρέπουν την ασφαλή φόρτωση βαρέων οχημάτων. Η δυνατότητα αυτή υπολογίζεται ως ωφέλιμο φορτίο ράμπας (Safe Working Load, SWL). Η κατάλληλη γεωμετρία της σε συνδιασμό με την αντίστοιχη διαμόρφωση της πρύμνης του πλοίου, επιτρέπει στα PCCs να προσεγγίζουν λιμάνια που δεν έχουν ειδικό τερματικό εξυπηρέτησης πλοίων RO-RO, ενώ δίνει ευελιξία στον τρόπο προσέγγισης των λιμανιών, είτε με την πρύμνη, είτε κατά το μήκος της προβλήτας.

Η πρυμναία ράμπα των PCCs διακρίνεται σε τέσσερις βασικούς τύπους:

- Ευθύγραμμη πρυμναία ράμπα -Straight Stern ramp  
Είναι τοποθετημένη ομοαξονικά ως προς την centerline (CL) του πλοίου και επιτρέπει την προσέγγιση των λιμανιών μόνο με την πρύμνη.
- Πρυμναία τεταρταία ράμπα - Stern quarter ramp  
Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος πρυμναίας ράμπας των PCCs και είναι τοποθετημένη υπό σταθερή γωνία ως προς την CL του πλοίου που κυμαίνεται μεταξύ  $30^{\circ}$ ÷ $45^{\circ}$ , με κατεύθυνση κυρίως προς την δεξιά πλευρά (starboard side), που βρίσκεται συνήθως

και η πλευρική ράμπα. Επιτρέπει την προσέγγιση κατά μήκος της προβλήτας του λιμανιού.

- Πρυμναία ράμπα -Jumbo ramp

Όταν η πρυμναία τεταρταία ράμπα έχει διαστάσεις που ξεπερνούν τα 45m μήκος, 12m καθαρό πλάτος, SWL μεγαλύτερο από 350 tonnes και εξυπηρετεί χώρο φορτίου με άνοιγμα μεταξύ 20m και 28m, τότε λέγεται “Jumbo ramp”.

- Πρυμναία περιστρεφόμενη ράμπα - Stern slewing ramp

Έχει την δυνατότητα να λειτουργεί σε διάφορες γωνίες, από 0° (κατάπρυμα) έως 40° ως προς την CL του πλοίου, στρεφόμενη ως προς την βάση στήριξής της, με κατεύθυνση είτε αριστερά (port side), είτε δεξιά (starboard side) του πλοίου. Προσδίδει μεγάλη ευελιξία στο πλοίο, γιατί επιτρέπει την προσέγγιση των λιμανιών με την πρύμνη ή κατά το μήκος της προβλήτας, προσεγγίζοντας την είτε με την αριστερή, είτε με την δεξιά πλευρά του πλοίου. Παρουσιάζει το μειονέκτημα μικρότερου SWL από τους προηγούμενους τύπους ράμπας, ενώ απαιτείται ειδική διαμόρφωση της πρύμνης.

Όλες οι πρυμναίες ράμπες των PCCs έχουν αρκετά μεγάλο μήκος, που επιτυγχάνεται με αναδιπλούμενες κατασκευές (foldable ramps), αποτελούμενες συνήθως από δύο κομμάτια που συνδέονται μεταξύ τους μέσω άρθρωσης.

Ο χώρος του φορτίου αποτελείται από συνεχή, κατά το διάμηκες του πλοίου, καταστρώματα (Flush type decks), όπου δεν παρεμβάλλονται εγκάρσιες φρακτές, στα οποία σταθμεύουν τα οχήματα και χαρακτηρίζονται ως καταστρώματα οχημάτων (Car Decks). Στην Εικόνα 5 φαίνεται ένα τυπικό κατάστρωμα οχημάτων πλοίου PCC.



Εικόνα 5: Τυπικό κατάστρωμα οχημάτων πλοίου PCC  
(Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=zAQ-DpOxUw8>)

Ο αριθμός των καταστρωμάτων διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου, αλλά και με την απόσταση (ύψος) που έχει το ένα κατάστρωμα από το άλλο. Στην περιοχή κάτω από το κύριο κατάστρωμα, δηλαδή κάτω από την ίσαλο πλευσης, βρίσκεται συνήθως ένα κατάστρωμα μεταφοράς οχημάτων, το οποίο εκτείνεται από την πρωραία φρακτή σύγκρουσης μέχρι την πρωραία φρακτή του μηχανοστασίου. Τα υπόλοιπα καταστρώματα εκτείνονται κατά μήκος του πλοίου από την πρωραία φρακτή σύγκρουσης μέχρι την πρύμνη, ενώ κατά την κατακόρυφη διεύθυνση εκτείνονται συνήθως μέχρι το ανώτερο κατάστρωμα που βρίσκεται η γέφυρα του πλοίου.

Υπάρχουν δύο τύποι καταστρωμάτων μεταφοράς οχημάτων, που είναι: τα σταθερής θέσης καταστρώματα (Fixed Car Decks) και τα ανυψούμενα καταστρώματα (Hoistable Car Decks), που έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν την θέση τους κατακόρυφα. Στα περισσότερα πλοία PCCs, που μεταφέρουν μόνο επιβατικά αυτοκίνητα, τα καταστρώματα είναι σταθερής θέσης και μικρού ύψους (συνήθως 2.5m÷3m), ενώ στα PCTCs υπάρχει συνδιασμός των δύο τύπων καταστρωμάτων. Σε αυτά τα πλοία, η απόσταση των σταθερής θέσης καταστρωμάτων ξεπερνά τα 8m και μεταξύ τους παρεμβάλλονται τα ανυψούμενα καταστρώματα. Η κατακόρυφη μετακίνηση ενός ανυψούμενου καταστρώματος δημιουργεί κάτω από αυτό χώρο ικανό να παραλάβει οχήματα ογκώδη και μεγάλου ύψους. Η κίνηση των οχημάτων μεταξύ των καταστρωμάτων γίνεται από εσωτερικές ράμπες, που και αυτές διακρίνονται σε σταθερής θέσης (Internal Fixed Ramps) και σε κινητής θέσης (Internal Moveable Ramps). Οι τελευταίες χρησιμοποιούνται για την πρόσβαση των οχημάτων στα ανυψούμενα καταστρώματα. Στην περίπτωση που οι ράμπες, ανεξαρτήτως του τύπου τους, είναι εξοπλισμένες με σημεία πρόσδεσης τότε χρησιμοποιούνται και αυτές για μεταφορά οχημάτων.

Τα καταστρώματα, λόγω της έλλειψης φρακτών στον εσωτερικό χώρο τους, υποστηρίζονται από μεταλλικές κολώνες (Pillars). Τα ενισχυτικά των καταστρωμάτων, διαμήκη και εγκάρσια, βρίσκονται από την κάτω πλευρά, δημιουργώντας από την άνω πλευρά ένα επίπεδο δάπεδο, ώστε να διευκολύνεται η μετακίνηση και η στάθμευση των οχημάτων. Το δάπεδο των καταστρωμάτων είναι εφοδιασμένο με πλήθος από σημεία πρόσδεσης (Securing Points) για την ακινητοποίηση των οχημάτων κατά την διάρκεια του ταξιδιού. Η ακινητοποίηση γίνεται συνήθως με ιμάντες (Ratchet Straps) που δένονται στο όχημα και στα σημεία πρόσδεσης του δαπέδου, Εικόνα 6. Για τον αριθμό των σημείων πρόσδεσης που πρέπει να έχει το κατάστρωμα και τις προδιαγραφές που πρέπει να έχουν οι ιμάντες ή οποιοδήποτε άλλο μέσο χρησιμοποιείται για την ακινητοποίηση των οχημάτων, υπάρχουν οδηγίες κυρίως από τον οργανισμό IMO, οι οποίες είναι:

- IMO Resolution A.533(13): “Elements to be taken into account when considering the Safe Stowage and Securing of cargo units and vehicles in ships” και
- IMO Resolution A.581(14): “Guidelines for securing arrangements for the transport of road vehicles on RO-RO ships”.
- IMO MSC.1/Circ.1355(2010): “Amendments to the Guidelines for securing arrangements for the transport of road vehicles on RO-RO ships (Resolution A.581(14)).



Εικόνα 6: Ασφάλιση οχήματος βαρέος τύπου με ιμάντες  
(Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=V3mY30VavX0>)

Ένας πολύ σημαντικός και απαραίτητος μηχανολογικός εξοπλισμός, που διαθέτουν όλα τα πλοία PCCs, είναι το σύστημα εξαερισμού του χώρου φορτίου, το οποίο χρησιμοποιείται για την απαγωγή των ρύπων καυσαερίων που δημιουργούνται από την λειτουργία των κινητήρων των οχημάτων κατά το στάδιο της φορτο-εκφόρτωσης. Το σύστημα εξαερισμού του χώρου φορτίου απαιτείται να λειτουργεί ανεξάρτητο από άλλα συστήματα εξαερισμού, που εξυπηρετούν άλλους χώρους του πλοίου.

Η σύσταση των καυσαερίων είναι κυρίως μονοξείδιο του άνθρακα (CO) από τους κινητήρες βενζίνης και οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>: NO και NO<sub>2</sub>) από τους κινητήρες πετρελαίου. Η έλλειψη εξαερισμού έχει ως επακόλουθο μεγάλες συγκεντρώσεις των ρύπων αυτών στους κλειστούς χώρους φορτίου των PCCs, με επιβλαβείς και πολλές φορές επικίνδυνες συνέπειες για το εργαζόμενο προσωπικό.

Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) είναι ένα αέριο άχρωμο και άοσμο, που κατά την αναπνοή εμποδίζει την σωστή οξυγόνωση του αίματος. Προκαλεί πονοκέφαλο, ζαλάδα και ναυτία, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις αδυναμία, γρήγορη αναπνοή, αναισθησία, ακόμα και θάνατο.

Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) είναι ένα αέριο άχρωμο και είναι το κύριο οξείδιο του αζώτου που σχηματίζεται κατά την καύση στους κινητήρες πετρελαίου. Από μόνο του δεν είναι επικίνδυνο για την υγεία των εργαζομένων. Όμως, σχηματίζει εύκολα, παρουσία οξυγόνου, διοξείδιο του αζώτου (NO<sub>2</sub>), το οποίο είναι αέριο καφέ χρώματος, με άσχημη μυρωδιά, προκαλεί ασφυξία και κάψιμο στους πνεύμονες κατά την αναπνοή.

Οι προδιαγραφές του συστήματος εξαερισμού των πλοίων PCCs καθορίζονται από τις οδηγίες του MSC (Maritime Safety Committee) και συγκεκριμένα την MSC/Circ.729: Design Guidelines and Operational Recommendations for Ventilation Systems in RO-RO Cargo Spaces.

Υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων εξαερισμού:

- Εξαερισμός με απαγωγή αέρα (Exhaust Air Ventilation)

Με το σύστημα αυτό γίνεται απαγωγή του αέρα από τον χώρο του φορτίου. Οι ανεμιστήρες του εξαερισμού δημιουργούν ροή αέρα από το εσωτερικό του πλοίου προς την ατμόσφαιρα, ενώ καθαρός αέρας εισέρχεται με φυσικό τρόπο από κατάλληλες διόδους. Εφαρμόζεται όταν απαιτείται υπο-ατμοσφαιρική πίεση (sub – atmospheric pressure) στον χώρο φορτίου, η οποία και αποτρέπει τους ρύπους να εξαπλωθούν σε άλλους χώρους του πλοίου.

- Εξαερισμός με παροχή αέρα (Supply Air Ventilation)

Σε αυτό το σύστημα οι ανεμιστήρες προκαλούν ροή του αέρα από την ατμόσφαιρα προς το εσωτερικό του πλοίου, ενώ ο αέρας που βρίσκεται στον εσωτερικό χώρο εξέρχεται με φυσικό τρόπο από κατάλληλες διόδους. Προκαλεί ελαφρά συμπίεση του χώρου φορτίου και μερικές φορές υπάρχει ο κίνδυνος να παραμένουν στάσιμοι ρύποι, ειδικά στα κατώτερα καταστρώματα.

Ο πιο αποδοτικός τρόπος εξαερισμού των πλοίων PCCs είναι να γίνεται συνδυασμός και των δύο συστημάτων που αναφέρθηκαν, ταυτόχρονα, με σωστό σχεδιασμό της εγκατάστασης, ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή ροή του αέρα σε όλους τους εσωτερικούς χώρους. Η ροή του αέρα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η απόδοση του συστήματος εξαερισμού ως προς την παροχή του αέρα, ο όγκος και η γεωμετρία του χώρου μεταφοράς των οχημάτων, καθώς και το πλήθος και οι θέσεις των αεραγωγών.

Τέλος, τα πλοία PCCs διαθέτουν ένα εκτεταμένο σύστημα πυρασφάλειας σε όλους τους χώρους του φορτίου και είναι πανομοιότυπο με ότι εφαρμόζεται σε άλλα εμπορικά πλοία. Οι βασικές προδιαγραφές του καθορίζονται κυρίως από τον κανονισμό της SOLAS: Chapter II/2, του IMO: Resolution A.123(V), και του MSC/Circ.914.

Το σύστημα πυρασφάλειας γενικά διακρίνεται σε παθητικό και ενεργητικό. Η παθητική πυρασφάλεια έχει να κάνει κυρίως με τα μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε κάθε χώρο, τα οποία περιγράφονται λεπτομερώς στους κανονισμούς, ενώ η ενεργητική πυρασφάλεια έχει να κάνει με τα διαθέσιμα πυροσβεστικά μέσα του πλοίου.

Τα μέσα πυρόσβεσης του χώρου φορτίου είναι κυρίως το σύστημα πυρανίχνευσης (fire detection system) και το σύστημα πυρόσβεσης (fire extinguishing system). Το σύστημα πυρανίχνευσης αποτελείται από αισθητήρες θερμότητας και καπνού, ενώ προαιρετικά μπορούν να τοποθετηθούν και αισθητήρες φλόγας. Το σύστημα πυρόσβεσης υλοποιείται συνήθως από κατάλληλα δίκτυα παροχής νερού που έχουν την διεθνή ονομασία drenchers. Τα δίκτυα αυτά διατρέχουν την οροφή κάθε καταστρώματος οχημάτων, όπου ανά τακτές αποστάσεις καταλήγουν σε κεφαλές ψεκασμού (sprinkler heads). Οι κεφαλές αυτές όταν ενεργοποιηθούν ψεκάζουν το νερό πυρόσβεσης συνήθως σε σχήμα κώνου. Επίσης, στις περιπτώσεις που ο χώρος του φορτίου έχει την δυνατότητα απομόνωσης, τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται και δίκτυα χαμηλής πίεσης αερίου CO<sub>2</sub>. Εκτός από αυτά, υπάρχουν, όπου προβλέπεται, πυροσβεστικές φωλιές με μάνικες πυρόσβεσης, καθώς και φορητός εξοπλισμός πυρόσβεσης για χρήση από το πλήρωμα του πλοίου. Για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος πυρόσβεσης, ο χώρος του φορτίου είναι χωρισμένος σε διαδοχικές ζώνες, στις οποίες αντιστοιχεί συγκεκριμένος αριθμός αισθητήρων και πυροσβεστικών μέσων.

### 1.3 Ορισμός του ναυτικού ατυχήματος

Το ναυτικό ατύχημα ορίζεται στο ψήφισμα A.849(20), 1997, του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization, IMO), όπου προτείνεται ένας κώδικας για την διερεύνηση των ναυτικών ατυχημάτων και συμβάντων (IMO Resolution A.849(20) “Code for the investigation of Marine Casualties and Incidents”). [3]

Ο σκοπός του κώδικα αυτού είναι η υιοθέτηση μιας κοινής μεθόδου για την έρευνα των ναυτικών ατυχημάτων και συμβάντων από τους εμπλεκόμενους φορείς, όπως επίσης και να προωθήσει την συνεργασία μεταξύ των αρχών κάθε κράτους. Ο τελικός στόχος είναι να αναγνωριστούν οι παράγοντες που οδηγούν στα ναυτικά ατυχήματα και να θεσμοθετηθούν προληπτικές ενέργειες για την βελτίωση της ασφάλειας των ναυτικών και των επιβατών, αλλά και για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Ως **ναυτικό ατύχημα** ορίζεται κάθε γεγονός που προκλήθηκε ή έχει άμεση σχέση με τις λειτουργίες του πλοίου και περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα από τα παρακάτω αποτελέσματα:

- το θάνατο ή την απώλεια ή το σοβαρό τραυματισμό ενός ατόμου,
- την απώλεια ή τεκμαιρόμενη απώλεια<sup>2</sup> ή την εγκατάλειψη του πλοίου,
- την προσάραξη ή ανικανότητα πλεύσης (ακυβερνησία) του πλοίου, ή την εμπλοκή του σε σύγκρουση,
- υλικές ζημιές στο πλοίο,
- σοβαρότατη ζημιά ή ενδεχόμενη σοβαρότατη ζημιά στο περιβάλλον εξαιτίας βλάβης του πλοίου.

Σημειώνεται ότι στον όρο «ναυτικό ατύχημα» δεν περιλαμβάνονται σκόπιμες ενέργειες ή παραλείψεις με πρόθεση να προκληθεί βλάβη στην ασφάλεια πλοίου, ατόμου ή του περιβάλλοντος.

Ως **ναυτικό συμβάν** ορίζεται ένα γεγονός, ή ακολουθία γεγονότων, που δεν κατατάσσεται ως ναυτικό ατύχημα και προκλήθηκε άμεσα από τις λειτουργίες του πλοίου, κατά το οποίο απειλήθηκε, ή αν εξελισσόταν θα απειλούσε, την ασφάλεια του πλοίου ή του πληρώματος ή άλλων ατόμων ή του περιβάλλοντος.

## 1.4 Σφοδρότητα (Severity) ναυτικών ατυχημάτων

Στο ίδιο ψήφισμα IMO A.849(20), 1997, δίνεται η ποιοτική κλίμακα μέτρησης της σφοδρότητας των ναυτικών ατυχημάτων, η οποία είναι:

- **Πολύ σοβαρό ατύχημα (Very serious casualty)**

Είναι το ατύχημα στο οποίο απωλέσθηκε το πλοίο, υπήρξε θάνατος, ή θάνατοι μελών του πληρώματος, ή προκλήθηκε πολύ σοβαρή ζημιά στο περιβάλλον.

- **Σοβαρό ατύχημα (Serious Casualty)**

Είναι το ατύχημα που δεν χαρακτηρίζεται ως «πολύ σοβαρό ατύχημα», αλλά περιλαμβάνει:

- πυρκαγιά, έκρηξη, προσάραξη, επαφή, ζημιές λόγω κακών καιρικών συνθηκών, ζημιές από πάγο, διάρρηξη της γάστρας του πλοίου, ή υποψία ελαττώματος της γάστρας, κλπ, που έχουν ως αποτέλεσμα:
- κατασκευαστικές βλάβες που καθιστούν το πλοίο μη αξιόπλοο, όπως για παράδειγμα διάρρηξη της γάστρας στην περιοχή των υφάλων του πλοίου, ακινητοποίηση των κύριων μηχανών, εκτεταμένη ζημιά των χώρων ενδιαίτησης, κλπ.
- πρόκληση μόλυνσης ανεξαρτήτου έκτασης και/ή
- βλάβη σε βαθμό που να είναι απαραίτητη η ρυμούλκηση ή η βοήθεια από την στεριά.

- **Λιγότερο σοβαρό ατύχημα (Less serious casualty)**

Είναι το ατύχημα που δεν κατατάσσεται ως πολύ σοβαρό ή σοβαρό ατύχημα.

## 1.5 Τύποι ναυτικών ατυχημάτων (Casualty Types)

Τα ναυτικά ατυχήματα διακρίνονται σε τύπους (Casualty Types) με κριτήριο την πρωταρχική αιτία που τα προκάλεσε και τις συνέπειες τους ως προς το πλοίο και τους επιβαίνοντες. Καθορίζονται στο πλαίσιο της διερευνήσης των αιτιών και έχει υιοθετηθεί η χρήση από κοινού, τόσο από τον οργανισμό IMO, όσο και από άλλους ναυτιλιακούς φορείς, των ίδιων τύπων ατυχημάτων.

Η διάκριση των ναυτικών ατυχημάτων σε τύπους και ο ορισμός τους, έχει ως εξής:

- **Σύγκρουση (Collision)**

Ατυχήματα σύγκρουσης είναι εκείνα στα οποία έλαβε μέρος βίαιη υλική επαφή μεταξύ δύο πλοίων, με συνέπειες υλικές ζημιές στο πλοίο, σωματικές βλάβες ή ακόμη και θάνατος στους επιβαίνοντες.

- **Επαφή (Contact)**

Ατυχήματα επαφής ορίζονται εκείνα στα οποία έλαβε μέρος επαφή του πλοίου με σταθερά ή επιπλέοντα σώματα.



- **Προσάραξη (Wrecked/Stranded)**

Ατυχήματα προσάραξης είναι εκείνα στα οποία επήλθε επαφή του πλοίου με τον πυθμένα της θάλασσας ή με σταθερό υποθαλάσσιο αντικείμενο, όπως για παράδειγμα ένα ναυάγιο ή ύφαλος.

- **Πυρκαγιά (Fire)**

Ως ατυχήματα πυρκαγιάς ορίζονται εκείνα στα οποία η φωτιά ήταν το πρωταρχικό γεγονός, με μεγάλη έκταση, ώστε να είναι ικανή να προκαλέσει υλικές ζημιές στο πλοίο, σωματική βλάβη ή θάνατο στους επιβαίνοντες.

- **Έκρηξη (Explosion)**

Ως ατυχήματα έκρηξης ορίζονται εκείνα στα οποία συνέβει βίαιη ανάφλεξη υλικού στο εσωτερικό του πλοίου, με συνέπεια την βίαιη εκτόνωση των αερίων και καταστροφή της υλικής υποδομής του, από την οποία μπορεί να προέλθει θάνατος ή σωματική βλάβη στους επιβαίνοντες. Ως ατυχήματα έκρηξης ορίζονται εκείνα στα οποία η έκρηξη ήταν το πρωταρχικό γεγονός.

- **Βλάβη της γάστρας/ Μηχανολογική Βλάβη (Hull/Machinery Damage)**

Ως ατυχήματα βλάβης της γάστρας ορίζονται εκείνα στα οποία παρουσιάστηκαν ρωγμές ή ρήγματα στη γάστρα του πλοίου, τα οποία είχαν επιπτώσεις στην ακεραιότητα της γάστρας και στη πλευστότητα του πλοίου.

Ως ατυχήματα μηχανολογικής βλάβης ορίζονται εκείνα στα οποία παρουσιάστηκαν βλάβες σε οποιαδήποτε κύρια ή βοηθητική μηχανολογική εγκατάσταση, καθώς και ζημιές στη περιοχή του πηδαλίου και της έλικας ή οποιοδήποτε άλλο μηχανολογικό εξοπλισμό του πλοίου.

- **Βύθιση (Foundered)**

Ως τέτοιο ατύχημα ορίζεται εκείνο που είχε ως συνέπεια την ολική απώλεια του πλοίου λόγω βύθισης.

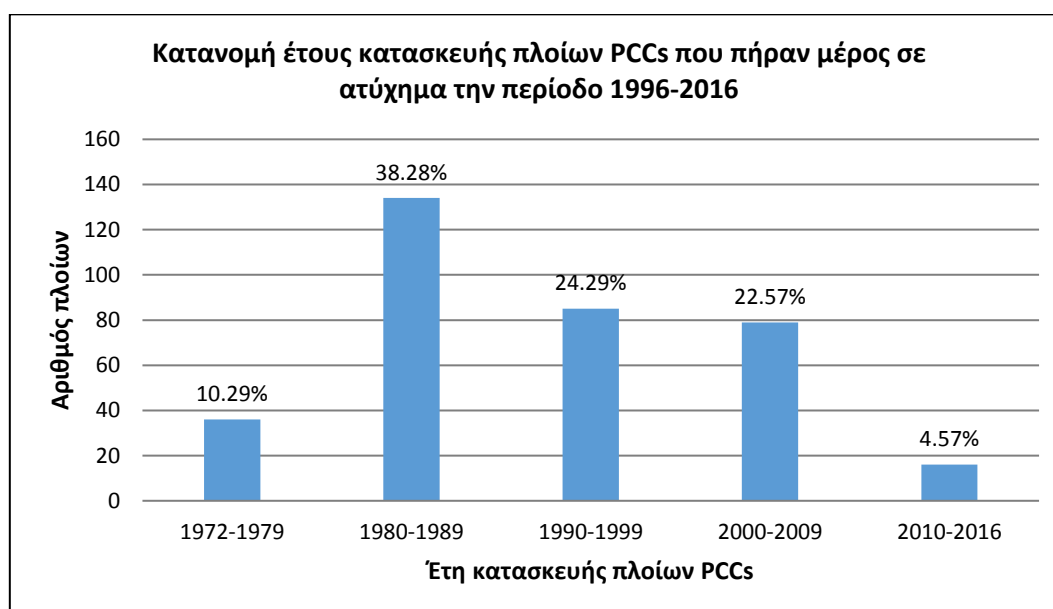
[4],[5]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Στατιστική μελέτη και ανάλυση ατυχημάτων πλοίων PCCs

### 2.1 Εισαγωγικές έννοιες

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η στατιστική μελέτη και ανάλυση των ατυχημάτων που συνέβησαν σε πλοία PCCs κατά την χρονική περίοδο 1996-2016. Οι πληροφορίες για τα ατυχήματα αυτά προέρχονται από την διαδικτυακή βάση δεδομένων Sea-Web και αφορούν όλα τα πλοία PCCs με έτος κατασκευής από το 1972 και μετά, χωρητικότητας άνω των 500 Gross Tonnage (GT), που είναι η ελάχιστη απαίτηση για την εφαρμογή των κανονισμών της SOLAS (Safety of Life at Sea).

Το στατιστικό δείγμα αριθμείται από 350 ατυχήματα πλοίων, των οποίων το έτος κατασκευής έχει την παρακάτω κατανομή, Σχήμα 1:



Σχήμα 1: Κατανομή έτους κατασκευής πλοίων PCCs που πήραν μέρος σε ατύχημα την περίοδο 1996-2016

Τα πλοία με έτος κατασκευής πριν από το 1990, αποτελούν το 48.57% του στατιστικού δείγματος. Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα πλοία που κατασκευάστηκαν από το 2010 και μετά, δηλαδή πλοία ηλικίας 1÷7 έτη, συγκεντρώνουν μόλις το 4.57% των ατυχημάτων.

Τα ατυχήματα των πλοίων PCCs, που είναι καταχωρημένα στην βάση δεδομένων Sea-Web, συνοδεύονται από τις παρακάτω πληροφορίες (attributes):

- Αριθμός ατυχήματος (Incident No)
- Ημερομηνία ατυχήματος (Casualty Date)
- Αριθμός IMO πλοίου (IMO Ship No)

- Όνομα πλοίου (Ship Name)
- Ημερομηνία κατασκευής πλοίου (Date of Build)
- Χώρα κατασκευής πλοίου (Country of Build)
- Σφοδρότητα ατυχήματος (Severity)
- Χαρακτηρισμός ατυχήματος (Casualty ή Total Loss)
- Τύπος ατυχήματος (Casualty Type)
- Σημαία πλοίου (Flag)
- Γεωγραφική περιοχή ατυχήματος (Zone)
- Περιβαλλοντική ρύπανση (Pollution)
- Αριθμός νεκρών ή αγνοούμενων (Killed, Missing)
- Χωρητικότητα οχημάτων (Vehicles)

Στην συνέχεια δίνονται σχετικές πληροφορίες ως προς τον τρόπο χειρισμού ορισμένων attributes των ατυχημάτων, που κρίνεται ότι είναι απαραίτητες για την κατανόηση της στατιστικής ανάλυσης.

Ο αριθμός ατυχήματος, ο αριθμός IMO και το όνομα του πλοίου χρησιμοποιήθηκαν μόνο για τον σκοπό της ταυτοποίησης και διάκρισης των ατυχημάτων μεταξύ τους, καθώς και για τον προσδιορισμό του αριθμού των πλοίων που συμμετείχαν σε περισσότερα από ένα ατυχήματα κατά το χρονικό διάστημα 1996-2016.

Τα ναυτικά ατυχήματα, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.4, διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ισχύ και το μέγεθος των καταστροφών που προξένησαν στο πλοίο, στους επιβαίνοντες και στο περιβάλλον. Αυτό το μέγεθος περιγράφεται στην αγγλική ορολογία ως “Severity of marine accidents”, και συνοδεύεται από τις κατηγορίες: “Very Serious, Serious, και Less Serious casualty”.

Ταυτόχρονα με τα παραπάνω, η βάση δεδομένων Sea-Web, συμπληρώνει το attribute “Severity” των ατυχημάτων με την λέξη “Serious” ή με το κενό. Επειδή ήταν αδύνατο να προσδιοριστεί τι ακριβώς σημαίνει το “Serious” ή το κενό για την Sea-Web, εξετάστηκαν τα ατυχήματα και ως προς τις συνέπειές τους. Βρέθηκε ότι μόνο από τα ατυχήματα που χαρακτηρίζονταν ως “Serious” προέρχονταν, σε ορισμένες περιπτώσεις, συνέπειες όπως Total Loss/Broken up για το πλοίο, ή αγνοούμενοι/θάνατοι μελών του πληρώματος, ή πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον.

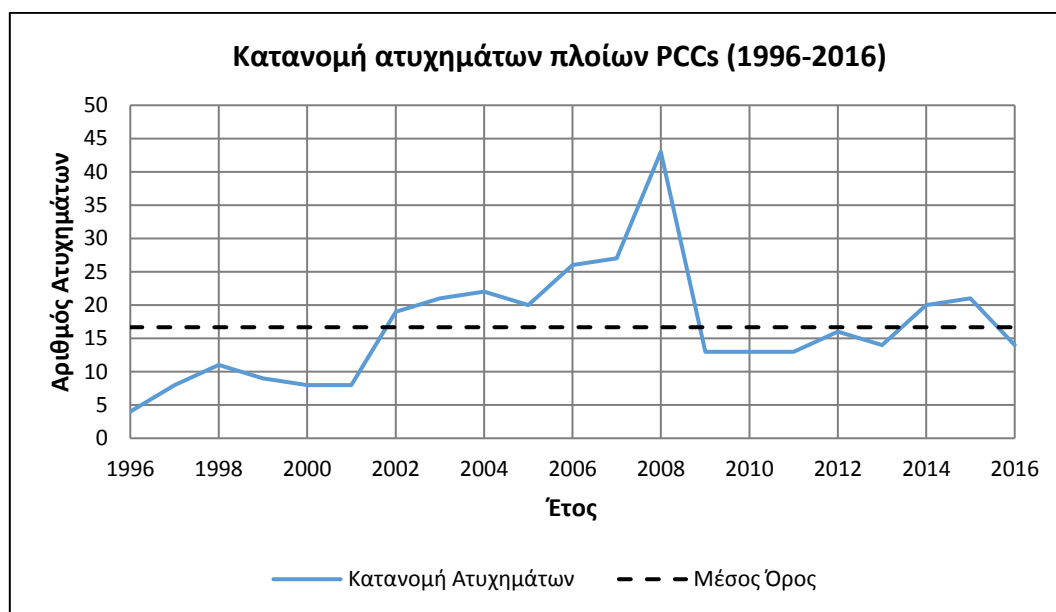
Για τους λόγους αυτούς σε αυτή την εργασία θεωρείται ότι:

- με τον όρο “Serious” αποδίδονται τα ατυχήματα που χαρακτηρίζονται ως Very Serious και Serious σύμφωνα με το ψήφισμα IMO A.849(20), 1997 και στα αντίστοιχα δεδομένα της Sea-Web υπάρχει το “Serious”,
- με τον όρο “Not Serious” αποδίδονται τα ατυχήματα που χαρακτηρίζονται ως Less Serious σύμφωνα με το ψήφισμα IMO A.849(20), 1997, και στα αντίστοιχα δεδομένα της Sea-Web υπάρχει το κενό.

Η μέτρηση της χωρητικότητας σε οχήματα, των πλοίων PCCs, γίνεται μέσω του μήκους των λωρίδων οχημάτων (Lane Lines), που μπορεί να εξυπηρετήσει ο χώρος φορτίου. Όμως, αυτό το attribute στην βάση δεδομένων Sea-Web, ήταν συμπληρωμένο μόνο κατά 20%, οπότε και κρίθηκε ακατάλληλο. Αντί αυτού, χρησιμοποιήθηκε το attribute “Vehicles” που είχε πληρότητα 100%.

## 2.2 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016)

Ο συνολικός αριθμός των ατυχημάτων που συνέβησαν σε πλοία PCCs, κατά την χρονική περίοδο 1996-2016, ανέρχεται σε τριακόσια πενήντα (350). Η κατανομή των ατυχημάτων αυτών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016)

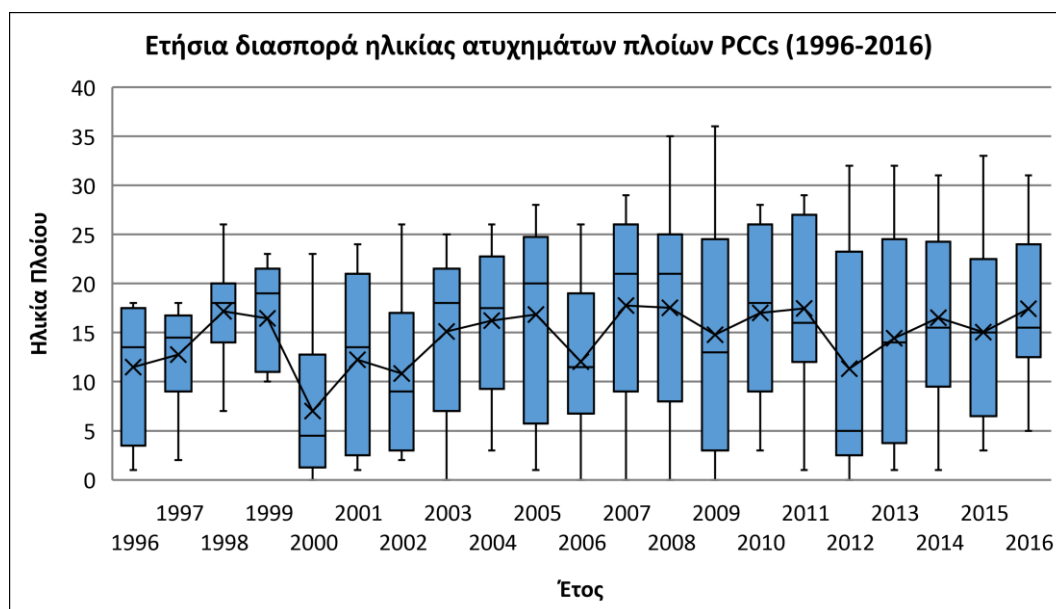
Ο μέσος όρος των ατυχημάτων είναι 16.67 ατυχήματα πλοίων PCCs ανά έτος. Ο μικρότερος αριθμός ατυχημάτων (4) συνέβη το έτος 1996, ενώ μεγαλύτερος αριθμός (43) συνέβη το έτος 2008. Η διακύμανση (Variance) των ατυχημάτων είναι 75.63, ενώ η τυπική απόκλιση (Standard Deviation) είναι 8.69.

Από το Σχήμα 2 παρατηρείται ότι η χρονική περίοδος 1996-2016 μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, το πρώτο μεταξύ των ετών 1996-2008 και το δεύτερο μεταξύ των ετών 2009-2016. Στο πρώτο μέρος (1996-2008) συμβαίνουν μεγάλες διακυμάνσεις του αριθμού των ατυχημάτων, που έχουν αυξητική τάση, ο μέσος όρος είναι 17.38 ατυχήματα ανά έτος, με διακύμανση 118.42 και τυπική απόκλιση 10.88. Το δεύτερο διάστημα (2009-2016) χαρακτηρίζεται από σχετική σταθερότητα του αριθμού των ατυχημάτων, που συμβαίνουν σε κάθε έτος, ο μέσος όρος είναι 15.5 ατυχήματα ανά έτος, με διακύμανση 10.57 και τυπική απόκλιση 3.25. Επιπλέον, κατά τα δύο τελευταία έτη, 2015 και 2016, τα ατυχήματα παρουσιάζουν φθίνουσα τάση.

Επίσης, το έτος 2009 συμβαίνει η μεγαλύτερη μείωση ατυχημάτων όλης της χρονικής περιόδου 1996-2016, η οποία ενισχύεται και από το γεγονός ότι προηγείται το έτος 2008, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν τα περισσότερα ατυχήματα της περιόδου. Η μείωση των ατυχημάτων είναι της τάξης του 30.23% συγκριτικά με το έτος 2008.

## 2.3 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ηλικία

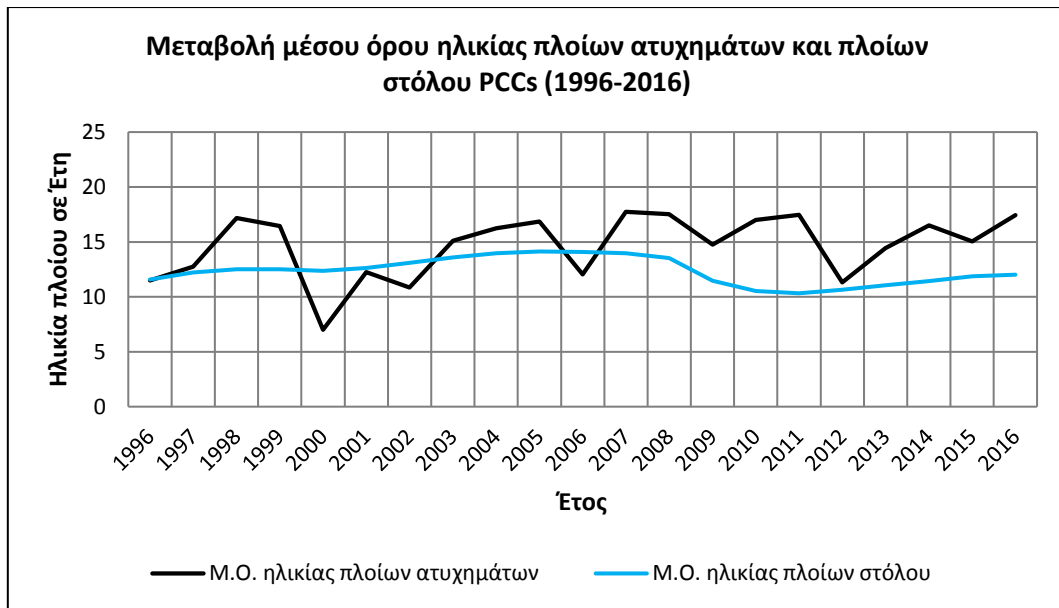
Η ετήσια διασπορά της ηλικίας των πλοίων PCCs, στα οποία συνέβει ατύχημα κατά το χρονικό διάστημα 1996-2016, παρουσιάζεται από το διάγραμμα στο Σχήμα 3. Ο μέσος όρος της ηλικίας των πλοίων κάθε έτους απεικονίζεται με το σύμβολο «X».



Σχήμα 3: Ετήσια διασπορά ηλικίας ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016)

Από το διάγραμμα του Σχήματος 3, διαπιστώνεται ότι με την πάροδο των ετών η διασπορά της ηλικίας των πλοίων με ατύχημα μεγαλώνει, αλλά ο κύριος όγκος βρίσκεται μεταξύ των ηλικιών 5 και 25 έτη. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον ετήσιο μέσο όρο ηλικίας των πλοίων με ατύχημα, που κυμαίνεται σταθερά μεταξύ τα 10 και 20 έτη σε όλο το χρονικό διάστημα 1996-2016. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το έτος 2000, όπου ο μέσος όρος είναι τα 7 έτη και ταυτόχρονα η διασπορά είναι αισθητά μικρότερη των υπολοίπων, μεταξύ 1 και 13 έτη.

Η μεταβολή του ετήσιου μέσου όρου της ηλικίας των πλοίων με ατύχημα δεν πρέπει να συνδεθεί με αντίστοιχη μεταβολή του μέσου όρου της ηλικίας των πλοίων του στόλου. Αυτό διαπιστώνεται από το Σχήμα 4, όπου απεικονίζονται μαζί οι δύο παραπάνω μέσοι όροι ηλικίας. Ο μέσος όρος της ηλικίας των πλοίων του στόλου των PCCs αυξάνεται ελάχιστα από το 1996 μέχρι το 2008, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 11 και 13.5 έτη, ενώ στην συνέχεια, το 2009, παρουσιάζει σημαντική μείωση, με τιμή που αγγίζει τα 10 έτη και έπειτα συνεχίζει ακολουθώντας ελαφρά άνοδο μέχρι το τέλος του 2016 προσεγγίζοντας τα 12 έτη.



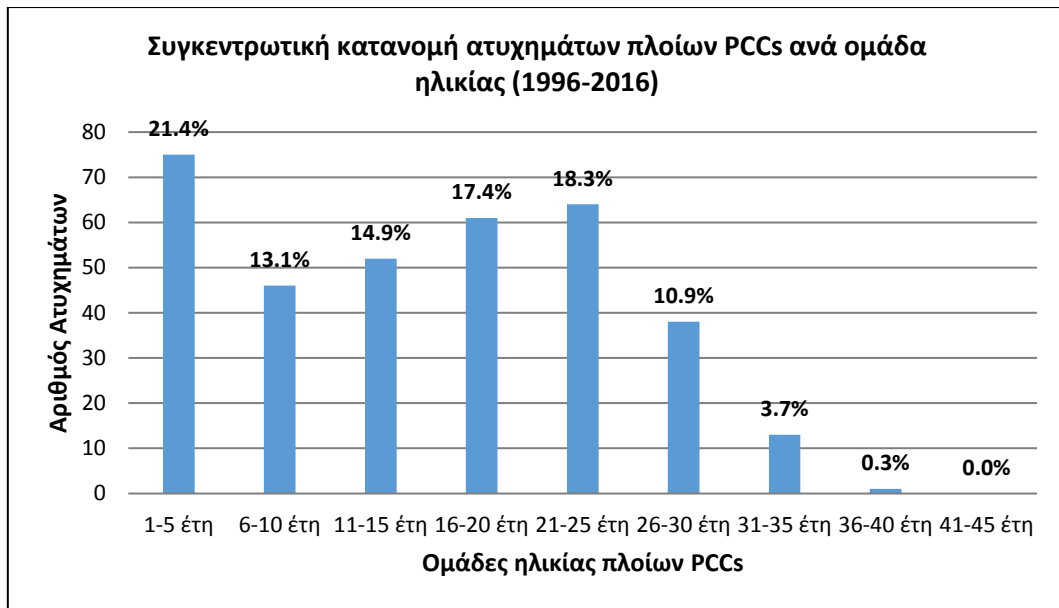
Σχήμα 4: Μέσος όρος ηλικίας πλοίων ατυχημάτων και πλοίων στόλου PCCs (1996-2016)

Επειδή, γενικά, η ηλικία είναι μέγεθος που μπορεί να κινηθεί σε ένα μεγάλο εύρος θετικών ακέραιων τιμών, κρίνεται σκόπιμο να γίνει ταξινόμηση των ατυχημάτων κατά ομάδες ηλικίας. Για τον σκοπό αυτό, από την ανάλυση όλων των ηλικιών των πλοίων PCCs με ατύχημα, προσδιορίζεται ότι το κατάλληλο εύρος των ομάδων ηλικίας είναι τα πέντε έτη.

Σημειώνεται ότι η τελευταία ομάδα ηλικίας, 41÷45, δεν περιέχει κανένα πλοίο με ατύχημα, αλλά δημιουργήθηκε με σκοπό να διευκολύνει τον υπολογισμό των συχνοτήτων ατυχημάτων που γίνεται στο Κεφάλαιο 3.3, όπου στην αντίστοιχη ομάδα ηλικίας του στόλου των PCCs, υπάρχει αριθμός πλοίων σε υπηρεσία.

Επίσης, οι ομάδες ηλικίας των πλοίων PCCs δεν έχουν ομοιόμορφη κατανομή σε όλα τα χρόνια της περιόδου 1996-2016. Κάποιες από αυτές εμφανίζονται πολύ αργότερα από το 1996, καθώς μεγαλώνει η ηλικία των πλοίων που βρίσκονται σε υπηρεσία και μεταπηδούν σε άλλη ομάδα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ομάδα ηλικίας 31÷35 έτη εμφανίζεται μετά το 2003, η 36÷40 έτη μετά το 2008 και η 41÷45 έτη μετά το 2013.

Τα ατυχήματα των PCCs, ως προς το σύνολό τους, κατανέμονται στις ομάδες ηλικίας όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 5, από όπου προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των ατυχημάτων, 21.4%, εμφανίζουν τα πλοία ηλικίας 1÷5 έτη και ακολουθούν τα πλοία ηλικίας 21÷25 έτη με ποσοστό 18.3%. Τρίτα, κατά σειρά, έρχονται τα πλοία ηλικίας 16÷20 έτη (17.4%), στην συνέχεια τα πλοία ηλικίας 11÷15 έτη (14.9%) και τέλος τα πλοία ηλικίας 6÷10 έτη (13.1%). Τα μικρότερα ποσοστά ατυχημάτων παρατηρούνται στα πλοία μεγάλης ηλικίας, δηλαδή των ομάδων 26÷30, 31÷35 και 36÷40 έτη. Όμως, λόγω του μικρού αριθμού πλοίων σε υπηρεσία αυτών των ομάδων ηλικίας, εμφανίζουν από τις μεγαλύτερες συχνότητες ατυχημάτων, όπως αναφέρεται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 3.3.



Σχήμα 5: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας (1996-2016)

Ο μέσος όρος των ατυχημάτων κάθε ομάδας ηλικίας για το διάστημα 1996-2016 είναι:

- (1÷5) έτη: 3.57
- (6÷10) έτη: 2.19
- (11÷15) έτη: 2.48
- (16÷20) έτη: 2.90
- (21÷25) έτη: 3.05
- (26÷30) έτη: 2.00, υπολογίζεται μετά το 1998 που υπάρχει η πρώτη καταγραφή
- (31÷35) έτη: 0.93, μετά το 2003
- (36÷40) έτη: 0.11, μετά το 2008
- (41÷45) έτη: 0.00, μετά το 2013

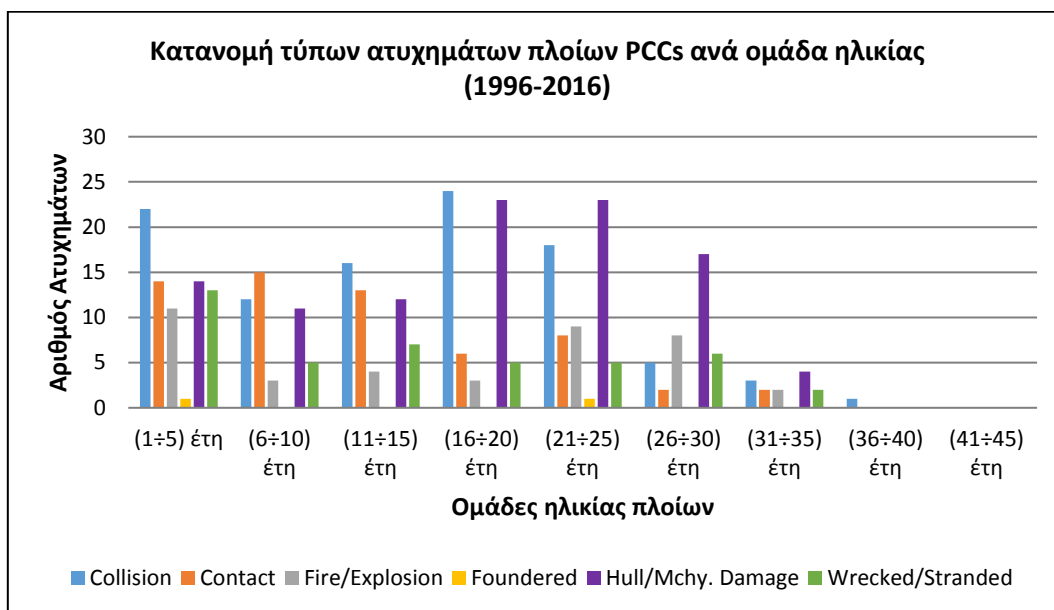
Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται η κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs, ανά ομάδα ηλικίας, ως προς τον τύπο του ατυχήματος, για την χρονική περίοδο 1996-2016.

Από την κατανομή παρατηρείται ότι ο τύπος ατυχήματος Collision, επικρατεί στην ομάδα ηλικίας 1÷5 έτη και στην συνέχεια ξανά στην ομάδα ηλικίας 16÷20 έτη, ενώ γενικά είναι σε υψηλό επίπεδο. Οι τύποι ατυχήματος Contact, Fire/Explosion και Wrecked/Stranded μειώνονται καθώς αυξάνεται η ηλικία των πλοίων, σε αντίθεση με τα ατυχήματα τύπου Hull/Mchy.Damage που είναι πολύ συχνά, αλλά ιδιαίτερα αυξημένα στις ομάδες ηλικίας 16÷20, 21÷25 και 26÷30, όπως βέβαια αναμενόταν.

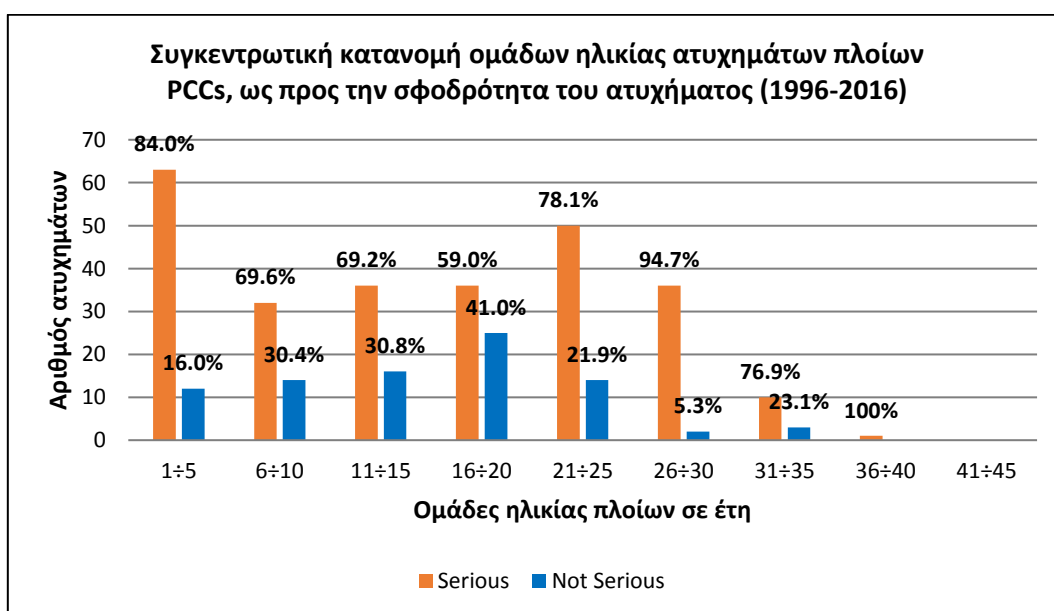
Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας, με κριτήριο την σφοδρότητα του ατυχήματος, για την χρονική περίοδο 1996-2016.

Σε όλες της ομάδες ηλικίας των πλοίων PCCs παρατηρείται ότι το ποσοστό των Serious ατυχημάτων είναι σημαντικά υψηλό και υπερβαίνει το 55.0%. Ειδικότερα για τις ομάδες ηλικίας 1÷5, 21÷25 και 26÷30 έτη, το ποσοστό των Serious ατυχημάτων είναι 84.0%, 78.1%

και 94.7% αντίστοιχα, γεγονός που δηλώνει έναν προβληματισμό για τα πρώτα χρόνια της λειτουργίας αυτών των πλοίων, αλλά φανερώνει και ένα κατώφλι στον μέγιστο χρόνο ασφαλούς και κερδοφόρας εκμετάλλευσης. Επειδή, όπως διαπιστώνεται, τα ατυχήματα των PCCs ενδέχεται να είναι Serious σε οποιαδήποτε ηλικία του πλοίου, θα ήταν ιδιαίτερα ωφέλιμη η λεπτομερής διερεύνηση των αιτιών των ατυχημάτων αυτών, ώστε σε ένα επόμενο στάδιο να μελετηθούν οι κατάλληλοι τρόποι πρόληψης των ατυχημάτων και μείωσης των συνεπειών τους.



Σχήμα 6: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας (1996-2016)

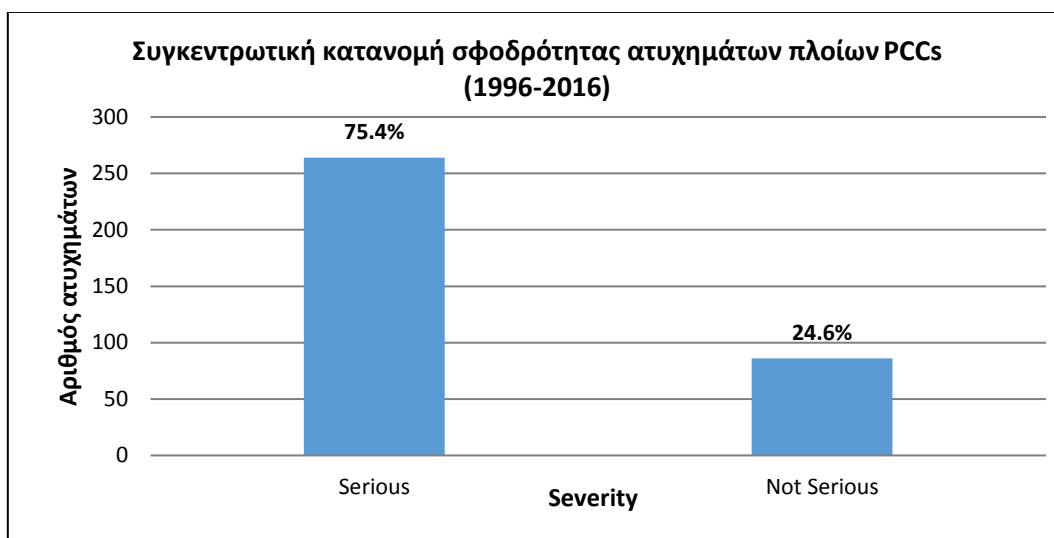


Σχήμα 7: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας ως προς την σφοδρότητα του ατυχήματος (1996-2016)



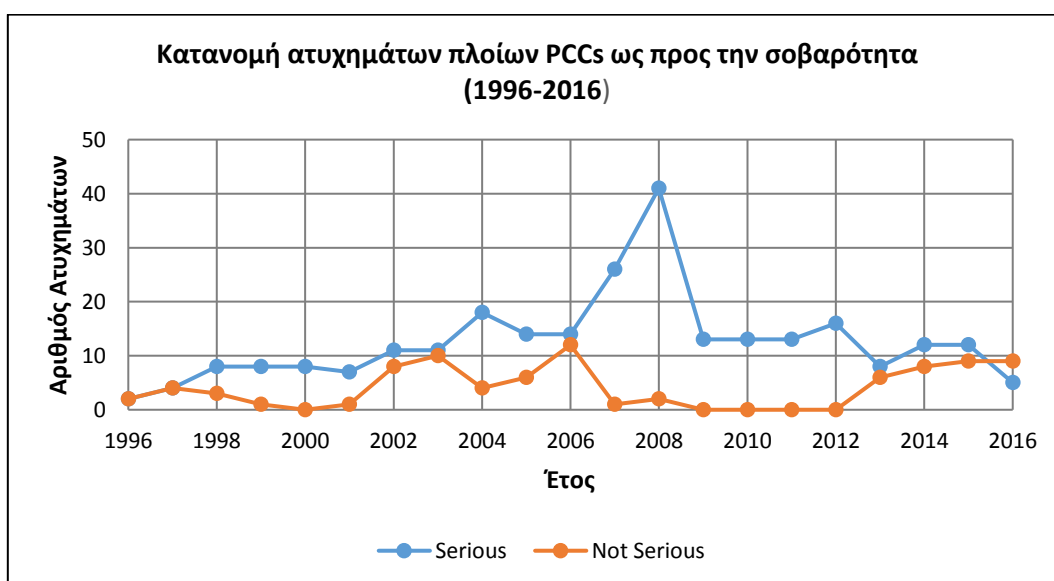
## 2.4 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σφοδρότητα του ατυχήματος (Severity)

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η συγκεντρωτική κατανομή όλων των ατυχημάτων πλοίων PCCs, με κριτήριο την σφοδρότητα του ατυχήματος, για την χρονική περίοδο 1996-2016. Όπως προκύπτει, το 75.43% των ατυχημάτων αυτών χαρακτηρίζονται ως σοβαρά (Serious), ενώ το 24.57% ως μη σοβαρά ατυχήματα (Not serious), όπως ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 1.4.



Σχήμα 8: Συγκεντρωτική κατανομή σφοδρότητας ατυχημάτων πλοίων PCCs

Η κατανομή των Serious και Not Serious ατυχημάτων για τα PCCs στην χρονική περίοδο 1996-2016 παρουσιάζεται στο Σχήμα 9, από όπου είναι εμφανές ότι σε κάθε έτος υπερτερούν τα

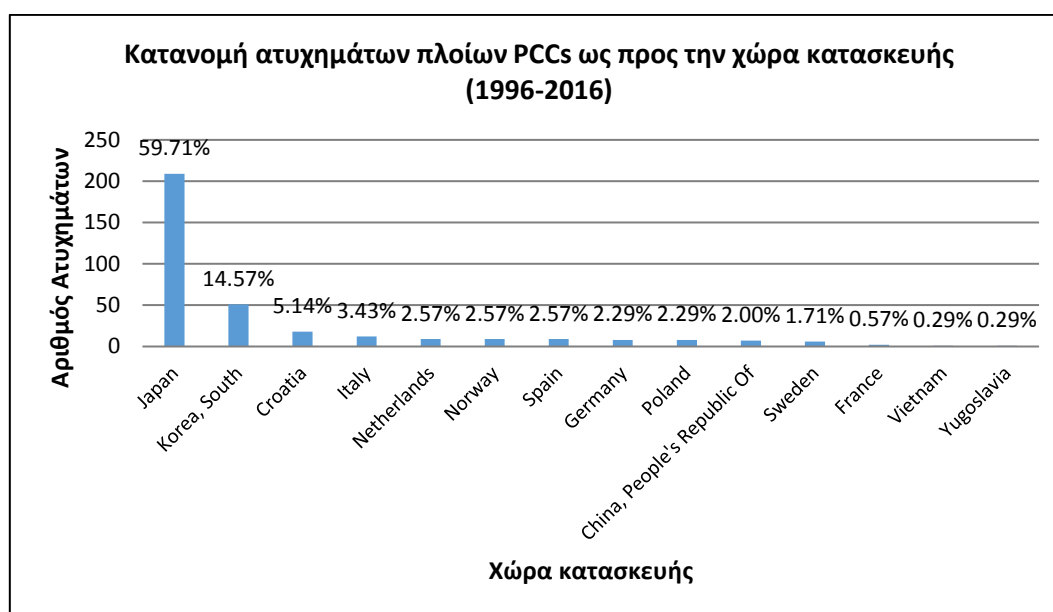


Σχήμα 9: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων PCC ως προς "Severity"

Serious ατυχήματα. Μετά το έτος 2009, τα Serious ατυχήματα σχεδόν σταθεροποιούνται αριθμητικά σε ετήσια βάση, γεγονός που πιθανόν οφείλεται στην μεγάλης κλίμακας ανανέωση του στόλου των πλοίων αυτών που έλαβε χώρα το 2009, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 3.1, ενώ τα τελευταία έτη, 2015 και 2016, εμφανίζουν τάση μείωσης. Επίσης, παρατηρείται ότι ο αριθμός των Not Serious ατυχημάτων σε πολλές περιπτώσεις μειώνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των Serious ατυχημάτων, όπως συμβαίνει κατά τα έτη 1998-2002, 2004, 2007-2012 και 2016.

## 2.5 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την χώρα κατασκευής (Country of Built)

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η κατανομή των ατυχημάτων των PCCs ως προς την χώρα κατασκευής τους (Country of Built), για την χρονική περίοδο 1996-2016. Τα αποτελέσματα κατατάσσονται από την χώρα κατασκευής που εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό ατυχημάτων, προς την χώρα κατασκευής με το μικρότερο ποσοστό ατυχημάτων.

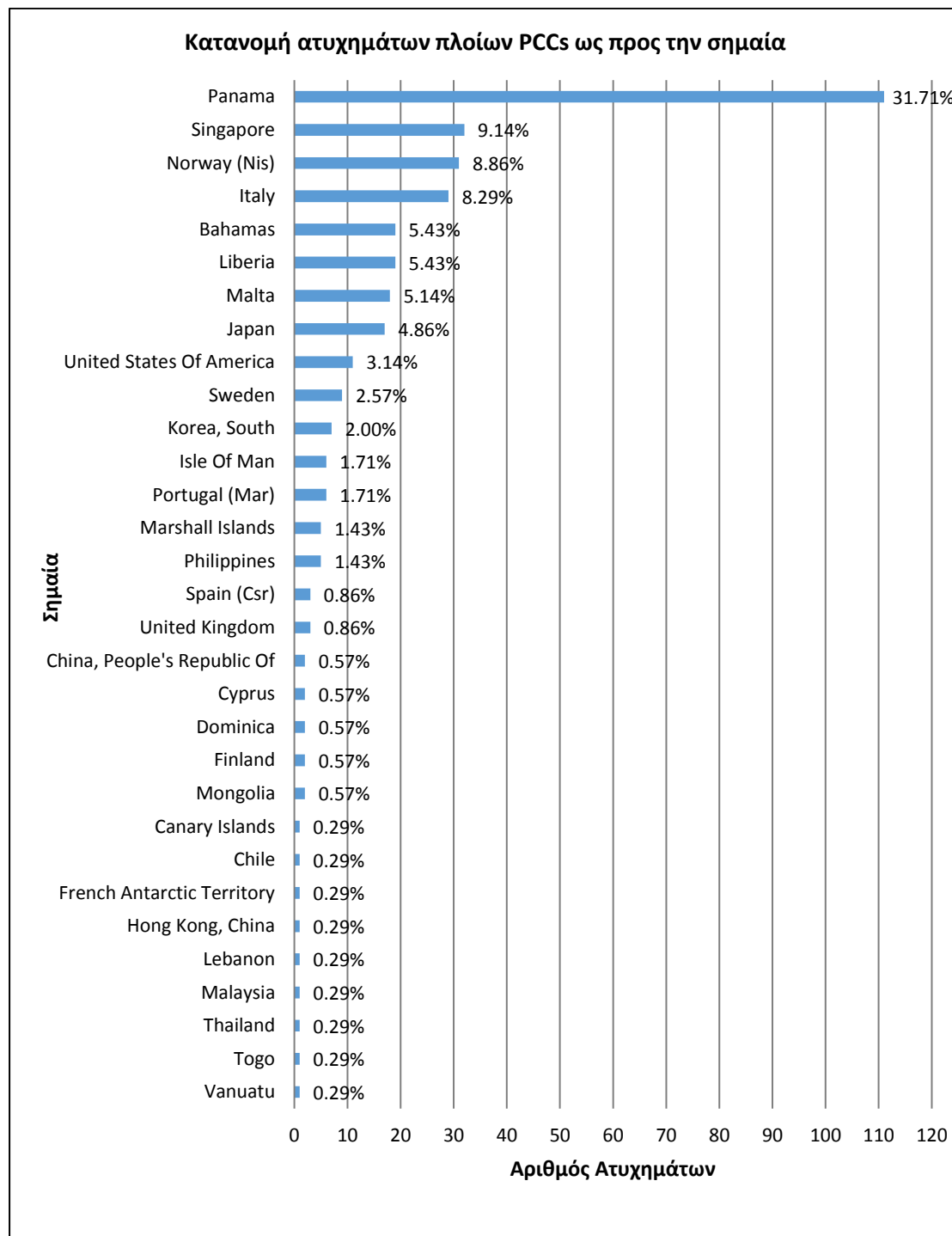


Σχήμα 10: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την χώρα κατασκευής

Το μεγαλύτερος πλήθος των ατυχημάτων συμβαίνει σε πλοία με χώρα κατασκευής την Ιαπωνία (59.71%) και την Νότια Κορέα (14.57%), γεγονός σχετικά αναμενόμενο, αφού η κατά μέσο όρο αναλογία των πλοίων του στόλου των PCCs με χώρα κατασκευής τις δύο παραπάνω είναι 68.06% και 14.73% αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες χώρες κατασκευής, που ακολουθούν, εμφανίζουν ποσοστό ατυχημάτων από 5.00% και κάτω, η κάθε μια, ενώ συνολικά αποτελούν το 25.72% των ατυχημάτων.

## 2.6 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σημαία (Flag)

Στο Σχήμα 11 εμφανίζεται η συγκεντρωτική κατανομή των ατυχημάτων των πλοίων PCCs ως προς την σημαία που έφεραν κατά το ατύχημα, σε διάταξη από την σημαία που εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό ατυχημάτων προς εκείνη με το μικρότερο ποσοστό.



Σχήμα 11: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σημαία

Τα πλοία PCCs με σημαία Panama έχουν την μεγαλύτερη συμμετοχή σε ατυχήματα με ποσοστό 31.71%. Ακολουθούν τα πλοία με σημαία Singapore, Norway και Italy με ποσοστά 9.14%, 8.86% και 8.29% αντίστοιχα. Πέραν αυτών, σημαντικά ποσοστά συμμετοχής σε ατυχήματα εμφανίζουν και τα πλοία με σημαίες Bahamas (5.43%), Liberia (5.43%), Malta (5.14%), Japan (4.86%) και United States of America (3.14%). Οι υπόλοιπες σημαίες που ακολουθούν, εμφανίζουν ποσοστά μικρότερα του 3% η κάθε μία, ενώ συνολικά αποτελούν το 18.03% των ατυχημάτων.

## 2.7 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την γεωγραφική ζώνη (Zone)

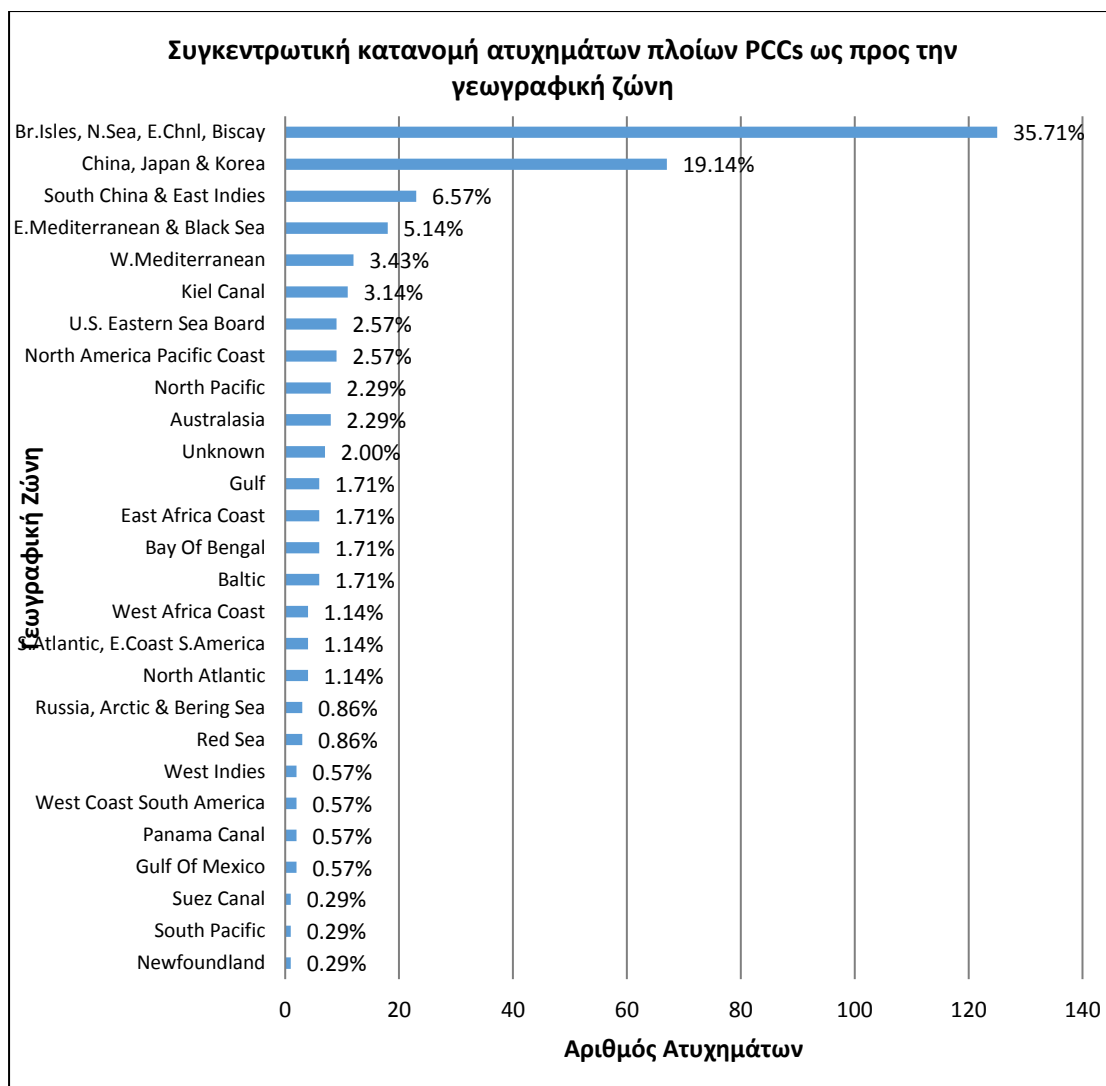
Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται το διάγραμμα της συγκεντρωτικής κατανομής των ατυχημάτων των πλοίων PCCs με κριτήριο την γεωγραφική ζώνη συμβάντος. Σημειώνεται ότι ορισμένες γεωγραφικές ζώνες αποτελούνται από πολλές γειτονικές θαλάσσιες εκτάσεις. Τα αποτελέσματα στο διάγραμμα έχουν διάταξη από την γεωγραφική ζώνη με την μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων προς εκείνη με την μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων.

Η κυρίαρχη γεωγραφική ζώνη ως προς το πλήθος των ατυχημάτων πλοίων PCCs είναι η “Br. Isles, N. Sea, E. Chnl, Biscay”, που συγκεντρώνει το 35.71% των ατυχημάτων. Γεωγραφικά αποτελεί μια μεγάλη θαλάσσια έκταση, η οποία περιλαμβάνει τον Βισκαϊκό κόλπο (Bay of Biscay) δυτικά της Γαλλίας, την θάλασσα της Μάγχης (English Channel) μεταξύ Γαλλίας και Αγγλίας, την Βόρεια Θάλασσα (North Sea), που εκτείνεται βόρεια της Ολλανδίας μεταξύ Αγγλίας και Νορβηγίας-Δανίας, καθώς και την θαλάσσια περιοχή γύρω από τα αγγλικά νησιά (British Isles), που βρίσκονται βοριοδυτικά της βρετανικής νήσου και στα οποία περιλαμβάνεται και η Ιρλανδία.

Η αμέσως επόμενη σημαντική γεωγραφική ζώνη ως προς το πλήθος των ατυχημάτων των PCCs είναι η “China, Japan και Korea” με ποσοστό 19.14%. Αυτή η ζώνη περιλαμβάνει τις θάλασσες “East China Sea”, “Yellow Sea”, “Sea of Japan” και την θάλασσα περιμετρικά της Ιαπωνίας.

Ακολουθεί η ζώνη “South China & East Indies”, όπου συμβαίνει το 6.57% των ατυχημάτων και αποτελείται από την θαλάσσια έκταση “South China Sea”, που βρίσκεται μεταξύ Βιετνάμ, Χόνγκ Κόνγκ και των νήσων Φιλιπίνες, και την θαλάσσια έκταση μεταξύ Ινδιών και Μαλαισίας, που περιλαμβάνει τον “Bay of Bengal” και την “Andaman Sea”.

Στην περιοχή της Μεσογείου το ποσοστό των ατυχημάτων των πλοίων PCCs είναι σημαντικά μικρότερο από τις προηγούμενες που αναφέρθηκαν και ειδικότερα, στην Δυτική Μεσόγειο θάλασσα (West Mediterranean Sea) είναι 3.43%, ενώ στην Ανατολική Μεσόγειο και Μαύρη θάλασσα (East Mediterranean & Black Sea) είναι 5.14%.



Σχήμα 12: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την γεωγραφική ζώνη

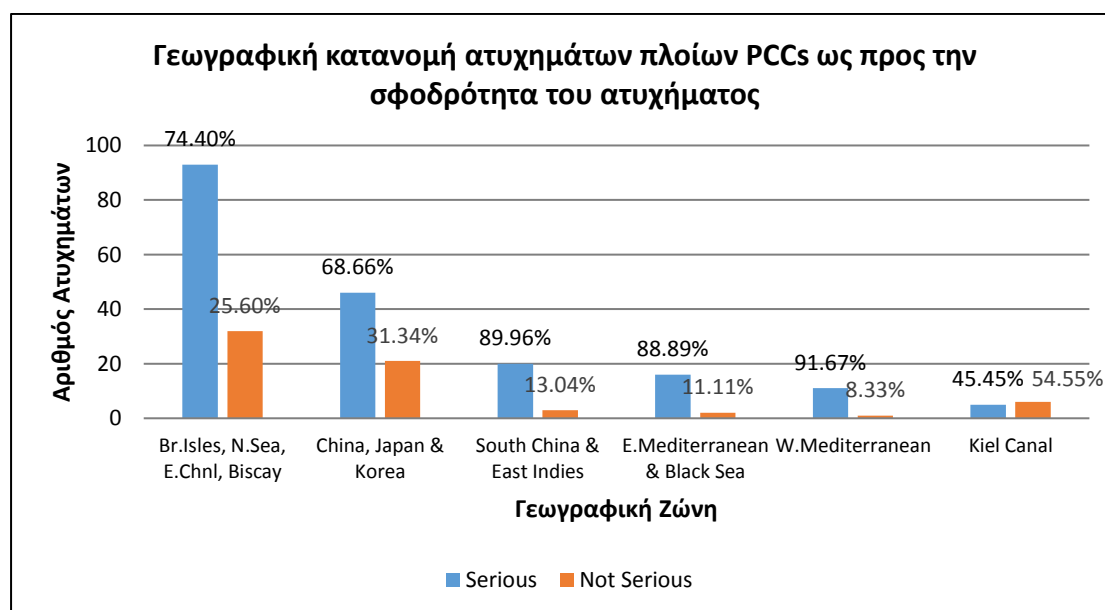
Στην συνέχεια είναι η γεωγραφική ζώνη του “Kiel Canal”, όπου το ποσοστό των ατυχημάτων των PCCs ανέρχεται στο 3.14%. Το “Kiel Canal” είναι μια τεχνητή θαλάσσια οδός (κανάλι) γλυκού νερού μήκους 98.7 χιλιομέτρων και πλάτους, που κυμαίνεται μεταξύ 102.0m και 214.0m, η οποία συνδέει την Βόρεια Θάλασσα, από την πόλη Brunsbuttel, με την Βαλτική θάλασσα, από την πόλη Kiel-Holtenau και διέρχεται μέσω του γερμανικού κρατιδίου Schleswig-Holstein. Παλιότερα το κανάλι ήταν γνωστό με την ονομασία “Kaiser-Wilhelm-Kanal”. Μέσω αυτού του καναλιού, τα πλοία γλυτώνουν περίπου 250 ναυτικά μίλια ταξιδιού, αφού δεν κάνουν τον περίπλοο της χερσονήσου Γιουτλάνδης (Jutland Peninsula).

Στις υπόλοιπες γεωγραφικές ζώνες που αναφέρονται, το ποσοστό των ατυχημάτων είναι κάτω από το 3% και όλες μαζί συγκεντρώνουν το 26.85% των ατυχημάτων. Επίσης, υπήρχαν ατυχήματα για τα οποία από τα διαθέσιμα δεδομένα δεν προσδιορίζεται η γεωγραφική ζώνη. Αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 12 με το όνομα “Unknown” και αποτελούν το 2.00% των καταγεγραμμένων ατυχημάτων πλοίων PCCs.

Για τα ατυχήματα που συνέβησαν σε όλες τις γεωγραφικές ζώνες, τα διαθέσιμα δεδομένα, από την Sea-Web, δεν παρέχουν περισσότερες πληροφορίες πέραν του γεγονότος ότι συνέβει το ατύχημα. Επίσης, στις γεωγραφικές ζώνες, που αποτελούνται από πολλές θαλάσσιες εκτάσεις, δεν υπάρχει η πληροφορία σε ποιά συγκεκριμένα από αυτές τις εκτάσεις συνέβει το ατύχημα. Έτσι, δεν είναι δυνατόν να γίνει ανάλυση των ατυχημάτων σε σχέση με ενδιαφέροντες παράγοντες, όπως είναι για παράδειγμα η μελέτη των ατυχημάτων σε σχέση με την πυκνότητα της κυκλοφορίας των πλοίων ανά γεωγραφική ζώνη, ή τα ατυχήματα σε σχέση με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν στην γεωγραφική ζώνη.

Στην συνέχεια γίνεται ανάλυση των ατυχημάτων κάθε γεωγραφικής ζώνης ως προς την σφοδρότητα (Severity) και τον τύπο του ατυχήματος (Casualty Type). Η ανάλυση θα περιοριστεί στις έξι πρώτες γεωγραφικές ζώνες του Σχήματος 12, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικό αριθμό ατυχημάτων πλοίων PCCs και είναι οι εξής: “Br. Isles, N. Sea, E. Chnl, Biscay”, “China, Japan και Korea”, “South China & East Indies”, “East Mediterranean & Black Sea”, “West Mediterranean Sea” και “Kiel Canal”.

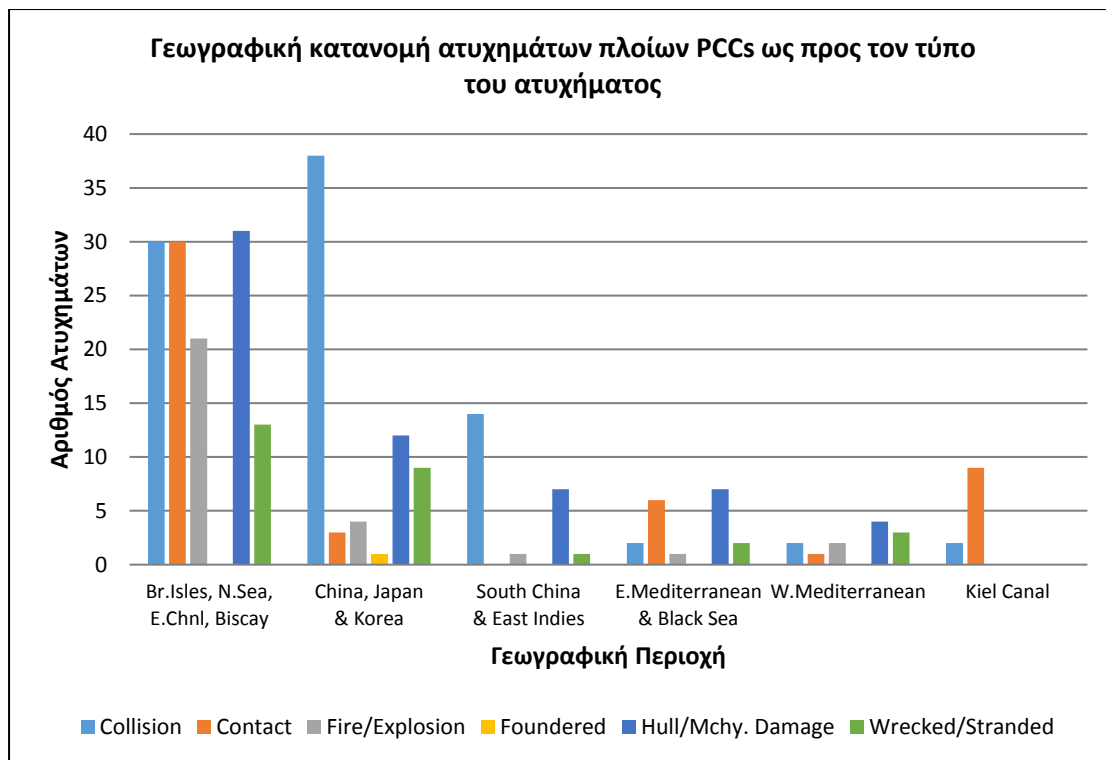
Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η συγκεντρωτική κατανομή των ατυχημάτων των πλοίων PCCs ως προς την σφοδρότητα του ατυχήματος για τις γεωγραφικές ζώνες που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 13: Γεωγραφική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την σφοδρότητα του ατυχήματος

Όπως προκύπτει, στις περισσότερες γεωγραφικές ζώνες υπερτερούν τα Serious ατυχήματα έναντι των Not Serious, εκτός από την ζώνη “Kiel Canal”, όπου η κατανομή είναι σχεδόν ισοδύναμη.

Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η κατανομή των ατυχημάτων των πλοίων PCCs κάθε γεωγραφικής ζώνης ως προς τον τύπο του ατυχήματος.



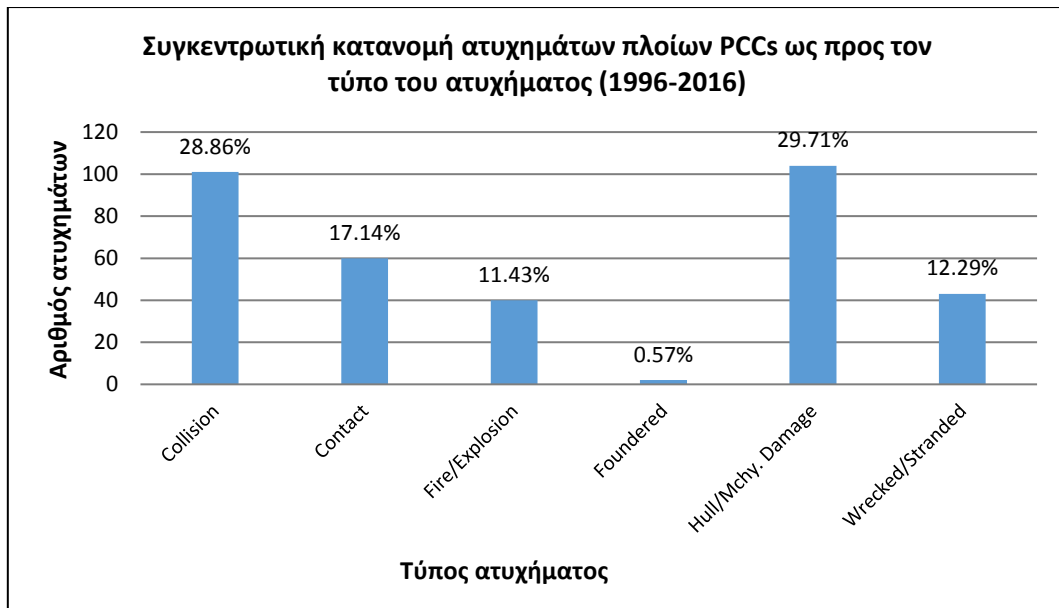
Σχήμα 14: Γεωγραφική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο του ατυχήματος

## 2.8 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο του ατυχήματος (Casualty Type)

Τα ατυχήματα των PCCs διακρίνονται σε τύπους ατυχημάτων με βασικό κριτήριο την πρωταρχική αιτία που τα προκάλεσε, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 1.5, όπου δόθηκαν και οι αντίστοιχοι ορισμοί.

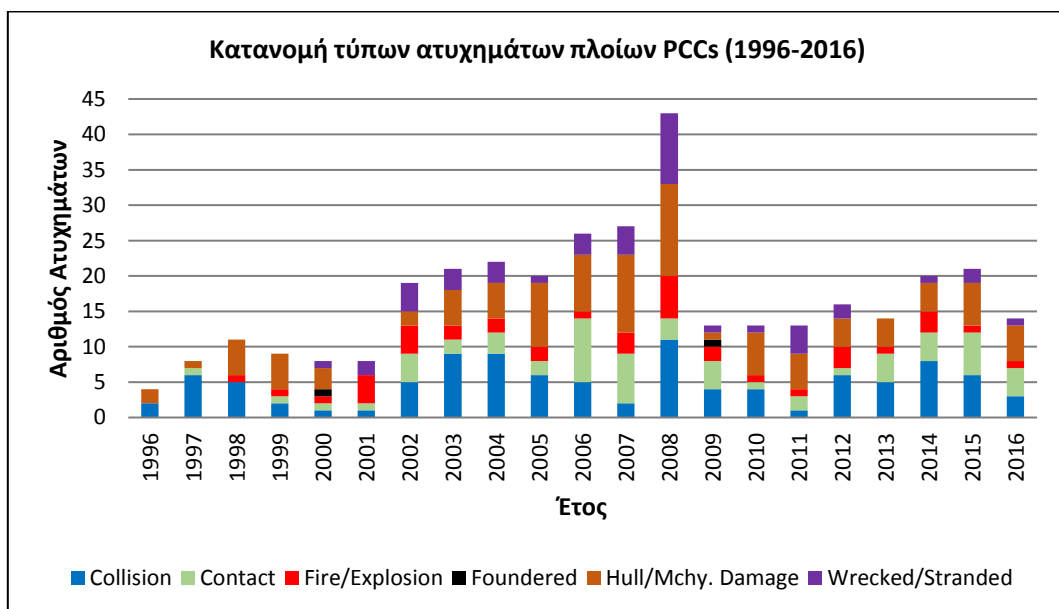
Η συγκεντρωτική κατανομή των ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο ατυχήματος, για το χρονικό διάστημα 1996-2016, παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 15.

Το μεγαλύτερο μέρος των ατυχημάτων των PCCs είναι τύπου Hull/Mchy. Damage (29.71%) και Collision (28.86%). Επίσης, μεγάλο ποσοστό εμφανίζουν τα ατυχήματα τύπου Contact (17.14%) και ακολουθούν τα ατυχήματα Wrecked/Stranded (12.29%) και Fire/Explosion (11.43%). Οι περιπτώσεις όπου αιτία ήταν η βύθιση του πλοίου (Foundered), αποτελούν μόλις το 0.57% του συνόλου των ατυχημάτων των PCCs κατά την χρονική περίοδο 1996-2016.



Σχήμα 15: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο του ατυχήματος (1996-2016)

Η κατανομή κάθε τύπου ατυχήματος των PCCs ανά έτος, για το χρονικό διάστημα 1996-2016, παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 16. Ο ετήσιος μέσος όρος κάθε τύπου ατυχήματος σε αυτό το χρονικό διάστημα είναι: Collision (4.8), Contact (2.9), Fire/Explosion (1.9), Foundered (0.1), Hull/Mchy. Damage (4.9) και Wrecked/Stranded (2.1).

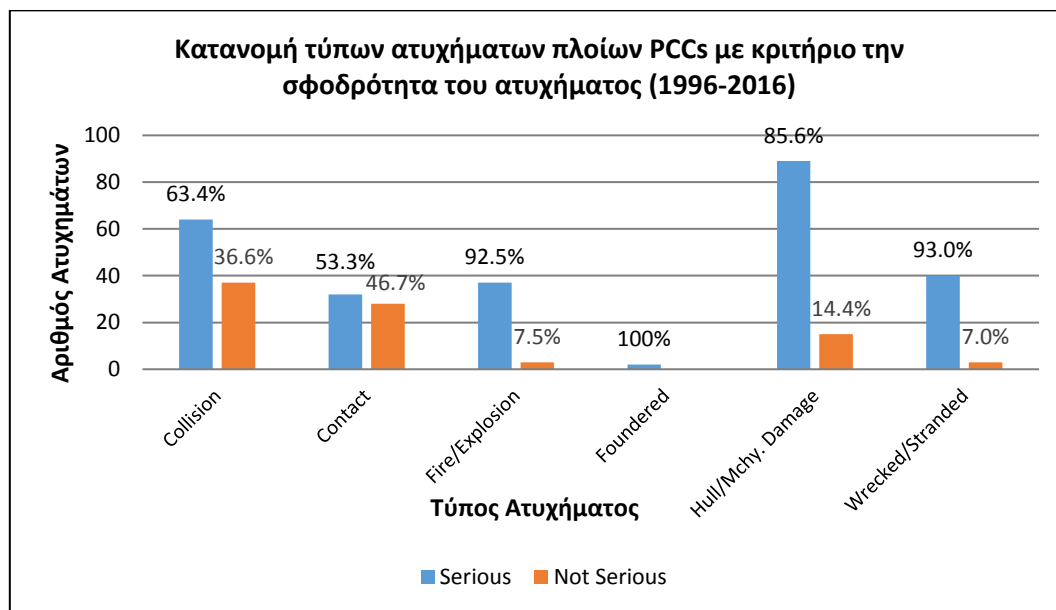


Σχήμα 16: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016)

Στο επόμενο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η κατανομή των Serious και Not Serious ατυχημάτων σε κάθε τύπο ατυχήματος, κατά την χρονική περίοδο 1996-2016. Στο διάγραμμα αυτό, τα



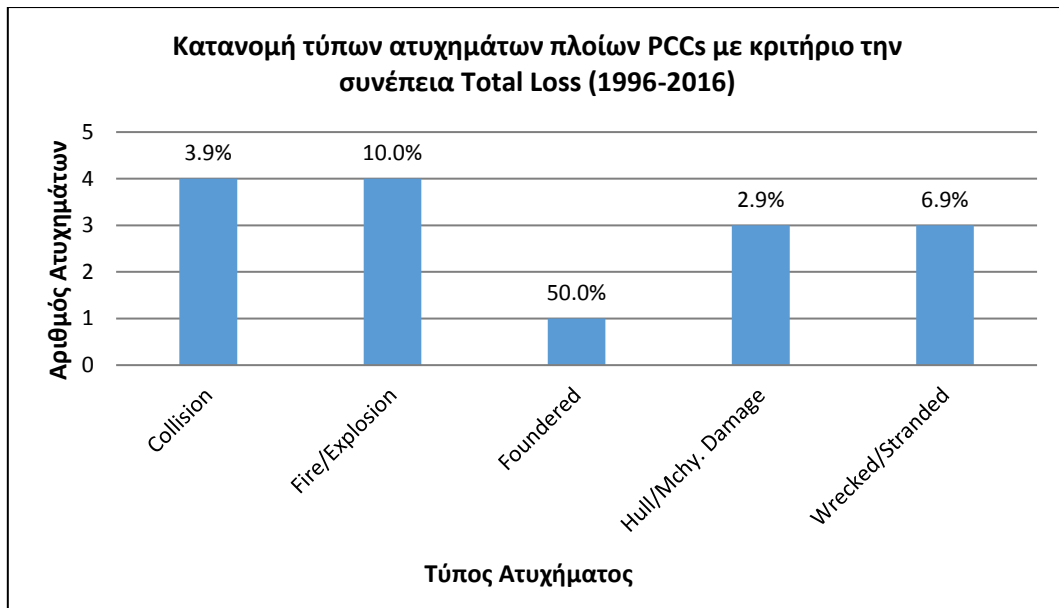
αναγραφόμενα ποσοστά, υπολογίζονται ως προς το πλήθος των ατυχημάτων που ανήκουν στον ίδιο τύπο ατυχήματος. Η πλειοψηφία των ατυχημάτων κάθε τύπου κατά το χρονικό διάστημα της μελέτης, ήταν Serious ατυχήματα. Ειδικότερα, το ποσοστό των Serious ατυχημάτων σε κάθε τύπο, κατά φθίνουσα σειρά, είναι: Foundered (100%), Wrecked/Stranded (93.0%), Fire/Explosion (92.5%), Hull/Mchgy Damage (85.6%) και Collision (63.4%). Τα ατυχήματα τύπου Contact σχεδόν ισομοιράζονται μεταξύ Serious (53.3%) και Not Serious (46.7%). Παρά το γεγονός ότι τα πλοία PCCs έχουν κατά κανόνα μικρό έμφορτο βύθισμα, αξίζει να σημειωθεί ότι ατυχήματα του τύπου Wrecked/Stranded ήταν σοβαρά κατά 93.0%.



Σχήμα 17: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs με κριτήριο την σφοδρότητα του ατυχήματος (1996-2016)

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται ο αριθμός των Serious ατυχημάτων από κάθε τύπο, που είχε ως συνέπεια την ολική απώλεια του πλοίου (Total Loss). Γενικά, όλες αυτές οι περιπτώσεις αποτελούν το 4.29% του συνόλου των ατυχημάτων, ή το 5.68% των Serious ατυχημάτων, για την χρονική περίοδο που εξετάζεται. Τα ποσοστά που εμφανίζονται στο σχήμα υπολογίζονται σε σχέση με το συνολικό πλήθος των ατυχημάτων ίδιου τύπου.

Από την κατανομή του Σχήματος 18, προκύπτει ότι όλοι οι τύποι ατυχημάτων των PCCs μπορεί να έχουν ως συνέπεια την ολική απώλεια του πλοίου και ιδιαίτερα τα ατυχήματα τύπου Foundered, Fire/Explosion και Wrecked/Stranded. Όπως ήταν και αναμενόμενο, κανένα ατύχημα τύπου Contact δεν είχε ως συνέπεια ολική απώλεια πλοίου και επομένως δεν εμφανίζεται στην κατανομή.



Σχήμα 18: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs με κριτήριο την συνέπεια Total Loss (1996-2016)

## 2.9 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την χωρητικότητα οχημάτων

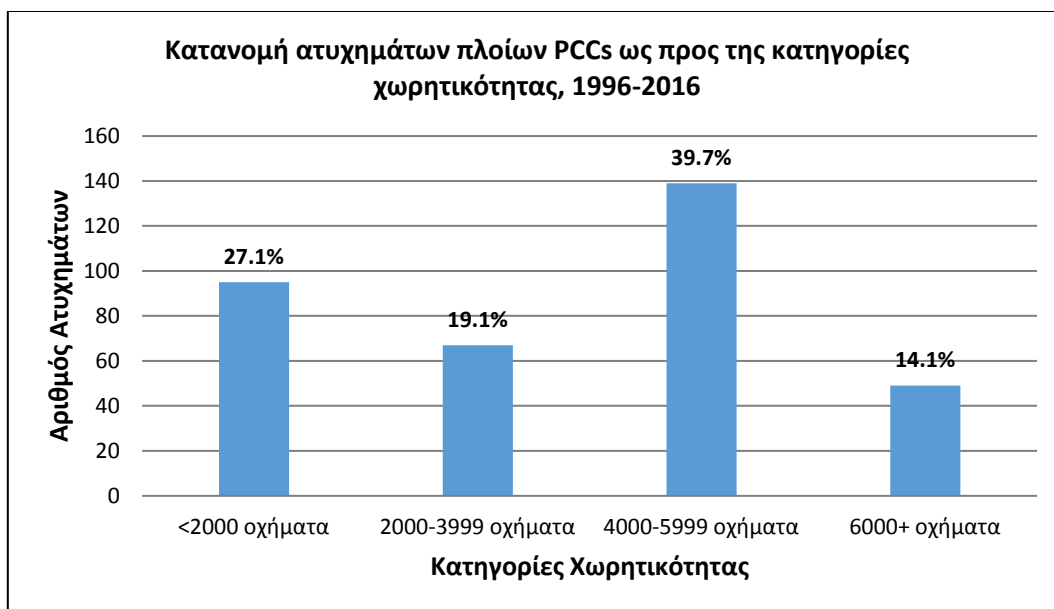
Τα πλοία PCCs διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες χωρητικότητας οχημάτων, σύμφωνα με την βάση δεδομένων Clarksons. Οι κατηγορίες αυτές διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον αριθμό των οχημάτων που έχει την δυνατότητα να μεταφέρει το πλοίο, χωρίς να γίνεται αναφορά στο είδος ή στις διαστάσεις των οχημάτων αυτών.

Αναλυτικότερα, οι κατηγορίες χωρητικότητας των πλοίων PCCs, είναι:

- χωρητικότητα μικρότερη των 2000 οχημάτων, ή “<2000”.
- χωρητικότητα ίση ή μεγαλύτερη των 2000 οχημάτων και μικρότερη των 4000 οχημάτων, ή “2000-3999”.
- χωρητικότητα ίση ή μεγαλύτερη των 4000 οχημάτων και μικρότερη των 6000 οχημάτων, ή “4000-5999”.
- χωρητικότητα ίση ή μεγαλύτερη των 6000 οχημάτων, ή “6000+”.

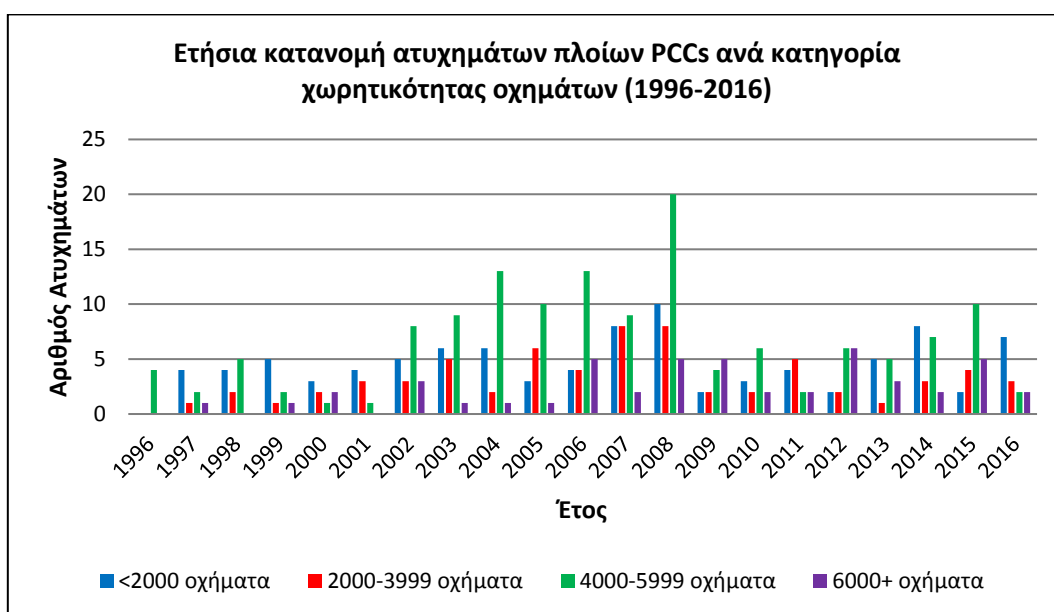
Η κατανομή ατυχημάτων των PCCs ως προς τις κατηγορίες χωρητικότητας κατά το χρονικό διάστημα 1996-2016, παρουσιάζεται στο Σχήμα 19 που ακολουθεί. Παρατηρείται ότι ο μεγαλύτερος αριθμός ατυχημάτων (39.7%) συνέβη στα πλοία χωρητικότητας “4000-5999” οχημάτων. Ακολουθούν τα πλοία χωρητικότητας “<2000” (27.1%) και στην συνέχεια τα πλοία χωρητικότητας “2000-3999” (19.1%). Ο μικρότερος αριθμός ατυχημάτων (14.1%) συνέβη σε πλοία χωρητικότητας “6000+”.

Από το Κεφάλαιο 3.2, όπου γίνεται η ανάλυση του στόλου των πλοίων PCCs ως προς τις κατηγορίες χωρητικότητας, παρατηρείται ότι μέχρι και το έτος 2012, η πολυπληθέστερη κατηγορία οχημάτων πλοίων PCCs ήταν η “4000-5999”, ενώ μετά το 2012, επικρατούν τα πλοία χωρητικότητας «6000+”. Επίσης, αριθμητικά, τα πλοία χωρητικότητας “<2000” υπερτερούν των πλοίων “2000-3999”. Επομένως, η κατανομή των ατυχημάτων του Σχήματος 19 ως προς τις κατηγορίες χωρητικότητας είναι σχετικά αναμενόμενη.



Σχήμα 19: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς της κατηγορίες χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016

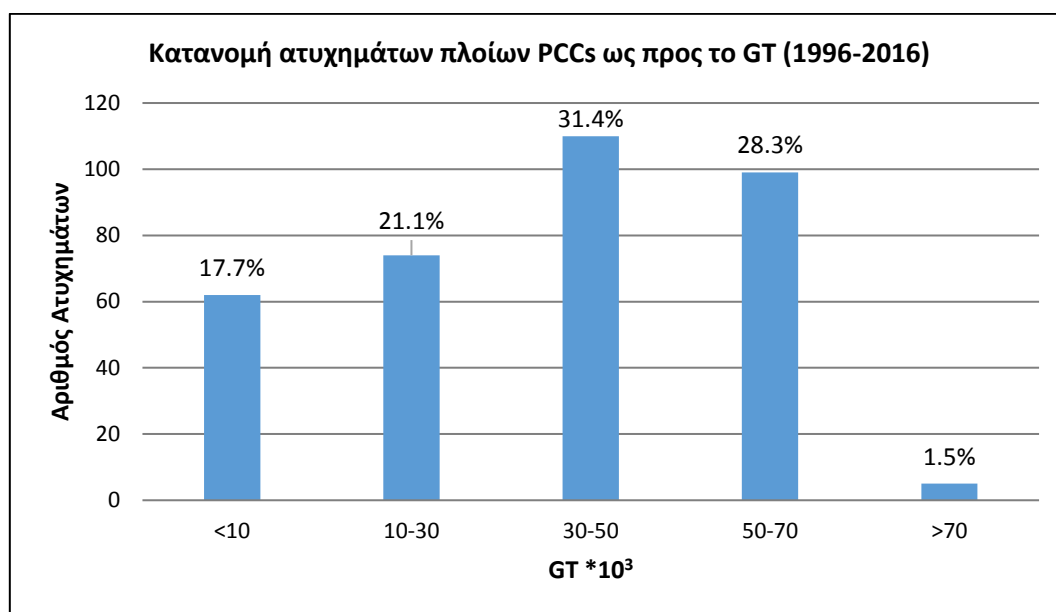
Η ετήσια κατανομή ατυχημάτων των πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων, για την χρονική περίοδο 1996-2016, παρουσιάζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016

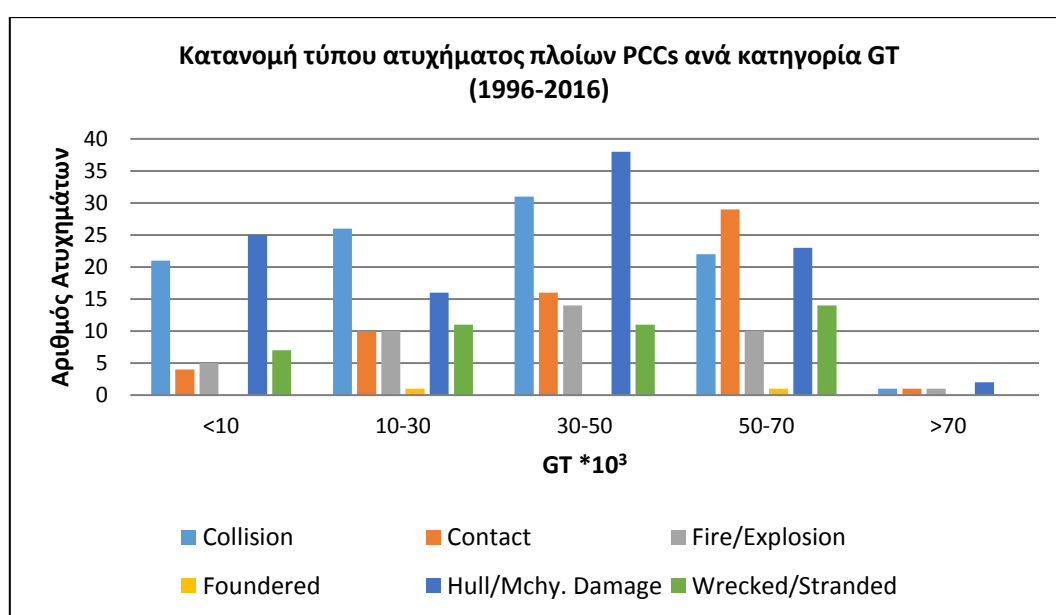
## 2.10 Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το Gross Tonnage

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται η κατανομή των ατυχημάτων των πλοίων PCCs ως προς πέντε κατηγορίες Gross Tonnage (GT). Από τους υψηλότερους αριθμούς ατυχημάτων εμφανίζουν οι κατηγορίες 30000-50000 GT (31.4%) και 50000-70000 GT (28.3%), ενώ τον μικρότερο αριθμό έχει η κατηγορία >70000 GT (1.5%).



Σχήμα 21: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το GT (1996-2016)

Η κατανομή του τύπου ατυχήματος ανά κατηγορία GT δίνεται στο Σχήμα 22.



Σχήμα 22: Κατανομή τύπου ατυχήματος πλοίων PCCs ανά κατηγορία GT (1996-2016)

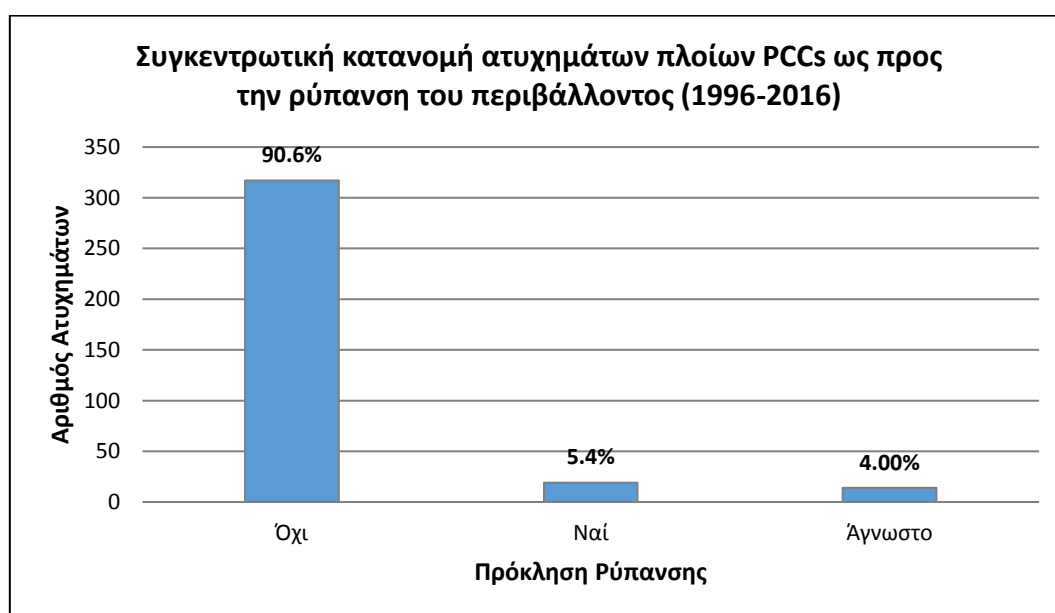
Οι κυρίαρχοι τύποι ατυχημάτων ως προς τις κατηγορίες Gross Tonnage (GT) είναι:

- Collision: “<10000” (33.8%), “10000-30000” (35.1%) και “30000-50000” (28.1%)
- Hull/Machinery Damage: “<10000” (40.0%), “30000-50000” (34.5%) και “50000-70000” (34.5%)
- Contact: “50000-70000” (29%)

## 2.11 Συνέπειες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το περιβάλλον (Pollution)

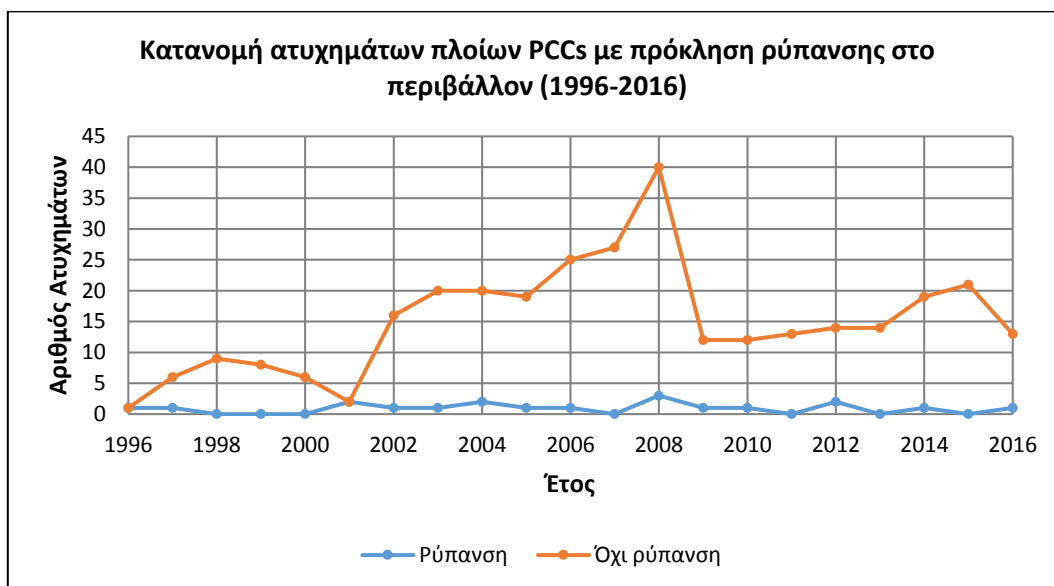
Η ρύπανση του περιβάλλοντος μετά από ένα ναυτικό ατύχημα είναι μια συνέπεια που συμβαίνει συχνά και έχει πολλές φορές, ανάλογα με την έκτασή της, δυσάρεστες επιπτώσεις στις τοπικές κοινωνίες. Τα διαθέσιμα στοιχεία της βάσης δεδομένων Sea-Web, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, πληροφορούν μόνο για την πρόκληση ή όχι ρύπανσης μετά το ατύχημα.

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ατυχήματα των PCCs ως προς την πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον κατά την χρονική περίοδο 1996-2016. Όπως προκύπτει, από το σύνολο των ατυχημάτων, μόνο το 5.4% προκάλεσε ρύπανση, ενώ το 4.0% ήταν άγνωστο ως προς το αποτέλεσμα της ρύπανσης, λόγω απουσίας διαθέσιμων στοιχείων από την βάση δεδομένων, και αποτυπώνεται στο Σχήμα 23 ως «Άγνωστο».



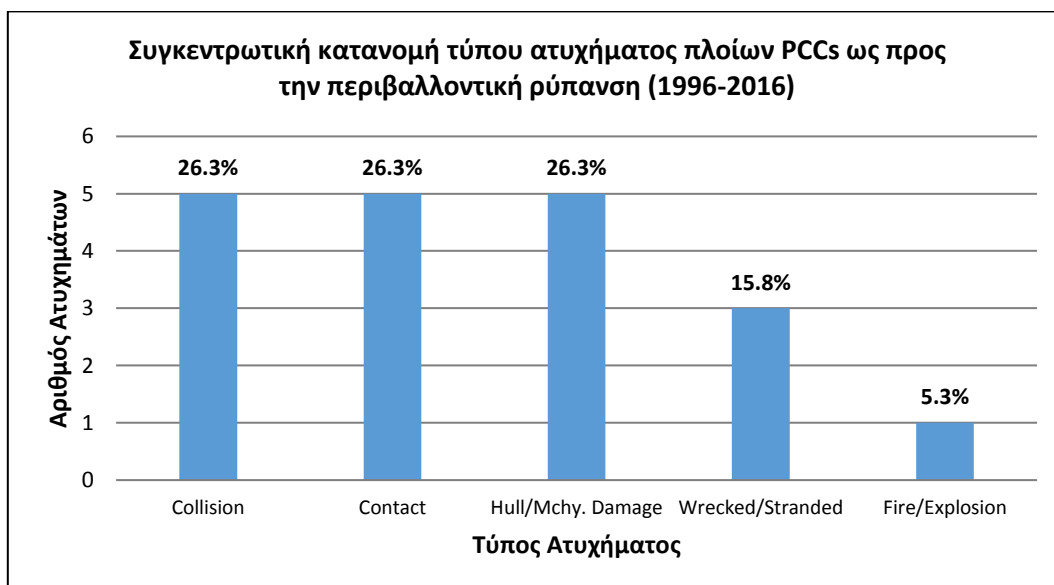
Σχήμα 23: Συγκεντρωτική κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ρύπανση του περιβάλλοντος (1996-2016)

Η κατανομή των ατυχημάτων των πλοίων PCCs, που προκάλεσαν περιβαλλοντική ρύπανση, κατά την χρονική περίοδο 1996-2016, παρουσιάζεται στο επόμενο Σχήμα 24. Ο ετήσιος μέσος όρος των ατυχημάτων με πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον είναι 0.90 ατυχήματα ανά έτος.



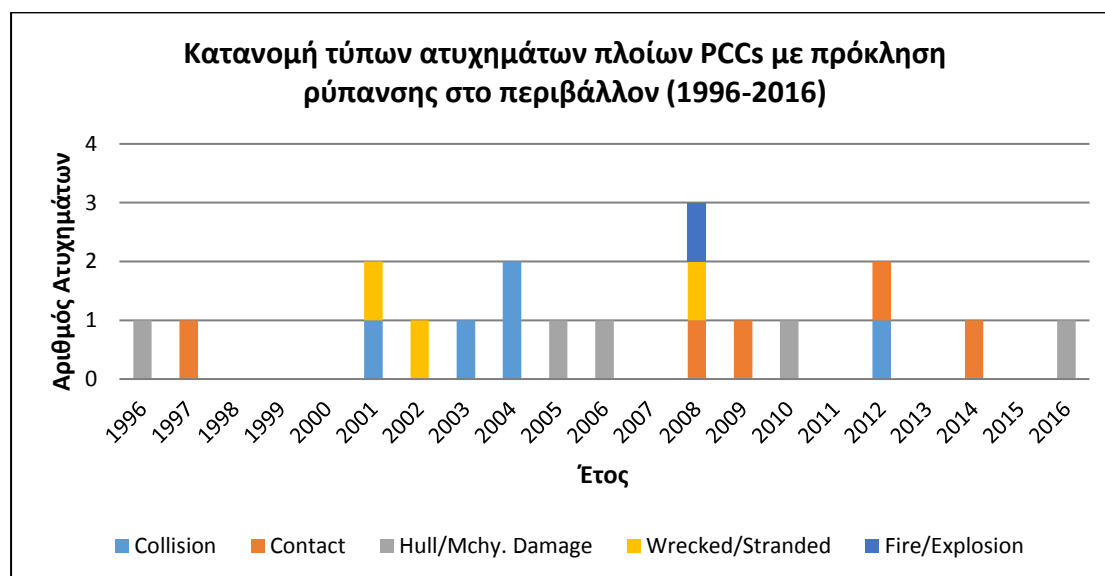
Σχήμα 24: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs με πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον (1996-2016)

Στο επόμενο Σχήμα 25, παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της πρόκλησης ρύπανσης και του τύπου του ατυχήματος. Όλα τα ατυχήματα των PCCs, που συνέβησαν την χρονική περίοδο 1996-2016 και είχαν ως συνέπεια την πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον, ταξινομήθηκαν ως προς τον τύπο ατυχήματος και παρουσιάζονται συγκεντρωτικά. Οι τρεις επικρατέστεροι τύποι ατυχημάτων, ως προς την πρόκληση ρύπανσης, είναι οι εξής: Collision (26.3%), Contact (26.3%) και Hull/Mchy. Damage (26.3%). Ακολουθεί ο τύπος ατυχήματος Wrecked/Stranded (15.8%) και τέλος ο τύπος Fire/Explosion (5.3%).



Σχήμα 25: Συγκεντρωτική κατανομή τύπου ατυχήματος πλοίων PCCs ως προς την περιβαλλοντική ρύπανση (1996-2016)

Στο Σχήμα 26 παρουσιάζεται η κατανομή των τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs με πρόκληση ρύπανσης, για την χρονική περίοδο 1996-2016.



Σχήμα 26: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs με πρόκληση ρύπανσης στο περιβάλλον (1996-2016)

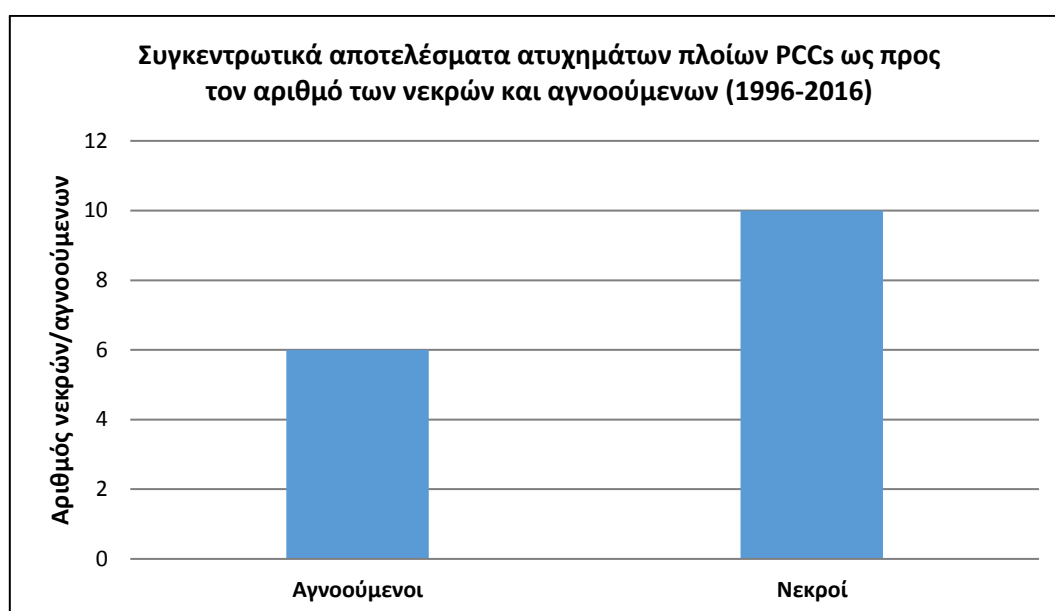
Γενικότερα σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικές με την έκταση και το είδος της ρύπανσης που προκλήθηκε από τα ατυχήματα των πλοίων PCCs. Έτσι, η μελέτη περιορίζεται μόνο στην παρουσίαση των στατιστικών μεγεθών και δεν μπορεί να γίνει με ασφάλεια σύγκριση επικινδυνότητας μεταξύ των τύπων ατυχημάτων ως προς την πρόκληση ρύπανσης.

Τα μόνα ασφαλή συμπεράσματα, σύμφωνα πάντα με τα διαθέσιμα στοιχεία, είναι ότι τα ατυχήματα των πλοίων PCCs, κατά την διάρκεια των 21 ετών της μελέτης (1996-2016), προκάλεσαν σε μικρό βαθμό ρύπανση στο περιβάλλον, 19 στα 350 ατυχήματα ή 5.43%, και ότι οι περιπτώσεις αυτές προέρχονται κυρίως από ατυχήματα του τύπου Collision, Contact και Hull/Mchy. Damage.

## 2.12 Συνέπειες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς το ανθρώπινο δυναμικό (Killed, Missing)

Τα ναυτικά ατυχήματα δυστυχώς έχουν πολλές φορές δυσάρεστες συνέπειες για το πλήρωμα των πλοίων, οι οποίες περιλαμβάνουν, εκτός από τραυματισμούς, νεκρούς (Killed) και αγνοούμενους (Missing). Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς αυτές τις συνέπειες, σύμφωνα με τις διαθέσιμες πληροφορίες της βάσης δεδομένων Sea-Web, οι οποίες, παρά το γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες, αφού αφορούν ανθρώπινο δυναμικό, δεν ήταν δυνατό να διασταυρωθούν μέσω άλλων πηγών.

Στο Σχήμα 27, παρουσιάζεται συγκεντρωτικά ο αριθμός των νεκρών και των αγνοούμενων από ατυχήματα πλοίων PCCs, για την χρονική περίοδο 1996-2016. Συνολικά είναι έξι (6) αγνοούμενοι και δέκα (10) νεκροί.



Σχήμα 27: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον αριθμό των νεκρών και αγνοούμενων (1996-2016)

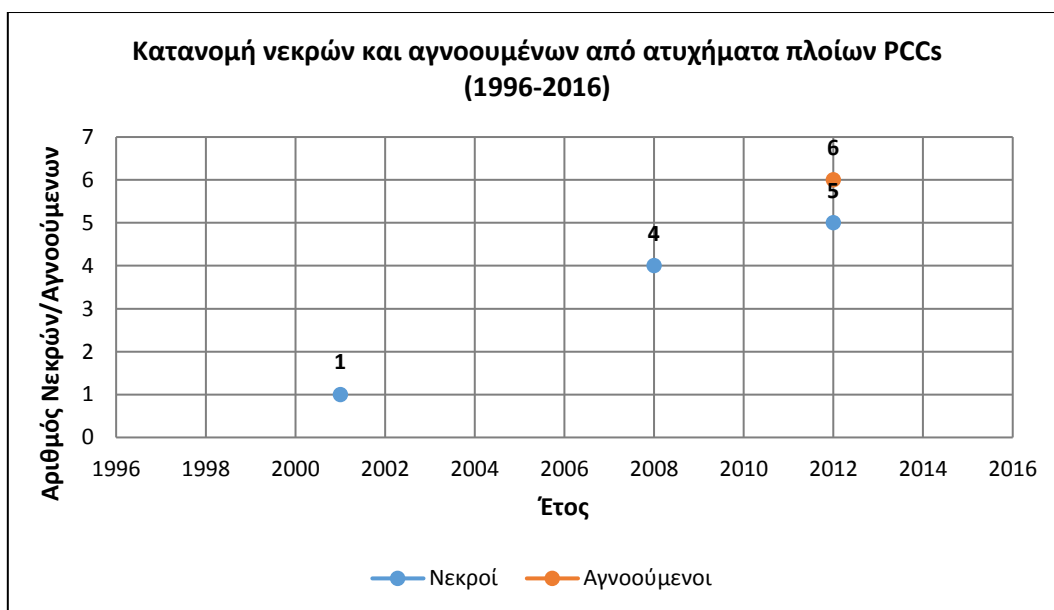
Η κατανομή των νεκρών και των αγνοουμένων στην ίδια χρονική περίοδο παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 28. Αριθμητικά τα ατυχήματα των πλοίων PCCs, που εμπλέκονται, είναι τέσσερα (4), χαρακτηρίζονται ως σοβαρά (Serious) και συμβαίνουν τα έτη 2001, 2008 και 2012.

Το πρώτο ατύχημα συνέβη το έτος 2001, με έναν (1) νεκρό, είναι τύπου Fire/Explosion, και συνέβη στην ζώνη “Br.Isles, N.Sea, E.Chnl, Biscay” σε πλοίο ηλικίας 18 ετών, το οποίο αποσύρθηκε το 2014.



Το έτος 2008, έγιναν δύο ατυχήματα με έναν και τρεις νεκρούς αντίστοιχα, τα οποία ήταν και τα δύο τύπου Fire/Explosion. Το πρώτο ατύχημα συνέβει στην γεωγραφική ζώνη “China, Japan & Korea” σε πλοίο 22 ετών και το δεύτερο ατύχημα συνέβει στην ζώνη “S.Atlantic, E.Coast S.America” σε πλοίο 27 ετών.

Τέλος, το έτος 2012, συνέβει ένα ατύχημα πλοίου PCC με συνέπειες έξι (6) αγνοούμενους και πέντε (5) νεκρούς. Το συγκεκριμένο ατύχημα ήταν τύπου Collision και συνέβει σε σχετικά νέο πλοίο, ηλικίας 5 ετών. Οι συνέπειες για το πλοίο ήταν Total Loss και η γεωγραφική ζώνη του ατυχήματος η “ Br.Isles, N.Sea, E.Chnl, Biscay”.



Σχήμα 28: Κατανομή νεκρών και αγνοουμένων από ατυχήματα πλοίων PCCs (1996-2016)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs

### 3.1 Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs

Ο αριθμός των ατυχημάτων των πλοίων PCCs, που αντιστοιχεί σε κάθε έτος της χρονικής περιόδου 1996-2016, παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 1.

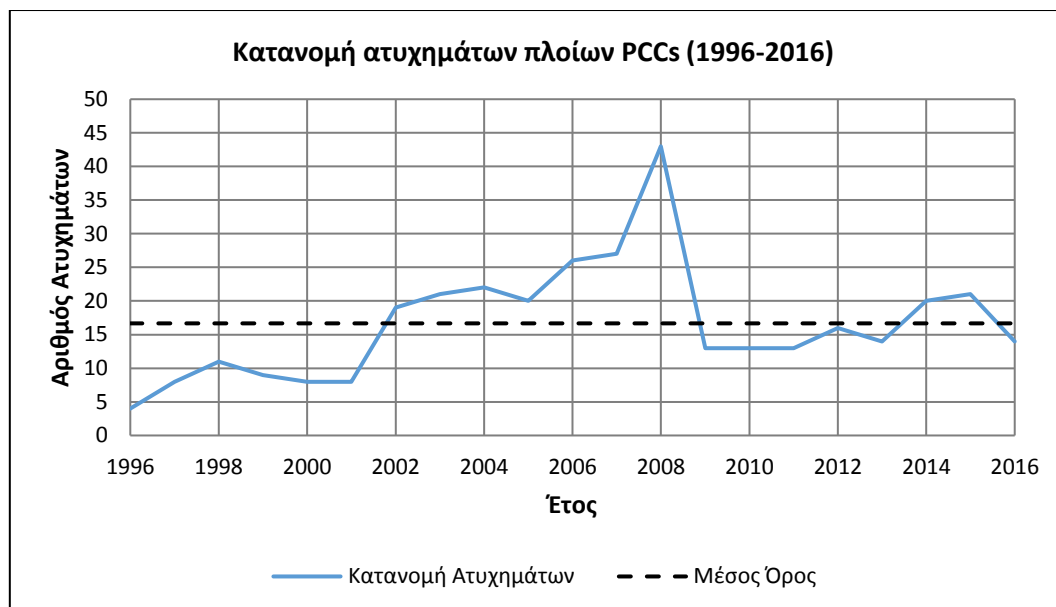
Πίνακας 1: Αριθμός ατυχημάτων πλοίων PCCs κατά έτος (1996-2016)

Έτος	Ατυχήματα	Ποσοστό
1996	4	1.14%
1997	8	2.29%
1998	11	3.14%
1999	9	2.57%
2000	8	2.29%
2001	8	2.29%
2002	19	5.43%
2003	21	6.00%
2004	22	6.29%
2005	20	5.71%
2006	26	7.43%
2007	27	7.71%
2008	43	12.29%
2009	13	3.71%
2010	13	3.71%
2011	13	3.71%
2012	16	4.57%
2013	14	4.00%
2014	20	5.71%
2015	21	6.00%
2016	14	4.00%
Σύνολο	350	100.00%

Ο μέσος όρος των ατυχημάτων είναι 16.67 ατυχήματα πλοίων PCCs ανά έτος. Ο μικρότερος αριθμός ατυχημάτων (4) συμβαίνει το έτος 1996 και ο μεγαλύτερος αριθμός ατυχημάτων (43) συμβαίνει το έτος 2008. Η διακύμανση (Variance) των ατυχημάτων είναι 75.63, ενώ η τυπική απόκλιση (Standard Deviation) είναι 8.69.

Η στήλη με τίτλο «Ποσοστό» στον Πίνακα 1 δίνει την επί τις εκατό ποσοστιαία αναλογία του αριθμού των ατυχημάτων κάθε έτους, ως προς τον συνολικό αριθμό των ατυχημάτων που συνέβησαν κατά την περίοδο της μελέτης (1996-2016).

Στο Σχήμα 29 απεικονίζεται η κατανομή των ατυχημάτων για την περίοδο 1996-2016 και είναι ίδια κατανομή με εκείνη του Σχήματος 2 του Κεφαλαίου 2.2. Επαναλαμβάνεται και εδώ για λόγους πληρότητας.



Σχήμα 29: Κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs (1996-2016)

Για τον υπολογισμό των συχνοτήτων ατυχημάτων απαιτείται να προσδιοριστεί ο στόλος των πλοίων PCCs (Fleet at Risk) για κάθε έτος. Αυτό γίνεται μέσω των βάσεων δεδομένων Sea-Web και Clarksons.

Στον επόμενο Πίνακα 2 παρουσιάζεται ο αριθμός των πλοίων του στόλου των PCCs, όπως προκύπτει από τις δύο βάσεις δεδομένων, για κάθε έτος της χρονικής περιόδου (1996-2016).

Στην τελευταία στήλη του Πίνακα 2, με τίτλο «Διαφορά Clarksons από Sea-Web (%)» υπολογίζεται, σε ποσοστό επί τις εκατό, η διαφορά του στόλου των PCCs μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων. Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι η Clarksons δίνει πιο συντηρητικούς (μικρότερους) ετήσιους αριθμούς πλοίων για τον στόλο των PCCs.

Η μικρότερη διαφορά (1.38%) μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων εμφανίζεται στο έτος 2009, ενώ η μεγαλύτερη διαφορά (18.30%) στο έτος 1999. Γενικά παρατηρείται ότι, ξεκινώντας από το έτος 1996 και πλησιάζοντας προς το έτος 2016, η διαφορά μεταξύ Clarksons και Sea-Web ελαττώνεται σημαντικά.

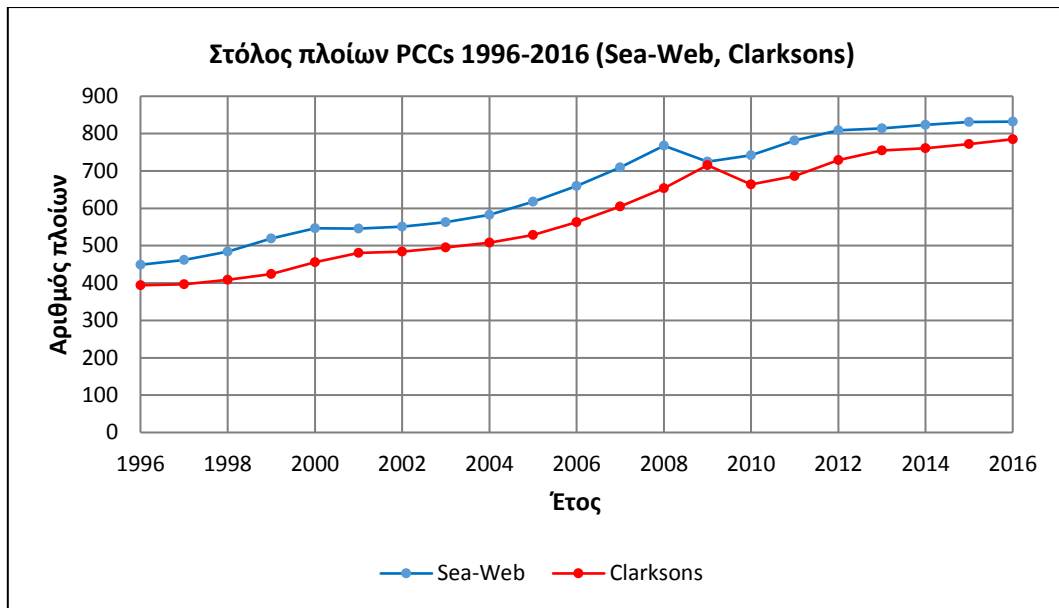
Πίνακας 2: Στόλος πλοίων PCCs 1996-2016 (Sea-Web/Clarksons)

ΕΤΟΣ	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ		
	Sea-Web	Clarksons	Διαφορά Clarksons από Sea-Web (%)
1996	449	394	-12.25%
1997	462	397	-14.07%
1998	484	409	-15.50%
1999	519	424	-18.30%
2000	547	456	-16.64%
2001	546	481	-11.90%
2002	551	484	-12.16%
2003	563	495	-12.08%
2004	583	508	-12.86%
2005	618	529	-14.40%
2006	660	563	-14.70%
2007	709	605	-14.67%
2008	768	654	-14.84%
2009	725	715	-1.38%
2010	742	664	-10.51%
2011	781	686	-12.16%
2012	809	729	-9.89%
2013	814	755	-7.25%
2014	823	761	-7.53%
2015	831	772	-7.10%
2016	832	785	-5.65%

Στο επόμενο Σχήμα 30 παρουσιάζονται οι δύο στόλοι των PCCs συναρτήσει των ετών. Ο στόλος πλοίων PCCs της Sea-Web αντιστοιχεί στην συνεχή μπλέ γραμμή, ενώ ο στόλος πλοίων PCCs της Clarksons στην συνεχή κόκκινη γραμμή.

Από το Σχήμα 30, διαπιστώνεται ότι ο στόλος των πλοίων PCCs παρουσιάζει συνεχή αύξηση σε όλη την χρονική περίοδο 1996-2016. Σύμφωνα με την Sea-Web ο στόλος αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό κατά μέσο όρο 18.24 νέα πλοία, ενώ σύμφωνα με την Clarksons είναι 18.62 νέα πλοία. Γενικά, το συμπέρασμα είναι ότι οι δύο βάσεις δεδομένων, παρά τις αριθμητικές διαφορές που παρουσιάζουν, αποδίδουν ποιοτικά την ίδια συμπεριφορά στην εξέλιξη του στόλου των PCCs.

Ένα σημαντικό γεγονός, το οποίο καταγράφεται και από τις δύο βάσεις δεδομένων, είναι μια απότομη μείωση του αριθμού των πλοίων του στόλου των PCCs, που συμβαίνει μία μόνο χρονιά στην περίοδο 1996-2016. Σύμφωνα με την Sea-Web, αυτό συμβαίνει το έτος 2009 και η μείωση του στόλου που παρατηρείται είναι 5.60%, ενώ σύμφωνα με την Clarksons συμβαίνει το έτος 2010 και η μείωση του στόλου είναι 7.13%.



Σχήμα 30: Στόλος πλοίων PCCs 1996-2016 (Sea-Web/Clarksons)

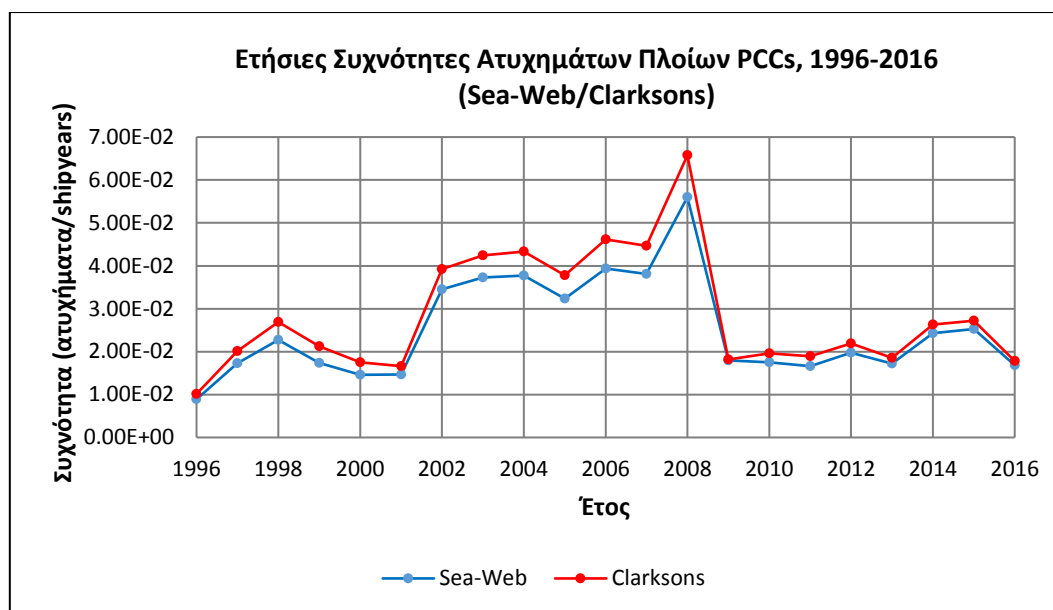
Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η μεταβολή του αριθμού των πλοίων ενός εμπορικού στόλου εξαρτάται κυρίως από τέσσερις παράγοντες, οι οποίοι συντρέχουν ταυτόχρονα. Ο πρώτος παράγοντας είναι ο αριθμός των νέων πλοίων που έρχονται σε υπηρεσία, ο δεύτερος παράγοντας είναι ο αριθμός των προγραμματισμένων αποσύρσεων, ο τρίτος παράγοντας είναι η αναγκαστική αποσύρση λόγω σοβαρού ατυχήματος (Broken Up), που επιβάλλεται συνήθως όταν κρίνεται ότι το πλοίο είναι ασύμφορο να επισκευαστεί και τέλος ο τέταρτος λόγω ολικής απώλειας (Total Loss), που συνήθως αποτελεί περιστατικό βύθισης του πλοίου.

Στην περίπτωση τώρα αυτής της μεταβολής που συμβαίνει στον στόλο των PCCs κατά το έτος 2009 (ή 2010), δεν υπάρχουν πληροφορίες που να την δικαιολογούν, στο πλαίσιο πάντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αξίζει όμως για το έτος 2009 να αναφερθούν τα εξής:

- Σημειώθηκε ρεκόρ μείωσης ατυχημάτων πλοίων PCCs σε σχέση με το έτος 2008, που ήταν της τάξης του 30.23% (Sea-Web database) .
- Συνέβησαν συνολικά 13 ατυχήματα πλοίων PCCs, εκ των οποίων τα δύο (2) είχαν ως αποτέλεσμα την απόσυρση του πλοίου (Broken Up) και ένα (1) την ολική απώλεια του πλοίου (Total Loss) (Sea-Web database).
- Το σύνολο των αποσύρσεων, περιλαμβάνοντας και εκείνων λόγω ατυχήματος, ανέρχεται σε 102 πλοία PCCs (Sea-Web database).
- Στον στόλο εισέρχονται συνολικά 59 νέα πλοία PCCs (Sea-Web database).
- «Το 2009, μάλιστα, οι αποσύρσεις πλοίων ανήλθαν σε τιμές ρεκόρ για τον κλάδο, καθώς αποσύρθηκαν 88 πλοία συνολικής μεταφορικής ικανότητας 337.057 οχημάτων.» [6]
- Οι ημερομηνίες συμπίπτουν με την παγκόσμια οικονομική κρίση του 2008.

Στην συνέχεια γίνεται ο υπολογισμός των συχνοτήτων ατυχημάτων των PCCs (ατυχήματα/shipyears), σύμφωνα με τους δύο στόλους που προέκυψαν από τις βάσεις δεδομένων Sea-Web και Clarksons. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 31 που ακολουθεί. Η συνεχής μπλέ γραμμή περιγράφει τις συχνότητες των ατυχημάτων σύμφωνα

με την βάση δεδομένων Sea-Web, ενώ η συνεχής κόκκινη γραμμή τις συχνότητες των ατυχημάτων σύμφωνα με την Clarksons.



Σχήμα 31: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs, 1996-2016 (Sea-Web/Clarksons)

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 31, οι συχνότητες των ατυχημάτων ως προς την βάση δεδομένων Clarksons είναι γενικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες συχνότητες ως προς την Sea-Web. Αυτό το γεγονός είναι αναμενόμενο, αφού ο στόλος των PCCs της Clarksons είναι μικρότερος αριθμητικά από εκείνον της Sea-Web, ενώ ο αριθμός των ατυχημάτων που χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς και στις δύο περιπτώσεις είναι ο ίδιος, προερχόμενος από την βάση δεδομένων Sea-Web.

Σύμφωνα με την Sea-Web, η μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων των πλοίων PCCs ( $8.91E-03$ ) συμβαίνει το έτος 1996, ενώ αντίθετα η μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων ( $5.60E-02$ ) συμβαίνει το έτος 2008, που είναι ακριβώς ένα χρόνο πριν την σημαντική μείωση του στόλου (2009), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, γεγονός που πιθανόν να είχε επιρροή στις αποφάσεις του κλάδου αυτών των πλοίων. Ο μέσος όρος της συχνότητας των ατυχημάτων κατά την διάρκεια της περιόδου 1996-2016 υπολογίζεται ότι είναι  $2.15E-02$ , με διακύμανση  $1.36E-04$  και τυπική απόκλιση  $1.17E-02$ .

Από την άλλη πλευρά, σύμφωνα με την Clarksons, η μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων των πλοίων PCCs ( $1.02E-02$ ) συμβαίνει το έτος 1996, ενώ αντίθετα η μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων ( $6.57E-02$ ) συμβαίνει το έτος 2008, που παρατηρείται χρονικά το ίδιο έτος με την μεγαλύτερη συχνότητα κατά την Sea-Web. Ο μέσος όρος της συχνότητας των ατυχημάτων είναι  $2.86E-02$ , με διακύμανση  $1.92E-04$  και τυπική απόκλιση  $1.39E-02$ .

Τέλος, παρατηρείται ότι μετά το 2009 οι συχνότητες των ατυχημάτων των PCCs διατηρούνται σε χαμηλό επίπεδο συγκριτικά με τα προηγούμενα χρόνια, χωρίς να ξεπερνάνε το  $3.00E-02$ , ενώ η διακύμανση τους είναι πολύ μικρότερη. Πιθανολογείται ότι σε αυτό το γεγονός να είχε σημαντική συνεισφορά η μαζική απόσυρση πλοίων που πραγματοποιήθηκε το έτος 2009 και η μετέπειτα είσοδος νεόκτιστων πλοίων στον στόλο των PCCs.

### 3.2 Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων

Ο στόλος των PCCs ταξινομείται με κριτήριο την μεταφορική ικανότητα των πλοίων σε οχήματα. Για τον σκοπό αυτό δημιουργούνται τέσσερις κατηγορίες χωρητικότητας οχημάτων που είναι οι παρακάτω:

- χωρητικότητα μικρότερη των 2000 οχημάτων, ή “<2000”.
- χωρητικότητα ίση ή μεγαλύτερη των 2000 οχημάτων και μικρότερη των 4000 οχημάτων, ή “2000-3999”.
- χωρητικότητα ίση ή μεγαλύτερη των 4000 οχημάτων και μικρότερη των 6000 οχημάτων, ή “4000-5999”.
- χωρητικότητα ίση ή μεγαλύτερη των 6000 οχημάτων, ή “6000+”.

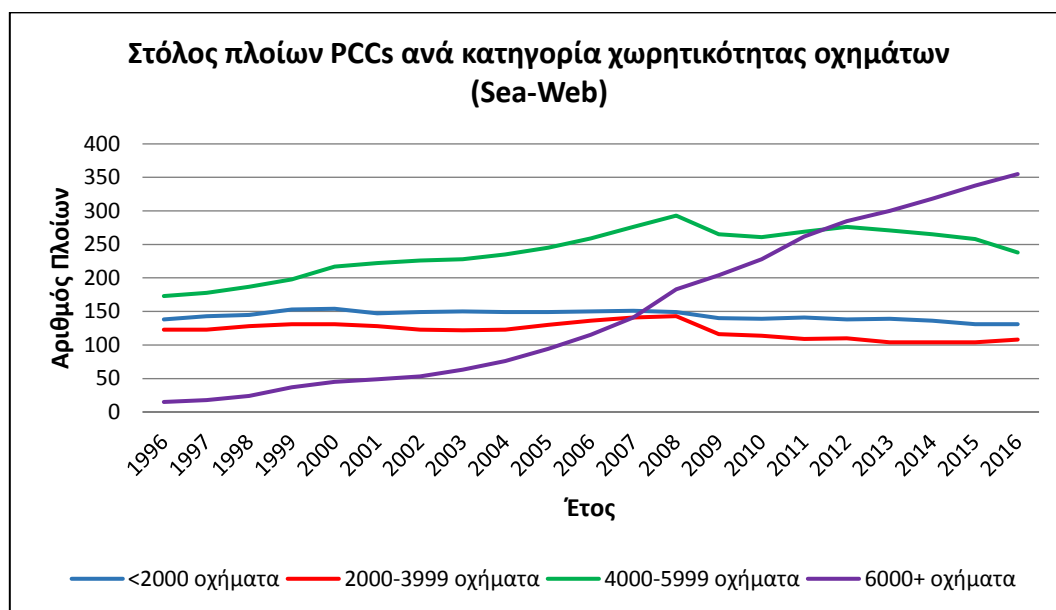
Στην συνέχεια παρουσιάζεται για κάθε βάση δεδομένων η ταξινόμηση του στόλου των PCCs ως προς τις τέσσερις κατηγορίες χωρητικότητας.

Ο Πίνακας 3 περιέχει τον στόλο των PCCs σύμφωνα με την βάση δεδομένων Sea-Web.

Πίνακας 3: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων 1996-2016 (Sea-Web)

ΕΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ PCCs	ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SEA-WEB			
		ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ			
		<2000	2000-3999	4000-5999	6000+
1996	449	138	123	173	15
1997	462	143	123	178	18
1998	484	145	128	187	24
1999	519	153	131	198	37
2000	547	154	131	217	45
2001	546	147	128	222	49
2002	551	149	123	226	53
2003	563	150	122	228	63
2004	583	149	123	235	76
2005	618	149	130	245	94
2006	660	150	136	259	115
2007	709	151	141	276	141
2008	768	149	143	293	183
2009	725	140	116	265	204
2010	742	139	114	261	228
2011	781	141	109	269	262
2012	809	138	110	276	285
2013	814	139	104	271	300
2014	823	136	104	265	318
2015	831	131	104	258	338
2016	832	131	108	238	355

Το Σχήμα 32 παρουσιάζει τις κατηγορίες χωρητικότητας των πλοίων PCCs συναρτήσει των ετών.



Σχήμα 32: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Sea-Web)

Ορισμένα στατιστικά αποτελέσματα για τον στόλο των PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας κατά την περίοδο 1996-2016, σύμφωνα με την Sea-Web, είναι:

Πίνακας 4: Στατιστικά στόλου πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας (Sea-Web, 1996-2016)

Χωρητικότητα	Μέσος Όρος Πλοίων	Μικρότερος Αριθμός Πλοίων	Μεγαλύτερος Αριθμός Πλοίων	Variance	Standard Deviation
<2000	143.9	131 (2015,2016)	154 (2000)	48.09	6.93
2000-3900	121.5	104 (2014, 2015)	143 (2008)	143.76	11.99
4000-5999	240.0	173 (1996)	293 (2008)	1186.6	34.44
6000+	152.5	15 (1996)	335 (2016)	14061.7	118.58

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αποτελεί η συνεχής αύξηση κάθε χρόνο του αριθμού των πλοίων χωρητικότητας μεγαλύτερης των 6000 οχημάτων (6000+), η οποία είναι κατά μέσο όρο 17 νέα πλοία ή 17.68% ανά έτος.

Ο επόμενος Πίνακας 5 περιέχει τον στόλο των PCCs σύμφωνα με την βάση δεδομένων Clarksons.



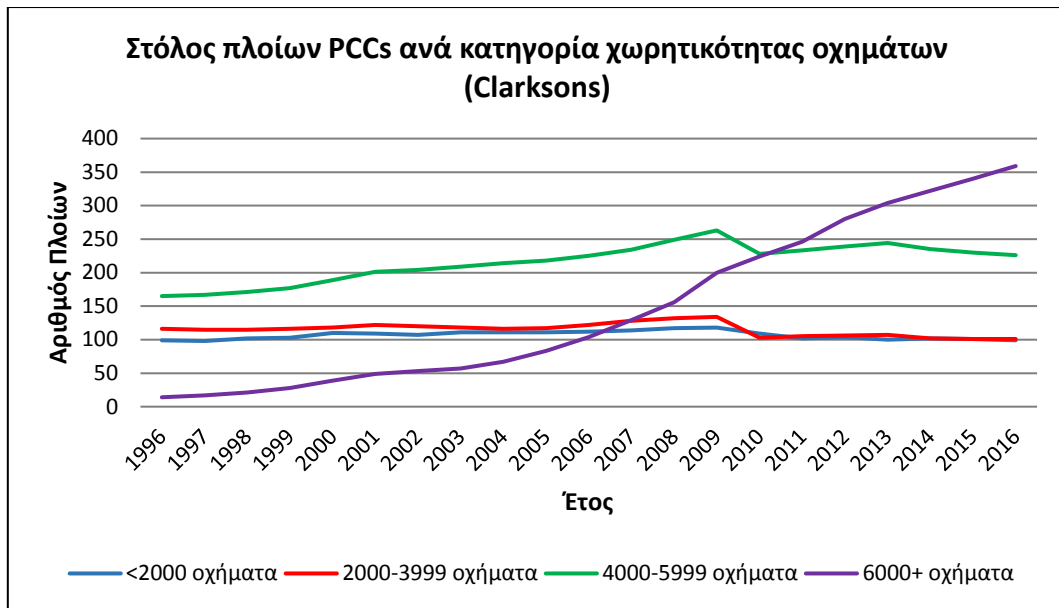
Πίνακας 5: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων 1996-2016 (Clarksons)

ΕΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΛΟΙΩΝ PCCs	ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ CLARKSONS			
		ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΣΕ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ			
		<2000	2000-3999	4000-5999	6000+
1996	394	99	116	165	14
1997	397	98	115	167	17
1998	409	102	115	171	21
1999	424	103	116	177	28
2000	456	110	118	189	39
2001	481	109	122	201	49
2002	484	107	120	204	53
2003	495	111	118	209	57
2004	508	111	116	214	67
2005	529	111	117	218	83
2006	563	112	122	225	104
2007	605	114	128	234	129
2008	654	117	132	249	156
2009	715	118	134	263	200
2010	664	109	103	228	224
2011	686	102	105	233	246
2012	729	104	106	239	280
2013	755	100	107	244	304
2014	761	102	102	235	322
2015	772	101	101	230	340
2016	785	99	101	226	359

Το επόμενο Σχήμα 33 παρουσιάζει τις κατηγορίες χωρητικότητας των πλοίων PCCs συναρτήσει των ετών.

Είναι εμφανής η ομοιότητα της κατανομής του στόλου των PCCs, ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων, μεταξύ των δύο βάσεων δεδομένων Sea-Web και Clarksons, παρά τις μικρές αριθμητικές διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ τους.

Ειδικότερα αναφέρεται ότι για τα πλοία χωρητικότητας “6000+” η ετήσια αύξηση είναι 17.25 νέα πλοία ή 18.01% ανά έτος, που συγκριτικά με την Sea-Web η διαφορά είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 33: Στόλος πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Clarksons)

Ορισμένα στατιστικά αποτελέσματα για τον στόλο των PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας κατά την περίοδο 1996-2016, σύμφωνα με την Clarksons, είναι:

Πίνακας 6: Στατιστικά στόλου πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας (Clarksons, 1996-2016)

Χωρητικότητα	Μέσος Όρος Πλοίων	Μικρότερος Αριθμός Πλοίων	Μεγαλύτερος Αριθμός Πλοίων	Variance	Standard Deviation
<2000	106.6	98 (1997)	118 (2009)	37.54	6.12
2000-3900	114.9	101 (2015, 2016)	134 (2009)	95.84	9.79
4000-5999	215.3	165 (1996)	263 (2009)	789.91	28.11
6000+	147.2	14 (1996)	359(2016)	14463.69	120.26

Στην συνέχεια γίνεται η ταξινόμηση των ατυχημάτων των πλοίων PCCs ως προς την χωρητικότητα σε οχήματα, ώστε να ακολουθήσει ο υπολογισμός των αντίστοιχων συχνοτήτων (ατυχήματα/shipyears).

Ο Πίνακας 7 περιέχει τα ατυχήματα των PCCs ταξινομημένα ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων.

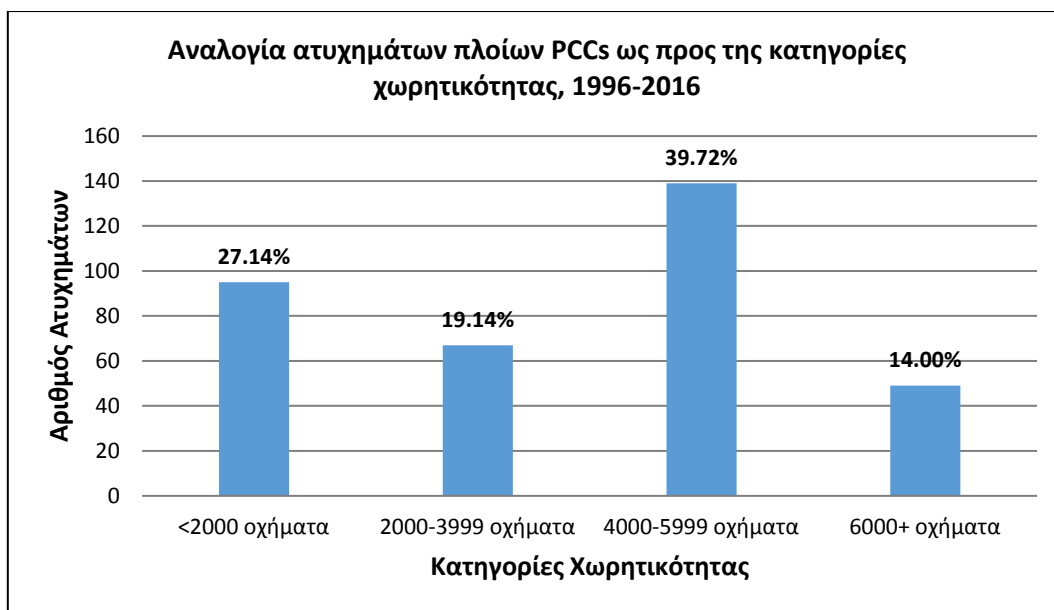
Πίνακας 7: Ατυχήματα πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων 1996-2016

<b>ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ ΠΛΟΙΩΝ PCCs</b>				
	<b>ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ</b>			
<b>ΕΤΟΣ</b>	<b>&lt;2000</b>	<b>2000-3999</b>	<b>4000-5999</b>	<b>6000+</b>
1996	0	0	4	0
1997	4	1	2	1
1998	4	2	5	0
1999	5	1	2	1
2000	3	2	1	2
2001	4	3	1	0
2002	5	3	8	3
2003	6	5	9	1
2004	6	2	13	1
2005	3	6	10	1
2006	4	4	13	5
2007	8	8	9	2
2008	10	8	20	5
2009	2	2	4	5
2010	3	2	6	2
2011	4	5	2	2
2012	2	2	6	6
2013	5	1	5	3
2014	8	3	7	2
2015	2	4	10	5
2016	7	3	2	2
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>95</b>	<b>67</b>	<b>139</b>	<b>49</b>

Από την ταξινόμηση των ατυχημάτων των PCCs, ως προς την χωρητικότητα των πλοίων σε οχήματα, προκύπτουν επιπλέον χρήσιμα στατιστικά στοιχεία, που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

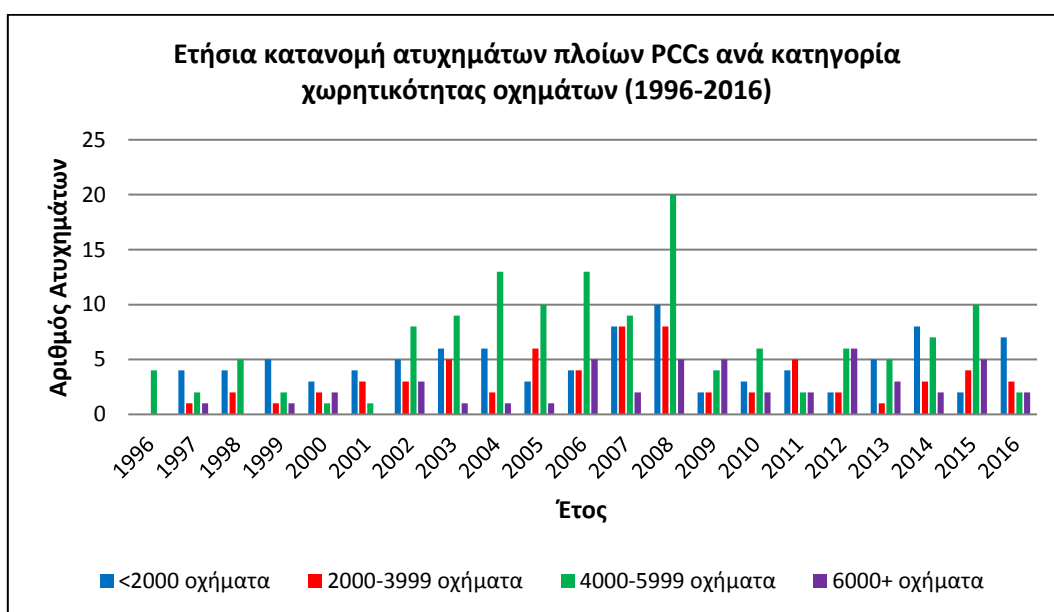
Ένα από αυτά είναι αναλογία που έχουν μεταξύ τους τα ατυχήματα για τις τέσσερις κατηγορίες χωρητικότητας των πλοίων σε όλη την περίοδο 1996-2016, η οποία και παρουσιάζεται στο Σχήμα 34.

Παρατηρείται ότι τα περισσότερα ατυχήματα (39.72%) συμβαίνουν στα πλοία της κατηγορίας “4000-5999”. Ακολουθούν τα πλοία της κατηγορίας “<2000” με ποσοστό 27.14% και στην συνέχεια τα πλοία “2000-3999” με ποσοστό 19.14%. Ο μικρότερος αριθμός ατυχημάτων (14.00%) συμβαίνει στα πλοία χωρητικότητας “6000+”.



Σχήμα 34: Αναλογία ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς της κατηγορίες χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016

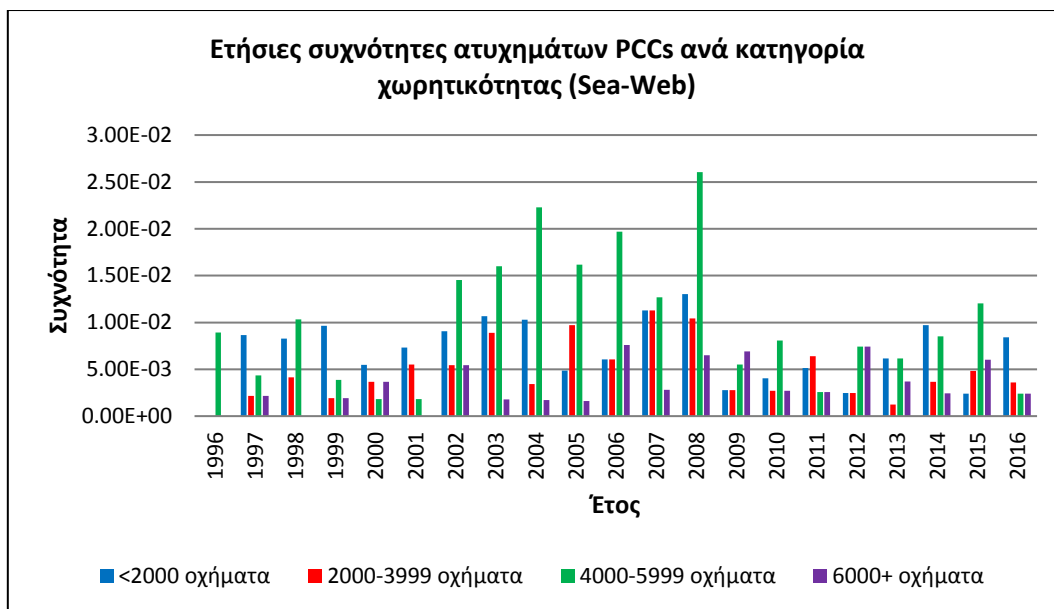
Η κατανομή των ατυχημάτων των PCCs ως προς τις χωρητικότητες των πλοίων, σε κάθε έτος της περιόδου 1996-2016, παρουσιάζεται στο Σχήμα 35.



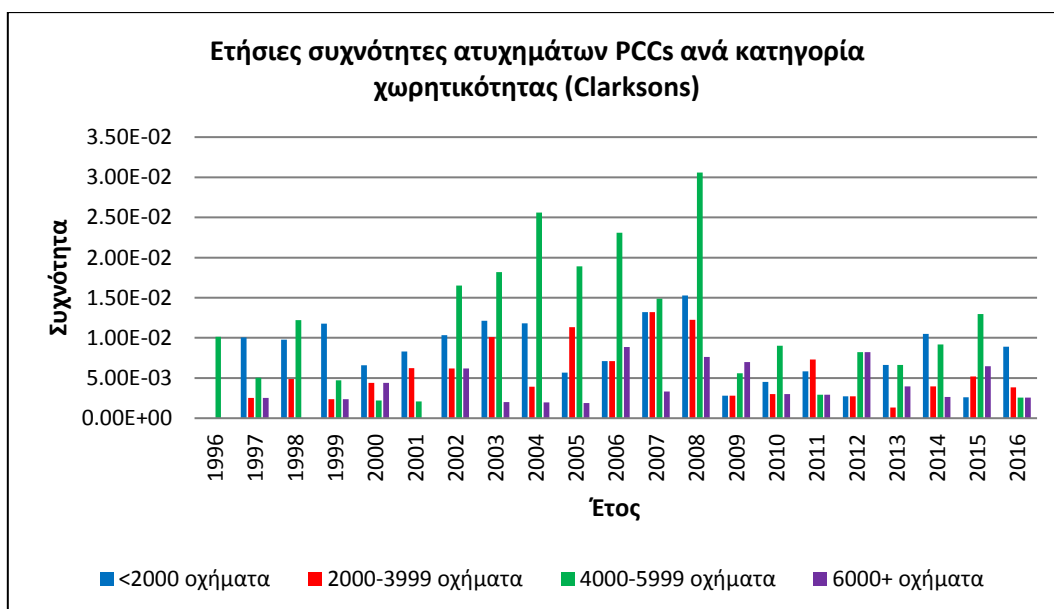
Σχήμα 35: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων, 1996-2016

Οι συχνότητες ατυχημάτων των PCCs θα υπολογιστούν και ως προς τους δύο στόλους (Sea-Web, Clarksons), αν και όπως αναφέρθηκε έχουν πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους, οπότε αναμένεται να προκύψουν αποτελέσματα που θα διαφέρουν ελάχιστα.

Στα Σχήματα 36 και 37 παρουσιάζονται οι ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων των PCCs για κάθε κατηγορία χωρητικότητας ως προς τις δύο βάσεις δεδομένων Sea-Web και Clarksons αντίστοιχα.



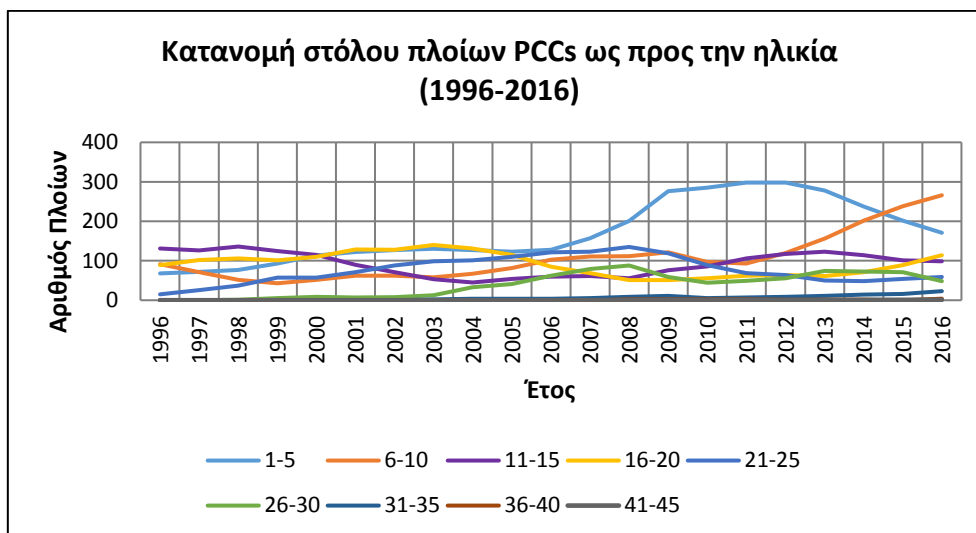
Σχήμα 36: Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Sea-Web)



Σχήμα 37: Ετήσιες συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά κατηγορία χωρητικότητας οχημάτων (Clarksons)

### 3.3 Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ηλικία

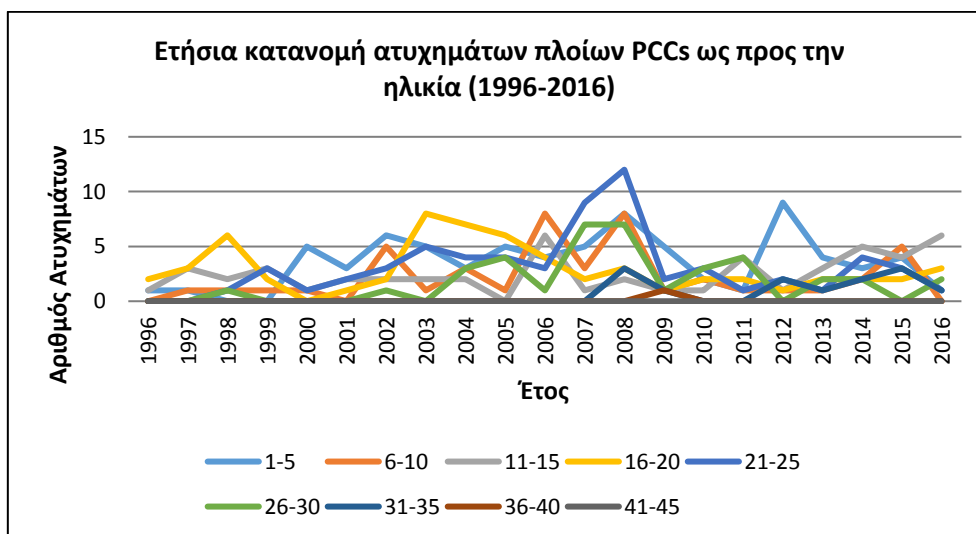
Για τον υπολογισμό των συχνοτήτων ατυχημάτων ως προς την ηλικία των πλοίων PCCs γίνεται κατανομή του στόλου και των ατυχημάτων ως προς την ομάδες ηλικίας που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 2.3. Ο στόλος των πλοίων PCCs ταξινομείται ως προς την ηλικία όπως φαίνεται στο Σχήμα 38. Προκύπτουν εννέα καμπύλες, που περιγράφουν την κατανομή του στόλου των PCCs ως προς την ηλικία κατά την περίοδο της μελέτης.



Σχήμα 38: Κατανομή του στόλου των πλοίων PCCs ως προς την ηλικία (1996-2016)

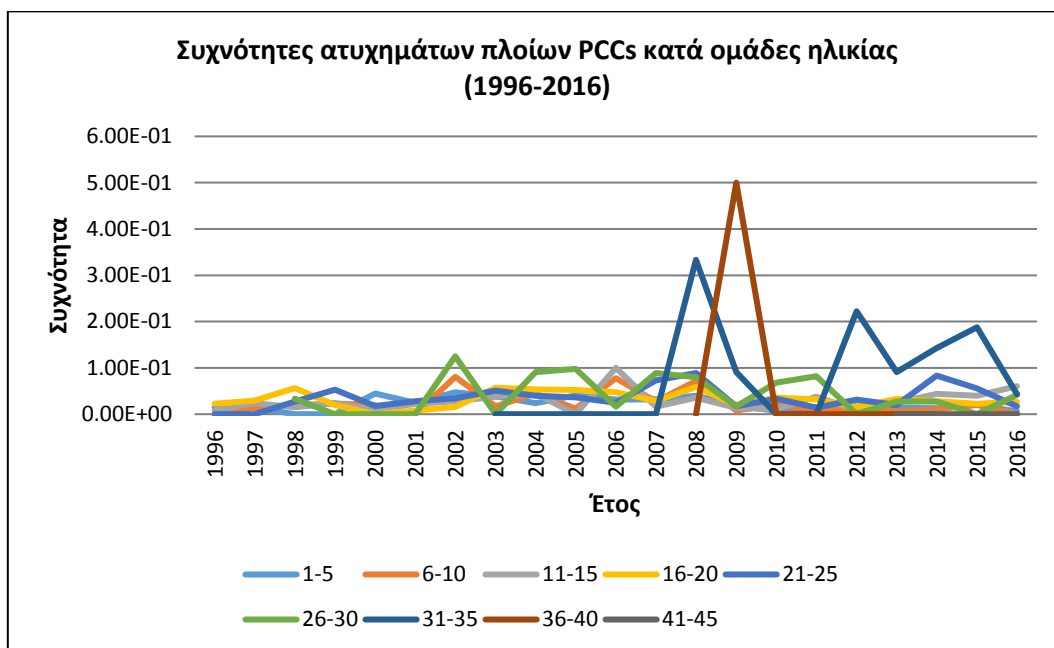
Το Σχήμα 38 παρουσιάζει την ετήσια μεταβολή του αριθμού των PCCs κάθε ομάδα ηλικίας. Ιδιαίτερη σημασία έχει η μεγάλη αύξηση του αριθμού των πλοίων PCCs ηλικίας 1-5 έτη κατά το χρονικό διάστημα 2009-2013 σε σχέση με τα προηγούμενα χρόνια. Επίσης από το 2011 και μετά ξεκινά να αυξάνεται και ο πληθυσμός των πλοίων PCCs ηλικίας 6-10 έτη, όπως αναμενόταν.

Τα ατυχήματα των PCCs ταξινομούνται ως προς την ηλικία όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 39.



Σχήμα 39: Ετήσια κατανομή ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς την ηλικία (1996-2016)

Οι συχνότητες των ατυχημάτων των PCCs ως προς την ηλικία (ατυχήματα/shipyears) υπολογίζονται με βάση τον αριθμό του στόλου και των ατυχημάτων που προσδιορίστηκαν προηγουμένως σε κάθε έτος. Στο Σχήμα 40 παρουσιάζεται η κατανομή των συχνοτήτων ατυχημάτων των PCCs για κάθε ομάδα ηλικίας σε συνάρτηση με τα έτη της χρονικής περιόδου 1996-2016.



Σχήμα 40: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs κατά ομάδες ηλικίας

Από το Σχήμα 40, παρατηρείται ότι την μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων εμφανίζουν τα πλοία της ομάδας ηλικίας 36-40 ( $5.00E-01$ ) το έτος 2009, και τα πλοία της ομάδας ηλικίας 31-35 ( $3.33E-01$ ), το έτος 2008. Η τελευταία ομάδα ηλικίας εξακολουθεί να εμφανίζει υψηλή συχνότητα ατυχημάτων από το έτος 2011 και μετά, που είναι της τάξης του  $2.00E-01$ . Γενικά πάντως, αυτές οι δύο ομάδες ηλικίας πρωτοεμφανίζονται στον στόλο των PCCs μετά το έτος 2003, η πρώτη, και το 2008, η δεύτερη. Τρίτη, κατά σειρά υψηλών συχνοτήτων ατυχημάτων, είναι η ομάδα ηλικίας 26-30 έτη, που εμφανίζει συχνότητες ατυχημάτων της τάξης του  $1.00E-01$ .

Υποδιαιρώντας τη χρονική περίοδο 1996-2016 σε χρονικά διαστήματα περισσότερων ετών και όχι ανά έτος, δηλαδή σε τέσσερα χρονικά διαστήματα ως εξής: 1996-2001, 2002-2006, 2007-2011 και 2012-2016, η μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων δίνει πολύ πιο χρήσιμα συμπεράσματα.

Σημειώνεται ότι κατά εξαίρεση το πρώτο χρονικό διάστημα 1996-2001 έχει διάρκεια έξι έτη και τα υπόλοιπα έχουν διάρκεια πενταετίας. Επειδή η χρονική περίοδος της μελέτης των ατυχημάτων είναι είκοσι ένα έτη συνολικά, θα έπρεπε το ένα από τα τέσσερα διαστήματα να είναι μεγαλύτερο κατά ένα έτος. Επιλέχθηκε αυτό να γίνει στο διάστημα 1996-2001, γιατί το έτος 1996 αντιπροσωπεύει μικρό αριθμό πλοίων στόλου και ατυχημάτων PCCs συγκριτικά με τα άλλα έτη, οπότε και η επίδραση του δεν είναι σημαντική.

Σύμφωνα με την παραπάνω υποδιαίρεση των ετών 1996-2016, γίνεται η ταξινόμηση του στόλου και των ατυχημάτων των PCCs και στην συνέχεια ο υπολογισμός των συχνοτήτων ατυχημάτων.

Ο Πίνακας 8 περιέχει την ταξινόμηση του στόλου των PCCs ανά ομάδα ηλικίας στα χρονικά διαστήματα 1996-2001, 2002-2006, 2007-2011, 2011-2016.

*Πίνακας 8: Στόλος πλοίων PCCs ανά πενταετία και ανά ομάδα ηλικίας (1996-2016)*

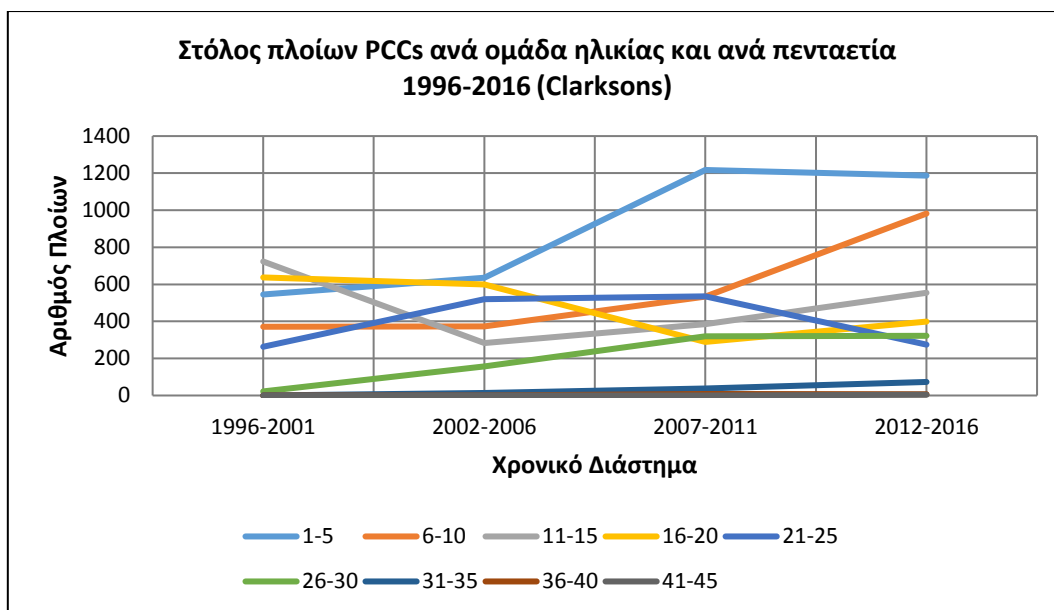
<b>Στόλος πλοίων PCCs 1996-2016</b>				
<b>Ομάδα Ηλικίας</b>	<b>1996-2001</b>	<b>2002-2006</b>	<b>2007-2011</b>	<b>2011-2016</b>
<b>1-5</b>	545	635	1217	1186
<b>6-10</b>	371	372	534	982
<b>11-15</b>	723	283	385	554
<b>16-20</b>	637	599	289	399
<b>21-25</b>	263	519	535	275
<b>26-30</b>	22	157	319	322
<b>31-35</b>	0	14	37	73
<b>36-40</b>	0	0	8	7
<b>41-45</b>	0	0	0	4
<b>Σύνολο</b>	2561	2579	3324	3802

Στο Σχήμα 41 παρουσιάζεται η μεταβολή του στόλου των πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας συναρτήσει των χρονικών διαστημάτων.

Παρατηρείται ότι από το 2007 και μετά αυξάνεται σημαντικά ο στόλος των PCCs ηλικίας μεταξύ 0-5 έτη, και διατηρείται σε υψηλά επίπεδα μέχρι και το 2016, γεγονός που αντικατοπτρίζει την συνεχή ναυπήγηση νέων πλοίων.

Ταυτόχρονα, την πενταετία 2012-2016, αυξάνεται σημαντικά ο στόλος ηλικίας 6-10 ετών, κυρίως λόγω των ναυπηγήσεων που προηγήθηκαν το 2007-2011, μειώνεται σημαντικά ο στόλος ηλικίας 21-25 ετών, και παρουσιάζουν αναμενόμενη αύξηση ο στόλος ηλικίας 11-15, 16-20, 26-30.





Σχήμα 41: Στόλος πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016)

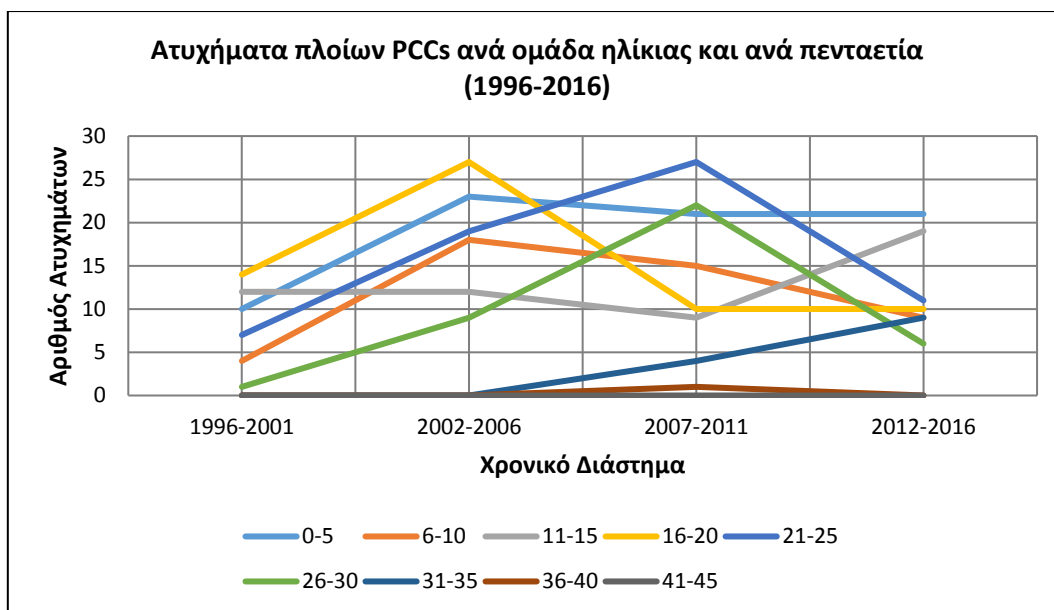
Για τον στόλο ηλικίας 36-40 και 41-45 ετών η μεταβολή είναι πολύ μικρή και πρόκειται για ελάχιστα πλοία που εξακολουθούν να βρίσκονται σε λειτουργία, τα οποία έχουν ελεγχθεί ότι δεν είναι περιπτώσεις “outliers”.

Ο Πίνακας 9 περιέχει τα ατυχήματα των PCCs ταξινομημένα ανά ομάδα ηλικίας στα χρονικά διαστήματα 1996-2001, 2002-2006, 2007-2011, 2011-2016.

Πίνακας 9: Ατυχήματα πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας ανά πενταετία (1996-2016)

Ατυχήματα πλοίων PCCs 1996-2016				
Ομάδα Ηλικίας	1996-2001	2002-2006	2007-2011	2012-2016
1-5	10	23	21	21
6-10	4	18	15	9
11-15	12	12	9	19
16-20	14	27	10	10
21-25	7	19	27	11
26-30	1	9	22	6
31-35	0	0	4	9
36-40	0	0	1	0
41-45	0	0	0	0
<b>Σύνολο</b>	<b>48</b>	<b>108</b>	<b>109</b>	<b>85</b>

Στο Σχήμα 42 παρουσιάζεται η μεταβολή των ατυχημάτων των πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας συναρτήσει των χρονικών διαστημάτων.



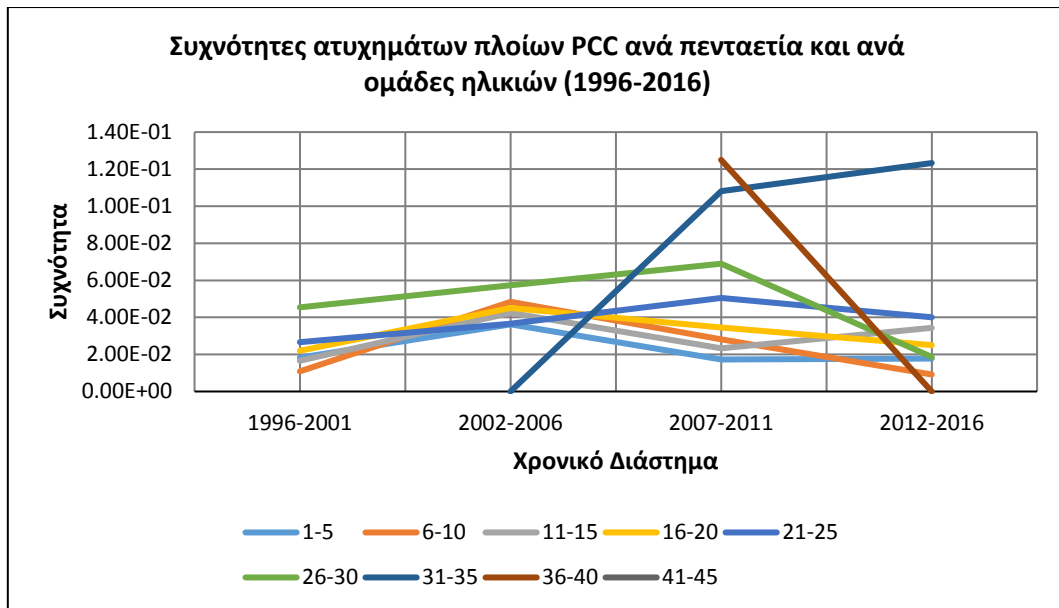
Σχήμα 42: Ατυχήματα πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016)

Στον Πίνακα 10 υπολογίζονται οι συχνότητες των ατυχημάτων των PCCs για κάθε ομάδα ηλικίας στα χρονικά διαστήματα της περιόδου 1996-2016.

Πίνακας 10: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016)

Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs 1996-2016				
Ομάδα Ηλικίας	1996-2001	2002-2006	2007-2011	2012-2016
1-5	1.83E-02	3.62E-02	1.73E-02	1.77E-02
6-10	1.08E-02	4.84E-02	2.81E-02	9.16E-03
11-15	1.66E-02	4.24E-02	2.34E-02	3.43E-02
16-20	2.20E-02	4.51E-02	3.46E-02	2.51E-02
21-25	2.66E-02	3.66E-02	5.05E-02	4.00E-02
26-30	4.55E-02	5.73E-02	6.90E-02	1.86E-02
31-35		0.00E+00	1.08E-01	1.23E-01
36-40			1.25E-01	0.00E+00
41-45				0.00E+00

Το Σχήμα 43 παρουσιάζει την μεταβολή των συχνοτήτων ατυχημάτων συναρτήσει των χρονικών διαστημάτων για κάθε μια ομάδα ηλικίας.



Σχήμα 43: Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά ομάδα ηλικίας και ανά πενταετία (1996-2016)

Από την μελέτη των συχνοτήτων ατυχημάτων των PCCs (ατυχήματα/shipyears) ανά πενταετία προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Χρονικό διάστημα 1996-2001.  
 Η μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων ( $4.55E-02$ ) ανήκει στα πλοία ηλικίας 26-30 ετών που αποτελούν το 0.86% του στόλου αυτού του χρονικού διαστήματος και η μικρότερη συχνότητα ( $1.08E-02$ ) ανήκει στα πλοία ηλικίας 6-10 ετών που αποτελούν το 14.48% του αντίστοιχου στόλου.
- Χρονικό διάστημα 2002-2006.  
 Ο συνολικός αριθμός των πλοίων του στόλου παρουσιάζει αύξηση κατά 0.70%. Το σύνολο των ατυχημάτων, αριθμητικά, παρουσιάζει αύξηση κατά 125%.  
 Η ομάδες ηλικίας των πλοίων έχουν την παρακάτω ποσοστιαία αναλογία μέσα στον στόλο: 0-5 (24.62%), 6-10 (14.42%), 11-15 (10.97%), 16-20 (23.23%), 21-25 (20.12%), 26-30 (6.10%), 31-35 (0.54%), 36-40 (0.00%), 41-45 (0.00%).  
 Η μεγαλύτερη συχνότητα ( $5.73E-02$ ) εξακολουθεί να ανήκει στα πλοία ηλικίας 26-30 ετών, αυξημένη σε σχέση με το προηγούμενο διάστημα κατά 26.11%. Η μικρότερη συχνότητα ( $0.00E-02$ ) ανήκει στα πλοία ηλικίας 31-35 ετών. Την δεύτερη μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων ( $3.62E-02$ ) εμφανίζουν τα πλοία ηλικίας 0-5 ετών. Γενικά, σε αυτό το χρονικό διάστημα όλες οι συχνότητες ατυχημάτων παρουσίασαν σημαντική αύξηση που κυμαίνεται μεταξύ 26.11% και 448.88%!
- Χρονικό διάστημα 2007-2011.  
 Ο συνολικός αριθμός των πλοίων του στόλου παρουσιάζει αύξηση κατά 28.89%. Το σύνολο των ατυχημάτων, αριθμητικά, παρουσιάζει αύξηση κατά 0.93%.  
 Η ομάδες ηλικίας των πλοίων έχουν την παρακάτω ποσοστιαία αναλογία μέσα στον στόλο: 0-5 (36.61%), 6-10 (16.06%), 11-15 (11.58%), 16-20 (8.70%), 21-25 (16.10%), 26-30 (9.60%), 31-35 (1.11%), 36-40 (0.24%), 41-45 (0.00%).

Οι δύο μεγαλύτερες συχνότητες ατυχημάτων 1.25E-01 και 1.08E-01 ανήκουν στα πλοία ηλικίας 36-40 ετών και 31-35 ετών αντίστοιχα.

Η μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων (1.73E-02) εμφανίζεται στα πλοία ηλικίας 0-5 ετών.

- Χρονικό διάστημα 2012-2016.

Ο συνολικός αριθμός των πλοίων του στόλου παρουσιάζει αύξηση κατά 14.38%. Το σύνολο των ατυχημάτων, αριθμητικά, παρουσιάζει μείωση κατά 22.02%.

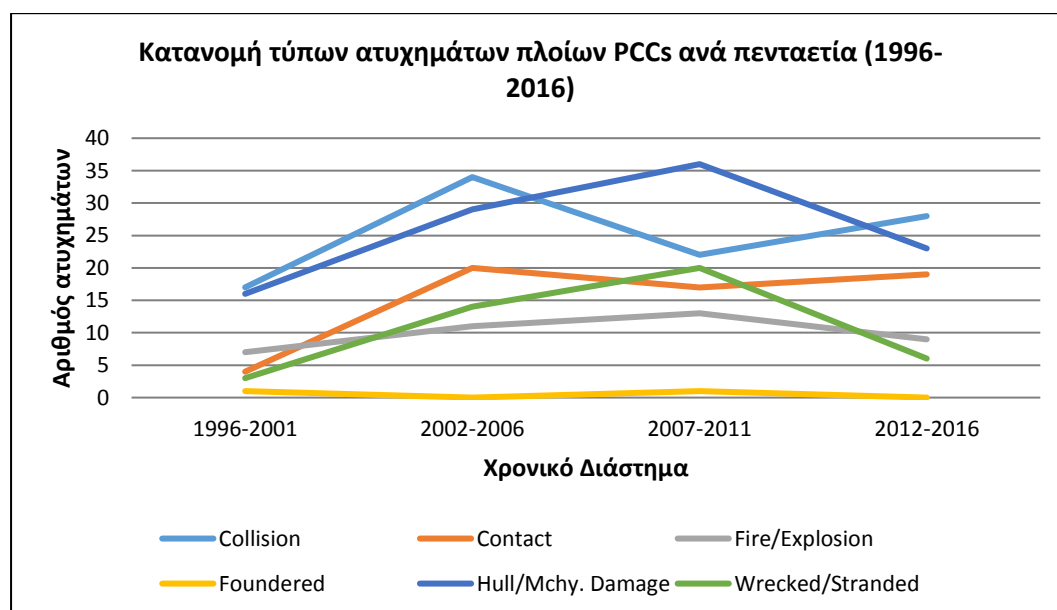
Η ομάδες ηλικίας των πλοίων έχουν την παρακάτω ποσοστιαία αναλογία μέσα στον στόλο: 0-5 (31.19%), 6-10 (25.83%), 11-15 (14.57%), 16-20 (10.50%), 21-25 (7.23%), 26-30 (8.47%), 31-35 (1.92%), 36-40 (0.18%), 41-45 (0.11%).

Η μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων (1.23E-01) εμφανίζεται στα πλοία της ομάδας ηλικίας 31-35 ετών, που αποτελούν το 1.92% του στόλου αυτού του χρονικού διαστήματος και η μικρότερη συχνότητα (9.16E-03) ανήκει στα πλοία ηλικίας 6-10 ετών, που αποτελούν το 10.49% του αντίστοιχου στόλου.

### 3.4 Συχνότητες ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο ατυχήματος

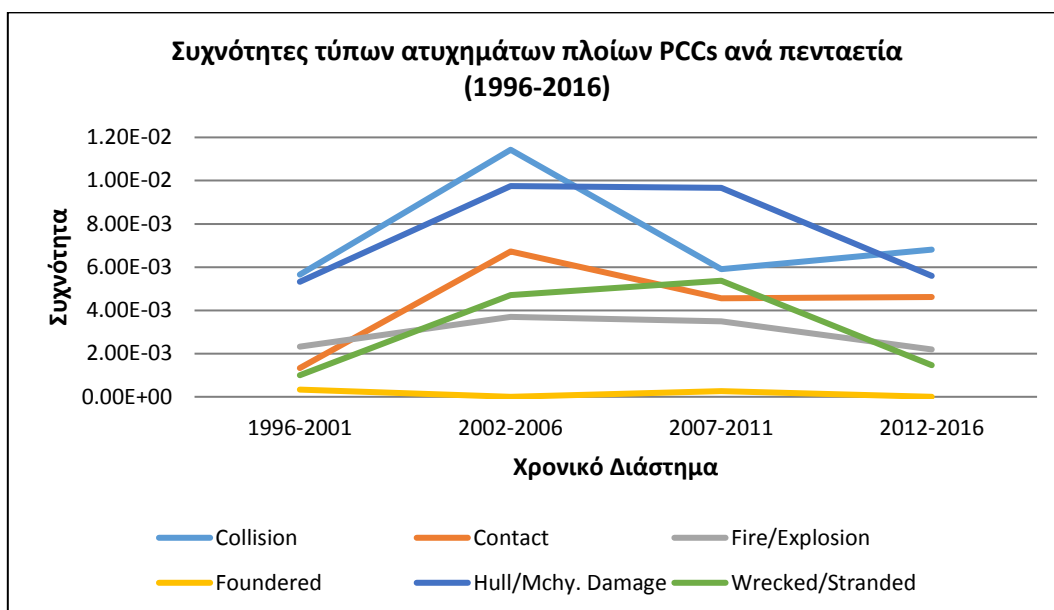
Οι συχνότητες των ατυχημάτων, ως προς τον τύπο ατυχήματος των πλοίων PCCs, υπολογίζονται ανά πενταετία για το χρονικό διάστημα της μελέτης. Ο στόλος των πλοίων που χρησιμοποιείται ως αναφορά προέρχεται από την βάση δεδομένων Sea-Web και έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.2.

Στον Σχήμα 44 που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των ατυχημάτων των πλοίων PCCs ως προς τον τύπο ατυχήματος ανά πενταετία για το χρονικό διάστημα 1996-2016.



Σχήμα 44: Κατανομή τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά πενταετία (1996-2016)

Οι συχνότητες των ατυχημάτων ανά τύπο ατυχήματος (ατυχήματα/shipyears) παρουσιάζονται στο Σχήμα 45.



Σχήμα 45: Συχνότητες τύπων ατυχημάτων πλοίων PCCs ανά πενταετία (1996-2016)

Από το Σχήμα 45, προκύπτει ότι την μεγαλύτερη συχνότητα εμφανίζουν τα ατυχήματα τύπου Collision ( $1.14E-02$  ατυχήματα/shipyears) και τύπου Hull/Machinery Damage ( $9.75E-03$  ατυχήματα/shipyears) το χρονικό διάστημα 2002-2006. Την μικρότερη συχνότητα ατυχημάτων για ολόκληρο το χρονικό διάστημα 1996-2016 παρουσιάζουν τα ατυχήματα τύπου Foundered ( $3.33E-04$  ατυχήματα/shipyears). Οι υπόλοιποι τύποι ατυχήματος εμφανίζουν συχνότητες που βρίσκονται στην περιοχή μεταξύ  $2.00E-02$  και  $6.72E-03$ .

Με εξαίρεση τον τύπο Foundered, σημαντικό γεγονός αποτελεί η αύξηση της συχνότητας όλων των υπόλοιπων τύπων ατυχημάτων, μέχρι και το τέλος του 2006.

Την τελευταία πενταετία, 2012-2016, οι συχνότητες παρουσιάζουν μείωση ή σταθερότητα, με εξαίρεση τον τύπο ατυχήματος Collision που εμφανίζει και πάλι την μεγαλύτερη συχνότητα ατυχημάτων ( $6.81E-03$ ).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Εξόρυξη Δεδομένων (Data Mining)

### 4.1 Εισαγωγή

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας των ψηφιακών συσκευών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει συμβάλλει καθοριστικά στην διαμόρφωση του σύγχρονου τρόπου λειτουργίας της κοινωνίας. Δεδομένα παντός είδους δημιουργούνται, μεταδίδονται και αποθηκεύονται καθημερινά σε ηλεκτρονική μορφή με μεγάλη ευκολία, σχεδόν από το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Επίσης, η ενσωμάτωση του διαδικτύου σε όλο και περισσότερες κοινωνικές δομές, έχει οδηγήσει σε νέες δραστηριότητες, όπως είναι το online εμπόριο, υπηρεσίες, ακόμα και εκπαίδευση. Στην εποχή της πληροφορίας, όπως γενικότερα αναφέρεται, διακινείται και συσσωρεύεται καθημερινά υπερβολικά μεγάλος όγκος πρωτογενών δεδομένων.

Στα πρωτογενή δεδομένα, που προέρχονται από τις ολοένα και πιο σύνθετες ανθρώπινες δραστηριότητες, είναι απαραίτητο να γίνει επεξεργασία και ανάλυση, ώστε να μετατραπούν σε χρήσιμες πληροφορίες. Εξαιτίας του υπερβολικά μεγάλου όγκου και τις πολυπλοκότητας αυτών των δεδομένων, οι παραδοσιακές μέθοδοι ανάλυσης με χρήση απλών στατιστικών εργαλείων δεν επαρκούν πλέον και είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες. Τα προβλήματα κορεσμού των παλαιών μεθόδων στατιστικής ανάλυσης είχαν επισημανθεί έγκαιρα, ήδη από τις αρχές του 1980, μεταξύ των ομάδων που ασχολούνταν με την μελέτη και ανάλυση δεδομένων [7]. Έτσι, σταδιακά έκανε την εμφάνισή της η ανάγκη δημιουργίας νέων τεχνικών και εργαλείων επεξεργασίας δεδομένων, κυρίως αυτοματοποιημένων, που να έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν με ακρίβεια και ευκολία τις μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε χρήσιμες πληροφορίες και τελικά σε γνώση.

Η νέα επιστήμη, που εξυπηρετεί την παραπάνω ανάγκη και που φέρει μαζί της και νέα τεχνολογία, περιγράφεται συνολικά από τον τίτλο «Εξόρυξη δεδομένων» ή “Data Mining”, όπως είναι η επικρατέστερη αγγλική ορολογία. Το Data mining είναι ένας συνδιασμός μεταξύ των παραδοσιακών μεθόδων ανάλυσης δεδομένων και σύγχρονων αλγόριθμων επεξεργασίας, που υλοποιούνται σε ψηφιακό περιβάλλον, κυρίως μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών και κατάλληλων προγραμμάτων. Η χρήση των αλγόριθμων επιτρέπει την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων οποιασδήποτε μορφής και κυρίως κάνει δυνατό τον χειρισμό υπερβολικά μεγάλου όγκου δεδομένων σε σύντομο χρονικό διάστημα. [7]

Στο Κεφάλαιο 4 θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή του Data Mining. Το μεγαλύτερο βάρος θα δοθεί στην εφαρμογή μιας τεχνικής Data Mining πάνω στα υπό μελέτη δεδομένα των ατυχημάτων των πλοίων PCCs, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην στατιστική ανάλυση των Κεφαλαίων 2 και 3. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί η εφαρμογή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, που θα έχει ως στόχο να βρεθεί ένα μοντέλο ταξινόμησης (classification) ως προς τους τύπους ατυχημάτων των πλοίων PCCs. Στην συνέχεια, με βάση το μοντέλο που θα δημιουργηθεί, το νευρωνικό δίκτυο θα είναι δυνατό να πρόβλεψει τον τύπο ατυχήματος ενός πλοίου PCC, εκτελώντας ταξινόμηση συγκεκριμένων γνωστών πληροφοριών που θα του δωθούν. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο δεν προβλέπει τον χρόνο ατυχήματος, αλλά ενημερώνει για τον επικρατέστερο τύπο ατυχήματος, στην περίπτωση που συμβεί ατύχημα στο πλοίο. Το νευρωνικό δίκτυο υλοποιείται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

## 4.2 Εξόρυξη δεδομένων (Data Mining)

Η εξόρυξη δεδομένων είναι μια τεχνική, η οποία υποστηριζόμενη από κατάλληλα μαθηματικά εργαλεία, οδηγεί στην ανακάλυψη γνώσης, ή χρήσιμης πληροφορίας, με συστηματικό τρόπο, μέσα από έναν μεγάλο όγκο πρωτογενών δεδομένων. Η τεχνική της εξόρυξης δεδομένων υλοποιείται από μια σειρά διαδοχικών βημάτων. Μια τέτοια γενική δομή βημάτων είναι η ακόλουθη:

1. Καθαρισμός Δεδομένων (Data Cleaning)  
Τα δεδομένα καθαρίζονται από λανθασμένες ή μη ολοκληρωμένες εγγραφές.
2. Ενσωμάτωση Δεδομένων (Data Integration)  
Κυρίως αφορά την περίπτωση που τα δεδομένα είναι αποθηκευμένα σε πολλές και διαφορετικές βάσεις δεδομένων και γίνεται η ενσωμάτωσή τους σε μία.
3. Επιλογή Δεδομένων (Data Selection)  
Από την βάση δεδομένων, γίνεται επιλογή εκείνων των δεδομένων που απαιτούνται για μια συγκεκριμένη μελέτη.
4. Μετατροπή Δεδομένων (Data Transformation)  
Τα δεδομένα μετατρέπονται σε κατάλληλη μορφή, η οποία εξυπηρετεί την τεχνική εξόρυξης, εφαρμόζοντας διάφορους μαθηματικούς μετασχηματισμούς.
5. Τεχνική εξόρυξης (Data Mining)  
Εφαρμόζεται η τεχνική εξόρυξης, δηλαδή ο κατάλληλος μαθηματικός αλγόριθμος, ο οποίος ανακαλύπτει ένα πρότυπο μοντέλο ή δομή μέσα στα δεδομένα.
6. Αξιολόγηση του προτύπου (Evaluation)  
Το πρότυπο, που βρέθηκε στο βήμα 5, αξιολογείται μέσω κατάλληλων μέτρων και γίνεται αποδεκτό ή απορρίπτεται.
7. Παρουσίαση γνώσης (Knowledge Presentation)  
Με χρήση κυρίως οπτικών μέσων, γίνεται η παρουσίαση της γνώσης που εξορύχθηκε.

Τα βήματα 1 έως και 4, που προηγούνται της τεχνικής εξόρυξης, ονομάζονται βήματα προεπεξεργασίας δεδομένων (data preprocessing).

Τα πρότυπα, που μπορούν να βρεθούν από μια τεχνική εξόρυξης δεδομένων, είναι πάρα πολλά και επιπλέον το καθένα συνοδεύεται από μεγάλο μαθηματικό υπόβαθρο. Η εκτενής αναφορά σε αυτά και η αναλυτική περιγραφή τους, θα ξέφευγε εντελώς από το πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επομένως, θα γίνει μόνο μια απλή αναφορά σε αυτά, ενώ θα αναπτυχθεί μόνο το μέρος εκείνο που θα χρησιμοποιηθεί στα ατυχήματα των πλοίων PCCs. Μερικές από τις δημοφιλέστερες τεχνικές εξόρυξης είναι:

- Association Rules
- Constraint Based Association Mining
- Correlation Analysis
- Classification
- Prediction
- Cluster Analysis
- Mining Stream, Time-Series, Sequence Data
- Graph Mining, Social Network Analysis, Multirelational Data Mining
- Mining Object, Spatial, Multimedia text, Web Data

### 4.3 Ταξινόμηση (Classification)

Τα δεδομένα, που συλλέγονται στις βάσεις δεδομένων, αποθηκεύονται με έναν συστηματικό τρόπο, που διευκολύνει τον χειρισμό, αλλά και τους προσδίδει μια υποτυπώδης τάξη. Συνήθως, αποτελούνται από διαδοχικές εγγραφές, όπου η κάθε μια υποδιαιρείται στον ίδιο αριθμό χαρακτηριστικών (attributes). Για παράδειγμα, στα ατυχήματα των πλοίων PCCs, μια εγγραφή αντιστοιχεί σε ένα ατύχημα. Κάθε εγγραφή-ατύχημα περιγράφεται από τα δεδομένα που περιέχονται στα παρακάτω attributes:

- Αριθμός ατυχήματος (Incident No)
- Ημερομηνία ατυχήματος (Casualty Date)
- Αριθμός IMO πλοίου (IMO Ship No)
- Όνομα πλοίου (Ship Name)
- Ημερομηνία κατασκευής πλοίου (Date of Build)
- Χώρα κατασκευής πλοίου (Country of Build)
- Σφοδρότητα ατυχήματος (Severity)
- Χαρακτηρισμός ατυχήματος (Casualty ή Total Loss)
- Τύπος ατυχήματος (Casualty Type)
- Σημαία πλοίου (Flag)
- Γεωγραφική περιοχή ατυχήματος (Zone)
- Περιβαλλοντική ρύπανση (Pollution)
- Αριθμός νεκρών ή αγνοούμενων (Killed, Missing)
- Χωρητικότητα οχημάτων (Vehicles)

Το περιεχόμενο κάθε attribute είναι μια πληροφορία, που είναι ένα αριθμητικό ή κατηγορικό μέγεθος. Ένα μέγεθος λέγεται αριθμητικό όταν μπορεί να πάρει τιμές μέσα σε ένα εύρος και υπάρχει διάταξη, όπως είναι για παράδειγμα η θερμοκρασία. Αντίθετα, ένα μέγεθος λέγεται κατηγορικό (categorical) όταν μπορεί να πάρει αριθμητικές τιμές, αλλά δεν έχει έννοια η διάταξη, δηλαδή κάθε τιμή εκφράζει ένα διαφορετικό αποτέλεσμα εξίσου σημαντικό, όπως για παράδειγμα, οι τιμές 0 και 1 μπορεί να περιγράφουν ένα attribute που πραγματοποιείται ή όχι. Επίσης, ένα κατηγορικό μέγεθος μπορεί να περιγράφεται και από κείμενο, πχ. ο λογαριασμός ενός πελάτη καταστήματος περιέχει τα ονόματα των προϊόντων που αγόρασε.

Το εύρος των διαφορετικών τιμών που μπορεί να λάβει ένα attribute καθορίζεται από όλες τις εγγραφές, που συνθέτουν ένα σύνολο τιμών, έστω  $A$ . Αν υπάρχουν  $n$  σε πλήθος attributes, τότε στα δεδομένα αντιστοιχούν τα σύνολα τιμών  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ , τα οποία καθορίζουν το εύρος τιμών κάθε attribute, ανεξάρτητα από το αν είναι αριθμητικά ή κατηγορικά μεγέθη.

Υπάρχουν περιπτώσεις που ενδιαφέρει να εξεταστούν τα δεδομένα-εγγραφές ως προς ένα συγκεκριμένο attribute, με σκοπό να βρεθεί ένα πρότυπο. Τότε, το attribute αυτό ονομάζεται κλάση (class, ή target class). Με βάση το target class, ακολουθεί η ανάλυση των δεδομένων, ώστε να βρεθούν συσχετίσεις μεταξύ attributes και target class κάθε εγγραφής. Αυτού του είδους η ανάλυση λέγεται Ταξινόμηση (Classification).

Η Ταξινόμηση (Classification) είναι μια τεχνική ανάλυσης Data Mining, κατά την οποία γίνεται ανακάλυψη προτύπων, ή πρόβλεψη μελλοντικών τάσεων και χρησιμοποιείται κυρίως στην περίπτωση που τα δεδομένα προς ανάλυση είναι κατηγορικά μεγέθη. Οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες Classification είναι:



- Επαγωγικά Δέντρα Αποφάσεων (Decision Tree Induction)
- Ταξινόμηση με βάση τις πιθανότητες και το θεώρημα Bayes (Bayesian Classification)
- Rule-Based Classification
- IF-THEN Rules for Classification
- Classification by Backpropagation (Artificial Neural Networks)
- Support Vector Machines (SVM)
- Association Rule Analysis
- Lazy Learners

Κάθε μια κατηγορία χρησιμοποιεί έναν διαφορετικό μαθηματικό αλγόριθμο ώστε να εκτελέσει την ταξινόμηση. Η λειτουργία κάθε αλγόριθμου ταξινόμησης πραγματοποιείται σε δύο βήματα. Το πρώτο βήμα είναι η εκπαίδευση από τα διαθέσιμα δεδομένα (training) και το δεύτερο βήμα (prediction) είναι η ταξινόμηση μιας νέας εγγραφής, της οποίας είναι άγνωστο το target class, με μοναδικό οδηγό την γνώση που αποκτήθηκε κατά την εκπαίδευση.

Στο βήμα της εκπαίδευσης, για κάθε μια εγγραφή  $i$  των δεδομένων, δημιουργούνται:

- Ένα διάνυσμα  $\mathbf{X}_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , τάξης  $n$ . Κάθε στοιχείο  $x_k$ ,  $k = \{1, \dots, n\}$ , παίρνει τιμές από τα αντίστοιχα,  $n$  σε πλήθος, σύνολα τιμών  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  των attributes των δεδομένων που αντιστοιχούν στην εγγραφή  $i$ , στα οποία δεν περιλαμβάνεται εκείνο που έχει οριστεί ως target class. Ο συνολικός αριθμός attributes των δεδομένων είναι  $n+1$ .
- Ένα στοιχείο  $T_i$ , που παίρνει την τιμή του target class της εγγραφής  $i$ , από το σύνολο τιμών  $A_{n+1}$ . Το  $T_i$  αποτελεί ζεύγος με το  $\mathbf{X}_i$ .

Ο αλγόριθμος της ταξινόμησης ανακαλύπτει ένα μοντέλο που περιγράφει τις σχέσεις μεταξύ των  $\mathbf{X}_i$  και  $T_i$  για το σύνολο των δεδομένων. Επειδή γίνεται υπόδειξη της κάθε αντιστοιχίας  $\mathbf{X}_i$  και  $T_i$ , αυτός ο τρόπος εκπαίδευσης λέγεται εκπαίδευση με επίβλεψη (supervised learning).

Στο δεύτερο βήμα το μοντέλο, που δημιουργείται από τον αλγόριθμο, χρησιμοποιείται για ταξινόμηση νέων δεδομένων, των οποίων δεν είναι γνωστό το target class. Δηλαδή, δίνεται ένα νέο διάνυσμα της μορφής  $\mathbf{X}_j = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  και ο αλγόριθμος παράγει το  $T_j$ .

[8]

## 4.4 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks, ANNs)

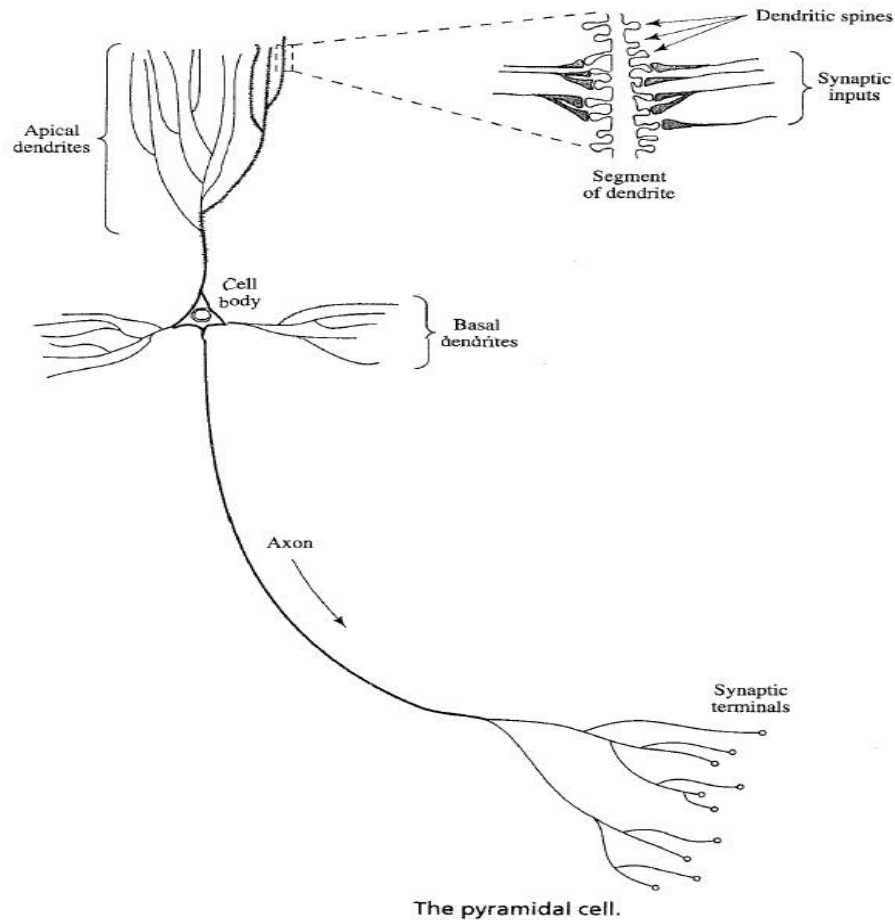
Οι βασικές αρχές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων προέρχονται από πολλούς και διαφορετικούς κλάδους των επιστημών, όπως είναι οι νευροεπιστήμες, τα μαθηματικά, η στατιστική, η φυσική, και η μηχανική. Η εφαρμογή τους είναι μεγάλη και διαρκώς επεκτείνεται σε πολλούς και διαφορετικούς μεταξύ τους τομείς, όπως για παράδειγμα η επεξεργασία σημάτων, η αναγνώριση προτύπων και μοτίβων (pattern recognition, classification), η αναγνώριση εικόνας και ομιλίας (image, voice recognition). Επίσης, τα τελευταία χρόνια γίνεται συνδιασμός νευρωνικών δικτύων και συστημάτων αυτόματου ελέγχου, που βελτιώνει τις επιδόσεις των δεύτερων, με πιο γνωστή εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία (Driver Assistance Systems και Parking Assistance Systems).

Ο κυριότερος λόγος που τα νευρωνικά δίκτυα εξελίσσονται συνεχώς τα τελευταία χρόνια είναι ότι δίνουν λύση σε προβλήματα εφαρμογών πληροφορικής, όπου ο κλασικός προγραμματισμός δεν είχε επιτυχία [9]. Τέτοιες εφαρμογές είναι η ρομποτική, συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, συστήματα που απαιτούνται να έχουν μνήμη ή να μπορούν να μαθαίνουν και να επαναλαμβάνουν δραστηριότητες. Επίσης, χρησιμοποιούνται στην ιατρική για την διάγνωση ασθενειών από ακτινογραφίες ή μαγνητικές τομογραφίες, σε διαδικτυακές μηχανές αναζήτησης, σε οπτικά συστήματα, στον έλεγχο αποσκευών των αεροδρομίων, και σε πλήθος άλλες παραπλήσιες εφαρμογές. Μέσω του κλασσικού προγραμματισμού, ήταν αδύνατο να κατασκευαστεί κώδικας, που να περιέχει όλες τις περιπτώσεις που μπορεί να αντιμετωπίσει κατά την λειτουργία της μια από τις εφαρμογές που αναφέρθηκε.

Τα νευρωνικά δίκτυα δεν χρειάζονται προγραμματισμό για να εκτελέσουν μια εργασία. Ο προγραμματισμός τους σταματά όταν ολοκληρωθεί η ψηφιακή δομή τους. Στην συνέχεια, μέσω της δομής που έχουν και τον αλγόριθμο εκπαίδευσης, «μαθαίνουν» να κάνουν την εργασία. Αυτό επιτυγχάνεται τροφοδοτώντας τα με ένα πολύ μεγάλο αριθμό παραδειγμάτων. Τα παραδείγματα αυτά προέρχονται από τα πρωτογενή δεδομένα που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4.1. Έτσι, μια τράπεζα μπορεί να εκπαιδεύσει ένα νευρωνικό δίκτυο να αναγνωρίζει σε ποιές περιπτώσεις μπορεί να δωθεί με ασφάλεια ένα δάνειο, χρησιμοποιώντας δεδομένα παλιότερων πελατών και δανείων. Και μπορεί να είναι το ίδιο σε δομή νευρωνικό δίκτυο, που σε μια άλλη εφαρμογή, θα έχει εκπαιδευτεί να προτείνει στον υπεύθυνο της αποθήκης ενός σουπερμάρκετ τις παραγγελίες αγαθών του επόμενου μήνα, από τις προτιμήσεις των πελατών προηγούμενων μηνών.

Η κατασκευή του τεχνητού νευρωνικού δικτύου μιμείται ως ένα βαθμό την δομή των νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από περίπου δέκα δισεκατομμύρια νευρώνες, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους μέσω των συνάψεων (synapses). Οι συνάψεις είναι οι στοιχειώδεις δομικές και λειτουργικές μονάδες, οι οποίες επιτρέπουν στους φυσικούς νευρώνες να επικοινωνούν μεταξύ τους.

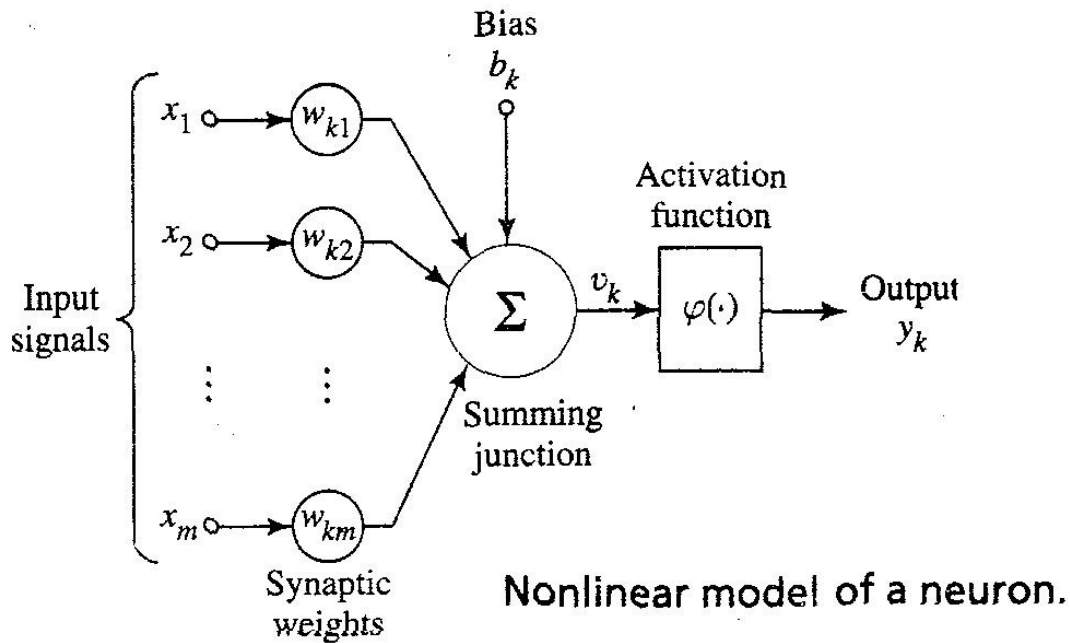
Ένα φυσικό τυπικό κύτταρο νευρώνα αποτελείται από το σώμα (cell body), τους δενδρίτες (dendrites) και τον άξονα (axon), όπως φαίνεται στην Εικόνα 7. Ο νευρώνας, μέσω των δενδριτών, μπορεί να δέχεται ηλεκτρικά σήματα από περισσότερους του ενός, άλλους νευρώνες, ενώ ο ίδιος, μέσω του άξονα, μεταδίδει ένα μόνο ηλεκτρικό σήμα. Ο άξονας καταλήγει στις συναπτικές απολήξεις (synaptic terminals), όπου εκεί γίνεται η σύνδεση με δενδρίτες άλλων νευρώνων.



Εικόνα 7: Πυραμιδικός νευρώνας εγκεφάλου (Πηγή: [10] Figure 1.2)

Η πιο συνηθισμένη κατηγορία συνάψεων είναι η χημική. Η λειτουργία της χημικής σύναψης είναι η εξής: Από μια προσυναπτική διαδικασία (presynaptic process) απελευθερώνεται ένας διαβιβαστής (transmitter substance), που είναι μια χημική ουσία η οποία μεταδίδεται κατά μήκος της συναπτικής σύνδεσης μεταξύ δύο νευρώνων. Ο διαβιβαστής, στην συνέχεια παίρνει μέρος σε μια μετασυναπτική διαδικασία (postsynaptic process). Δηλαδή, η σύναψη μετατρέπει ένα προσυναπτικό ηλεκτρικό σήμα, από τον πρώτο νευρώνα, σε χημικό και πριν πλησιάσει τον επόμενο νευρώνα, το χημικό σήμα μετατρέπεται σε μετασυναπτικό ηλεκτρικό σήμα. Με τον τρόπο αυτό, και ανάλογα του δυναμικού του ηλεκτρικού σήματος, η σύναψη μπορεί να διεγείρει ή όχι έναν νευρώνα. Το δυναμικό, που μπορεί να ενεργοποιήσει έναν νευρώνα, ονομάζεται δυναμικό ενεργοποίησης (action potential).

Σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, ο φυσικός νευρώνας μοντελοποιείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 46.



Σχήμα 46: Μη γραμμικό μοντέλο νευρώνα τεχνητού νευρωνικού δικτύου (Πηγή: [10] Figure 1.5)

Τα τρία βασικά στοιχεία που συνθέτουν το μοντέλο ενός τεχνητού νευρώνα είναι:

1. Ένα σύνολο από συνάψεις ή συνδέσμους (connecting links).  
Κάθε σύναψη χαρακτηρίζεται από ένα βάρος  $w$  (weight). Ένα σήμα εισόδου  $x_j$  στην σύναψη  $j$ , που κατευθύνεται στον νευρώνα  $k$ , πολλαπλασιάζεται με το συναπτικό βάρος  $w_{kj}$ . Ο πρώτος δείκτης του  $w$  δηλώνει τον νευρώνα στον οποίο αντιστοιχεί, ενώ ο δεύτερος δείκτης την αντίστοιχη σύναψη.
2. Έναν αθροιστή  $\Sigma$ .  
Στον αθροιστή γίνεται το αλγεβρικό άθροισμα των εισερχόμενων σημάτων από τις συνάψεις.
3. Μια συνάρτηση ενεργοποίησης  $f(\cdot)$  του νευρώνα (activation function).  
Η συνάρτηση  $f(\cdot)$  προσομοιώνει το δυναμικό ενεργοποίησης του φυσικού νευρώνα. Η  $f(\cdot)$  περιορίζει το σήμα εξόδου του τεχνητού νευρώνα σε μια πεπερασμένη τιμή ή σε ένα εύρος τιμών. Συνήθως το σήμα εξόδου ενός τεχνητού νευρώνα βρίσκεται στο διάστημα  $[0,1]$  ή  $[-1,1]$ .
4. Ένα εξωτερικά εφαρμοσμένο bias,  $b_k$ .  
Το bias προστίθεται στον αθροιστή  $\Sigma$  και έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνει ή να μειώνει συνολικά το σήμα που προέρχεται από τις συνάψεις, πριν φτάσει στην συνάρτηση  $f(\cdot)$ .

Ο τεχνητός νευρώνας περιγράφεται μαθηματικά από τις εξισώσεις:

$$u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot x_j$$

$$y_k = \varphi(u_k + b_k)$$

[10]

#### 4.5 Εφαρμογές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων στην ναυτιλία

α) “Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks”, Ocean Engineering 2017, I.Lazakis, Y.Raptodimos, T.Varelas [11].

Η εργασία αυτή διαπραγματεύεται έναν μεθοδικό τρόπο προσδιορισμού των κρίσιμων συστημάτων του μηχανολογικού εξοπλισμού των πλοίων, καθώς και με την ανάλυση των φυσικών τους παραμέτρων, ώστε να αναπτυχθεί ένα μοντέλο παρακολούθησης και πρόβλεψης, με τελικό σκοπό την πρόληψη βλάβης σε αυτά. Εφαρμόζονται οι μέθοδοι Fault Tree Analysis (FTA) και Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) για τον προσδιορισμό των κρίσιμων παραμέτρων, ενώ στην συνέχεια, γίνεται εφαρμογή πάνω σε ένα containership τύπου Panamax, ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου με αλγόριθμο εκπαίδευσης τον backpropagation Levenberg-Marquardt, που ανήκει στην κατηγορία των time-series αλγορίθμων. Με το νευρωνικό δίκτυο γίνεται πρόβλεψη της θερμοκρασίας των καυσαερίων στους κυλίνδρους της κύριας μηχανής από τα δεδομένα λειτουργίας προηγούμενων ωρών, αναπτύσσοντας έτσι έναν τρόπο παρακολούθησης της κατάστασης των κυλίνδρων σε επίπεδο πρόληψης βλάβης.

β) “Automation of hull plates classification in ship design system using neural network method”, Mechanical Systems and Signal Processing 2006, Soo-Young Kim, Byung-Young Moon, Duk-Eun Kim, Sung Chul Shin [12].

Η εργασία αυτή διαπραγματεύεται μια μέθοδο ταξινόμησης των ελασμάτων του εξωτερικού περιβλήματος της γάστρας των πλοίων, στο στάδιο της προμελέτης, ώστε να είναι εφικτός ο προϋπολογισμός του κόστους κατεργασίας τους, με τελικό σκοπό το κόστος αυτό να είναι δυνατό να αξιολογηθεί. Τα ελάσματα του εξωτερικού περιβλήματος, με κριτήριο τις γεωμετρικές τους ιδιότητες, ταξινομούνται από ένα νευρωνικό δίκτυο τύπου pattern classifier. Οι γεωμετρικές ιδιότητες των ελασμάτων εισάγονται στο νευρωνικό δίκτυο ως μια κατανομή “Gaussian Curvature Distribution”, η ταξινόμηση γίνεται σύμφωνα με τα εκάστοτε κριτήρια που χρησιμοποιεί το ναυπηγείο και τα οποία σχετίζονται με τον βαθμό κατεργασίας που απαιτείται για να πάρουν την τελική μορφή τους.

γ) “Pattern development for vessel accidents: a comparison of statistical and neural computing techniques”, Expert Systems with Applications 2001, L.A. Le Blanca, R.R. Hashemib, C.T. Rucksc [13].

Η εργασία αυτή συγκρίνει μια στατιστική μέθοδο και ένα μοντέλο που προέρχεται από νευρωνικό δίκτυο, ως προς την ικανότητά τους να κατατάσσουν σε ομάδες ατυχήματα πλοίων. Η στατιστική μέθοδος χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο clustering (nearest centroid sorting) για την δημιουργία τριών, τεσσάρων και πέντε, διαδοχικά, ομάδων ατυχημάτων. Το νευρωνικό δίκτυο, που είναι τύπου Kohonen, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των self-organizing maps, δημιουργεί επίσης σεν με τον ίδιο αριθμό ομάδων ατυχημάτων. Το κριτήριο και των δύο μεθόδων είναι να δημιουργήσουν ομάδες ατυχημάτων, οι οποίες να διαφέρουν όσο το δυνατό περισσότερο μεταξύ τους, αλλά ταυτόχρονα να υπάρχει ισχυρή συνοχή των ατυχημάτων σε κάθε ομάδα. Τα αποτελέσματα ελέγχονται με εφαρμογή Multiple Discriminant Analysis (MDA).

δ) "A Neural Network for Transportation Safety Modeling", Expert Systems with Applications 1995, Ray R. Hashemi, Louis A. Le Blanc, Conway T. Rucks, Angela Shearry [14].

Η εργασία αυτή διαπραγματεύεται την ικανότητα ενός νευρωνικού δικτύου ως προς την πρόβλεψη ναυτικών ατυχημάτων. Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται από έναν αλγόριθμο τύπου backpropagation πάνω σε παρελθόντα στατιστικά δεδομένα της περιοχής ελέγχου, όπως είναι η χρονική στιγμή των συμβάντων, οι καιρικές συνθήκες, τα υδάτινα ρεύματα, η κυκλοφορία των πλοίων και ο αριθμός των ατυχημάτων. Οι προβλέψεις, που προέρχονται από το νευρωνικό δίκτυο, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των εφαρμογών Multiple Discriminant Analysis (MDA) και Logistic Regression επί των ίδιων στατιστικών δεδομένων.

## 4.6 Νευρωνικά δίκτυα στην γλώσσα προγραμματισμού MATLAB

Το νευρωνικό δίκτυο που θα χρησιμοποιηθεί για classification των ατυχημάτων των πλοίων PCCs, υλοποιείται στην γλώσσα προγραμματισμού MATLAB, η οποία διαθέτει μια πολύ καλή υποδομή για την ανάπτυξη κώδικα νευρωνικών δικτύων. Τα νευρωνικά δίκτυα που μπορούν να υλοποιηθούν μέσω της MATLAB είναι πάρα πολλά. Ενδεικτικά μόνο αναφέρονται τα πιο δημοφιλή, όπως είναι τα δίκτυα για pattern recognition, clustering, και classification, αλλά και τα πιο σύγχρονα και πλέον διαδεδομένα convolutional neural networks (ConvNets), που χρησιμοποιούνται για voice και image recognition.

Η κατασκευή της βασικής δομής ενός νευρωνικού δικτύου στην MATLAB γίνεται με χρήση συγκεκριμένων εντολών, οι οποίες ενεργοποιούν προκατασκευασμένες ρουτίνες και συναρτήσεις. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι απαραίτητο να γραφεί κώδικας σε επίπεδο low level. Με χρήση εντολών ελέγχου, είναι δυνατή η διαμόρφωση του νευρωνικού δικτύου, σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητες της εφαρμογής, αλλά και για την βελτίωση της επίδοσής του. Κάθε δίκτυο έχει ενσωματωμένα κριτήρια ελέγχου επίδοσης (performance functions) και διαγράμματα παρουσίασης αυτών.

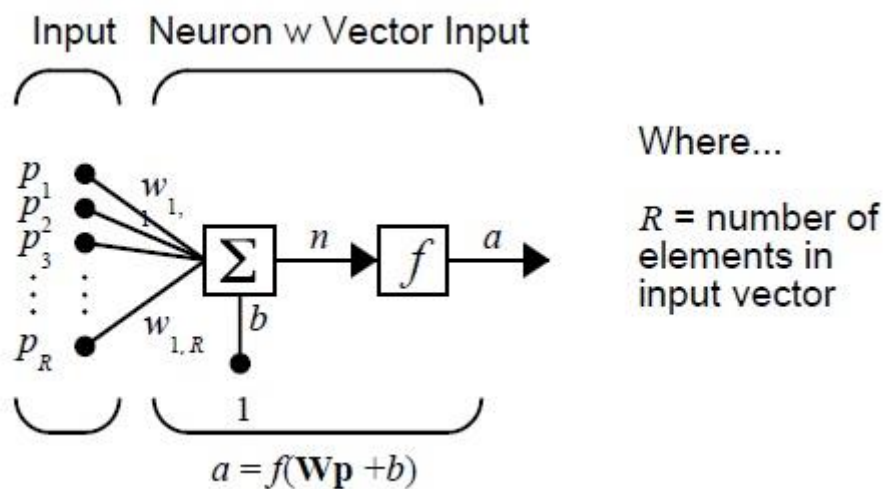
Ένας απλός νευρώνας, όπως υλοποιείται στην MATLAB, φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 47. Αποτελείται από την είσοδο (input), τον αθροιστή  $\Sigma$  και την συνάρτηση  $f(\cdot)$ , η οποία εδώ ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς (transfer function), αντί για συνάρτηση ενεργοποίησης.

Το σήμα εισόδου είναι ένα διάνυσμα  $\mathbf{P}(p_1, p_2, \dots, p_R)$ . Σε κάθε στοιχείο  $p_i$  του  $\mathbf{P}$ , αντιστοιχεί ένα βάρος  $w_{1,i}$ . Επίσης ο νευρώνας διαθέτει και bias,  $b$ , με τιμή σήματος εισόδου πάντα την μονάδα (1). Αν δεν είναι επιθυμητή η ύπαρξη bias, υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί  $b=0$ .

Στον αθροιστή  $\Sigma$  εκτελείται ο υπολογισμός του σήματος  $n$  (βαθμωτό μέγεθος):

$$n = w_{1,1} \cdot p_1 + w_{1,2} \cdot p_2 + \dots + w_{1,R} \cdot p_R + b \cdot 1 \quad (5.4.1)$$

Στην συνέχεια, το σήμα  $n$  θα ενεργοποιήσει την συνάρτηση μεταφοράς  $f(\cdot)$  και θα υπολογιστεί η τιμή της εξόδου  $a$  του νευρώνα, που είναι βαθμωτό μέγεθος.



Σχήμα 47: Απλός νευρώνας νευρωνικού δικτύου της MATLAB (Πηγή: [15])

Η σχέση υπολογισμού της τιμής της εξόδου  $a$  είναι:

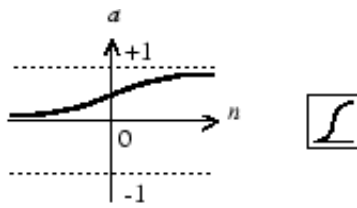
$$a = f(\mathbf{W} \cdot \mathbf{P} + b) \quad (5.4.2)$$

όπου  $\mathbf{W}$  είναι ο πίνακας γραμμή  $1 \times R$  των βαρών του νευρώνα με στοιχεία  $w_{1,i}$ . Ο δείκτης 1 ενημερώνει ότι τα βάρη αντιστοιχούν στον πρώτο νευρώνα του νευρωνικού δικτύου.

Η συνάρτηση μεταφοράς  $f(\cdot)$  είναι το σημαντικότερο τμήμα ενός τεχνητού νευρώνα, γιατί προσομοιώνει την λειτουργία του άξονα ενός πραγματικού νευρώνα. Η  $f(\cdot)$  υπολογίζει το σήμα που θα μεταδοθεί στον επόμενο νευρώνα και ταυτόχρονα περιορίζει την τιμή του σε ένα προεπιλεγμένο εύρος.

Μερικές από τις πιο σημαντικές συναρτήσεις μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται ευρέως σε νευρωνικά δίκτυα, είναι:

- Λογαριθμική σιγμοειδής συνάρτηση (log-sigmoid):

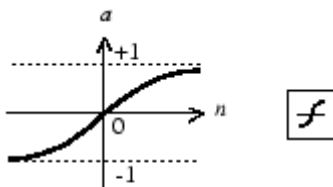


$$a = \text{logsig}(n)$$

Log-Sigmoid Transfer Function

Η συνάρτηση log-sig έχει πεδίο τιμών μεταξύ 0 και 1.

- Εφαπτομενική σιγμοειδής συνάρτηση (tan-sigmoid):

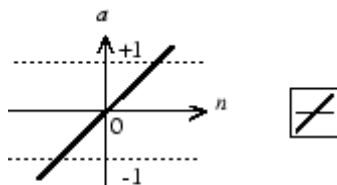


$$a = \text{tansig}(n)$$

Tan-Sigmoid Transfer Function

Η συνάρτηση tan-sig έχει πεδίο τιμών μεταξύ -1 και 1.

- Γραμμική συνάρτηση (purelin):



$$a = \text{purelin}(n)$$

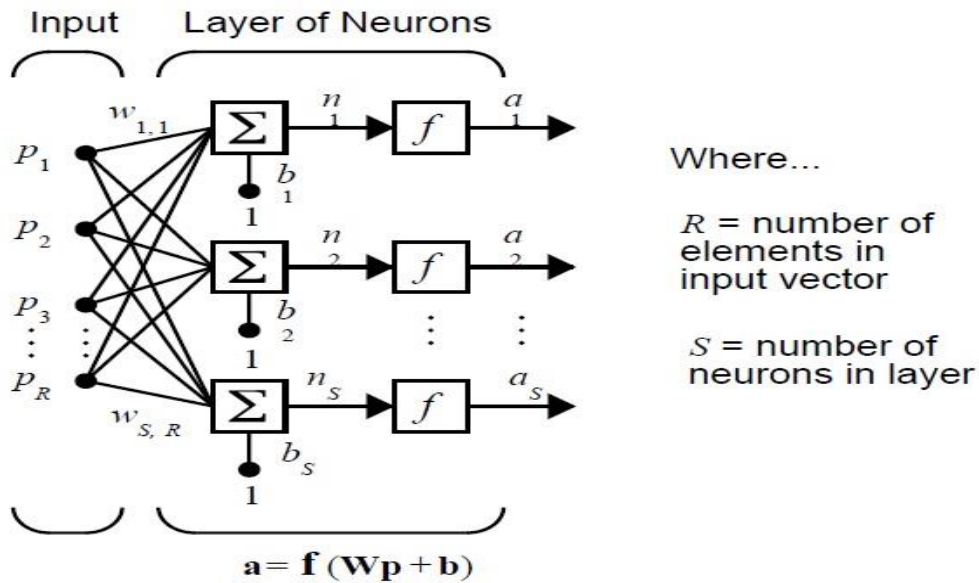
Linear Transfer Function

Η συνάρτηση purelin έχει πεδίο τιμών το σύνολο των πραγματικών αριθμών.

Οι συναρτήσεις αυτές είναι όλες παραγωγίσιμες και οι δύο πρώτες χρησιμοποιούνται συνήθως σε δίκτυα για classification, ενώ η τελευταία σε δίκτυα παρεμβολής συναρτήσεων (function fitting neural networks).

Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου της MATLAB, με ένα επίπεδο (layer) νευρώνων, φαίνεται στο Σχήμα 48.





Where...

$R$  = number of elements in input vector

$S$  = number of neurons in layer

Σχήμα 48: Νευρωνικό δίκτυο της MATLAB με ένα επίπεδο νευρώνων (One layer neural network) (Πηγή: [15])

Το δίκτυο αποτελείται από  $S$  σε πλήθος νευρώνες που λειτουργούν παράλληλα. Το σήμα εισόδου  $\mathbf{P}(p_1, p_2, \dots, p_R)$  εισέρχεται σε κάθε ένα νευρώνα ξεχωριστά. Κάθε νευρώνας έχει τα δικά του βάρη για κάθε στοιχείο του  $\mathbf{P}$ . Σε αυτή την περίπτωση ο πίνακας βαρών  $\mathbf{W}$  είναι ένας  $S \times R$  πίνακας.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & \dots & w_{1,R} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{S,1} & \dots & w_{S,R} \end{bmatrix}$$

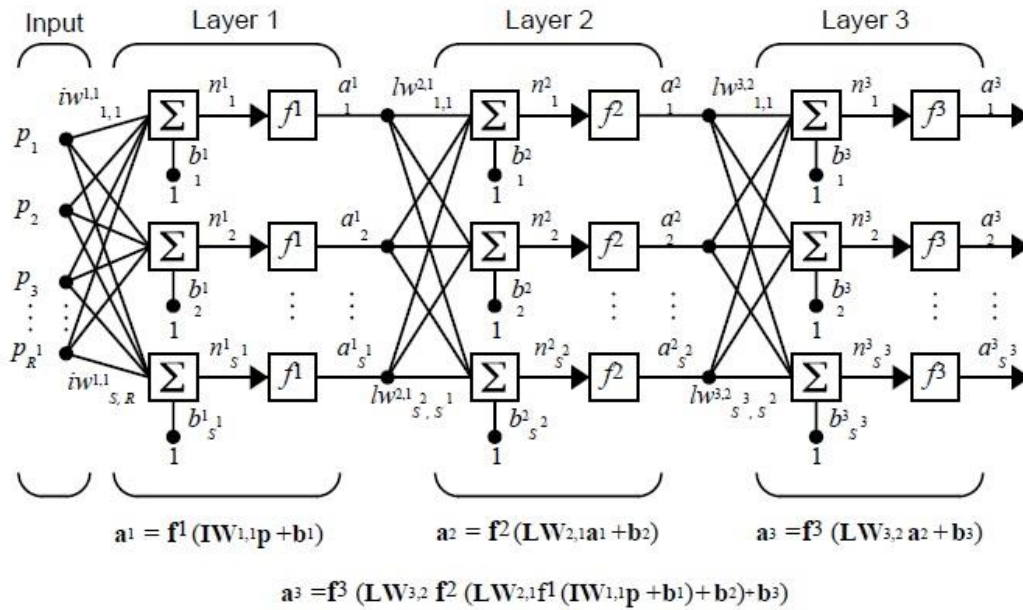
Τα στοιχεία κάθε γραμμής του πίνακα  $\mathbf{W}$  αντιστοιχούν στα βάρη κάθε νευρώνα του δικτύου. Για παράδειγμα το  $w_{i,j}$  είναι το βάρος του νευρώνα  $i$  για το στοιχείο του σήματος εισόδου  $p_j$ , όπου  $i \in \{1, 2, \dots, S\}$  και  $j \in \{1, 2, \dots, R\}$ .

Για κάθε νευρώνα η τιμή  $n_i$  υπολογίζεται με την σχέση 5.4.1. Η συνάρτηση μεταφοράς  $f(\cdot)$  είναι ίδια για κάθε νευρώνα και το σήμα εξόδου  $a_i$  από τον κάθε ένα υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση 5.4.2.

Το δίκτυο έχει συνολικό σήμα εξόδου το διάνυσμα  $\mathbf{a}$  που υπολογίζεται από την σχέση:

$$\mathbf{a} = \mathbf{f}(\mathbf{W}\mathbf{p} + \mathbf{b}) \quad (5.4.3)$$

Κατά αντίστοιχο τρόπο, η αρχιτεκτονική ενός πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου (multilayer neural network), φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 49, όπου παρουσιάζεται ένα δίκτυο με τρία επίπεδα νευρώνων.



Σχήμα 49: Νευρωνικό δίκτυο της MATLAB με 3 επίπεδα νευρώνων (3-layer feedforward neural network) (Πηγή: [15])

Νευρωνικά δίκτυα όπως αυτό του Σχήματος 49, ανήκουν στην κατηγορία των feedforward, στα οποία τα σήματα εξόδου του πρώτου επιπέδου νευρώνων γίνονται σήματα εισόδου για το δεύτερο επίπεδο κ.ο.κ. Αν  $S^1, S^2, S^3$  ο αριθμός των νευρώνων κάθε επιπέδου, τότε το δίκτυο, εν συντομία, καλείται " $S^1$ - $S^2$ - $S^3$ ". Ο αριθμός των νευρώνων κάθε επιπέδου του δικτύου μπορεί να είναι διαφορετικός και συνήθως είναι φθίνων, δηλαδή είναι:  $S^1 > S^2 > S^3$ . Τα επίπεδα των νευρώνων του δικτύου καλούνται κρυφά επίπεδα (hidden layers), ενώ το τελευταίο, στο οποίο εξάγεται το αποτέλεσμα του δικτύου, λέγεται επίπεδο εξόδου (output layer). Για το παράδειγμα του σχήματος 49, τα κρυφά επίπεδα είναι τα 1 και 2, ενώ το 3, είναι το επίπεδο εξόδου. Τα επίπεδα των νευρώνων μπορεί να έχουν την ίδια ή διαφορετική συνάρτηση μεταφοράς  $f(\cdot)$ .

Το σήμα εξόδου από κάθε επίπεδο, κατά αντιστοιχία με την σχέση 5.4.3, δίνεται από:

$$\mathbf{a}^1 = \mathbf{f}^1(\mathbf{I} \cdot \mathbf{W}^{1,1} \cdot \mathbf{P} + \mathbf{b}^1) \quad (5.4.4)$$

$$\mathbf{a}^2 = \mathbf{f}^2(\mathbf{L} \cdot \mathbf{W}^{2,1} \cdot \mathbf{a}^1 + \mathbf{b}^2) \quad (5.4.5)$$

$$\mathbf{a}^3 = \mathbf{f}^3(\mathbf{L} \cdot \mathbf{W}^{3,2} \cdot \mathbf{a}^2 + \mathbf{b}^3) \quad (5.4.6)$$

Το συνολικό σήμα εξόδου του νευρωνικού δικτύου προέρχεται από τον συνδιασμό των σχέσεων 5.4.4, 5.4.5, και 5.4.6 και είναι:

$$\mathbf{a}^3 = \mathbf{f}^3(\mathbf{L} \cdot \mathbf{W}^{3,2} \cdot \mathbf{f}^2(\mathbf{L} \cdot \mathbf{W}^{2,1} \cdot \mathbf{f}^1(\mathbf{I} \cdot \mathbf{W}^{1,1} \cdot \mathbf{P} + \mathbf{b}^1) + \mathbf{b}^2) + \mathbf{b}^3) \quad (5.4.7)$$

Η εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων γίνεται με την βοήθεια των συναρτήσεων εκπαίδευσης (Train Functions). Οι συναρτήσεις εκπαίδευσης βασίζονται σε αλγόριθμους, οι οποίοι έχουν ως στόχο την μεταβολή των βαρών κάθε πίνακα  $\mathbf{W}$  και  $\mathbf{b}$  του δικτύου. Στα δίκτυα

που προορίζονται για classification, κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης, γίνεται σύγκριση του διανύσματος εξόδου με το διάνυσμα που προέρχεται από τα πραγματικά δεδομένα. Ο αλγόριθμος εφαρμόζει ένα μέτρο σύγκρισης αυτών των δύο διανυσμάτων και ανάλογα μεταβάλλει τις τιμές των  $\mathbf{W}$  και  $\mathbf{b}$  σε κάθε επίπεδο νευρώνων, ώστε τελικά η έξοδος του δικτύου να συγκλίνει στο πραγματικό διάνυσμα. Αυτός ο τρόπος εκπαίδευσης ονομάζεται supervised learning και ολοκληρώνεται με επαναλήψεις, όπου σε κάθε μια επανάληψη έχει συγκριθεί το σύνολο των δεδομένων. Η επαναληπτική διαδικασία σταματά, έχοντας θέσει εξ'αρχής έναν μέγιστο αριθμό επαναλήψεων ή ένα αποδεκτό κριτήριο σύγκλισης. [15]

#### **4.7 Επιλογή δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή του νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης των ατυχημάτων**

Είναι απαραίτητο τα δεδομένα, που θα χρησιμοποιηθούν ως σήμα εισόδου του νευρωνικού δικτύου, να εξεταστούν ως προς την ανεξαρτησία τους σε σχέση με τον τύπο του ατυχήματος. Δηλαδή, να ελεγχθεί αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους ή όχι. Προφανώς, γενικά για τέτοιου είδους εφαρμογές, ενδιαφέρει ιδιαίτερα να υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου.

Ο έλεγχος της ανεξαρτησίας των δεδομένων θα πραγματοποιηθεί με τον στατιστικό έλεγχο ανεξαρτησίας  $\chi^2$  (chi-square test of independence). Ο έλεγχος αυτός ανήκει στην οικογένεια των μη παραμετρικών στατιστικών μεθόδων ελέγχου υποθέσεων. Αυτοί οι έλεγχοι υποθέσεων, έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν προϋποθέτουν γνώση της μορφής της κατανομής του πληθυσμού από τον οποίο έχουν προέλθει τα δεδομένα και εφαρμόζονται όχι σε αυτές καθ'εαυτές τις τιμές των μεταβλητών, αλλά στις τάξεις μεγέθους τους, σε αντίθεση με την παραμετρική στατιστική, της οποίας οι μεθοδολογίες στηρίζονται στην συναρτησιακή μορφή της κατανομής του πληθυσμού.

Οι μη παραμετρικές στατιστικές μέθοδοι ελέγχου υποθέσεων διαθέτουν ένα αρκετά μεγάλο πλήθος τεστ μέσω των οποίων εξετάζονται διάφοροι παράμετροι των δεδομένων του πληθυσμού. Για παράδειγμα υπάρχουν τεστ όπου εξετάζεται η τυχαιότητα (τεστ των ροών Wald and Wolfowitz), η ύπαρξη γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών (συντελεστής συσχέτισης Pearson), τα τεστ Kolmogorov-Smirnov και Kramer-von Mises, στα οποία εξετάζεται η καλή προσαρμογή (goodness of fitness) των δεδομένων σε συγκεκριμένο μοντέλο, το τεστ Kruskal and Wallis, όπου ελέγχεται αν, τρία ή περισσότερα δείγματα προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό και πολλά άλλα. [16]

### 4.7.1 Στατιστικός έλεγχος ανεξαρτησίας $\chi^2$

Πολύ συχνά σε δειγματοληπτικές έρευνες ένα χαρακτηριστικό του δείγματος ταξινομείται και ως προς ένα δεύτερο. Έτσι προκύπτουν διδιάστατα δεδομένα (bivariate data), τα οποία παρουσιάζονται σε διδιάστατους πίνακες συχνοτήτων, που ονομάζονται πίνακες συνάφειας. Μέσω της διδιάστατης κατανομής συχνοτήτων ενός πίνακα συνάφειας μπορεί να ελεγχθεί αν τα δύο χαρακτηριστικά, τα οποία και ορίζουν τις διαστάσεις του πίνακα αυτού, έχουν κάποια συνάφεια/εξάρτηση ή είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Στην συνέχεια ακολουθεί, εν συντομία, η θεωρία του στατιστικού ελέγχου ανεξαρτησίας  $\chi^2$ .

Έστω ένα τυχαίο δείγμα  $n$  παρατηρήσεων  $(A_i, B_j)$ , που προέκυψαν από την ταξινόμηση  $n$  πειραματικών/δειγματοληπτικών μονάδων ως προς δύο χαρακτηριστικά  $A$  και  $B$ , από τα οποία, το  $A$  μπορεί να πάρει  $r \geq 2$  διαφορετικές τιμές (κατηγορίες),  $A_1, A_2, \dots, A_r$ , και το  $B$  μπορεί να πάρει  $c \geq 2$  διαφορετικές τιμές (κατηγορίες),  $B_1, B_2, \dots, B_c$ .

Η ανεξαρτησία των  $A$  και  $B$  ορίζεται μέσω της έννοιας της ανεξαρτησίας ενδεχομένων.

Αν θεωρήσουμε τα ενδεχόμενα:

$A_i$ : μια πειραματική μονάδα ταξινομείται στην κατηγορία  $A_i$  του χαρακτηριστικού  $A$

$B_j$ : μια πειραματική μονάδα ταξινομείται στην κατηγορία  $B_j$  του χαρακτηριστικού  $B$

τότε, τα χαρακτηριστικά  $A$  και  $B$  είναι ανεξάρτητα, αν τα ενδεχόμενα  $A_i$  και  $B_j$  είναι ανεξάρτητα για κάθε  $i = 1, 2, \dots, r$  και  $j = 1, 2, \dots, c$ , δηλαδή αν ισχύει:

$$P(A_i \cap B_j) = P(A_i)P(B_j) \text{ για όλα τα } i \text{ και } j,$$

ή ισοδύναμα,

$$P(A_i | B_j) = P(A_i) \text{ για όλα τα } i \text{ και } j$$

Αυτό σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά  $A$  και  $B$  είναι ανεξάρτητα αν, για όλα τα  $i$  και  $j$ , η πιθανότητα μια παρατήρηση να ανήκει στην κατηγορία  $A_i$  του χαρακτηριστικού  $A$  δεν εξαρτάται/δεν επηρεάζεται από την κατηγορία  $B_j$  του χαρακτηριστικού  $B$  στην οποία ανήκει.

Ισοδύναμα, αν, για όλα τα  $i$  και  $j$ , η πιθανότητα μια παρατήρηση να ανήκει στην κατηγορία  $B_j$  του χαρακτηριστικού  $B$  δεν εξαρτάται/δεν επηρεάζεται από την κατηγορία  $A_i$  του χαρακτηριστικού  $A$  στην οποία ανήκει, αφού ισοδύναμη με τις παραπάνω σχέσεις είναι επίσης η σχέση  $P(B_j | A_i) = P(B_j)$ .

Τα ενδεχόμενα  $A_1, A_2, \dots, A_r$  αποτελούν μια διαμέριση του δειγματικού χώρου του πειράματος, αφού κάθε πειραματική μονάδα ταξινομείται σε μια από τις κατηγορίες  $A_i$  και μάλιστα ακριβώς σε μία και έτσι ισχύει:

$$\bigcup_{i=1}^r A_i = \Omega \text{ και } A_i \cap A_j = \emptyset \text{ για κάθε } i \neq j$$

Αντίστοιχα, τα  $B_1, B_2, \dots, B_c$  αποτελούν επίσης μια άλλη διαμέριση του δειγματικού χώρου του πειράματος.

Αν συμβολίσουμε με  $p_i$  την πιθανότητα  $P(A_i)$  μια πειραματική μονάδα να ταξινομηθεί στην κατηγορία  $A_i$  του χαρακτηριστικού  $A$  και με  $q_j$  την πιθανότητα  $P(B_j)$  μια πειραματική μονάδα να ταξινομηθεί στην κατηγορία  $B_j$  του χαρακτηριστικού  $B$ . Έστω δηλαδή,

$$p_i = P(A_i) \text{ και } q_j = P(B_j)$$

Έστω, επίσης ότι

$$p_{ij} = P(A_i \cap B_j)$$

η πιθανότητα μια πειραματική μονάδα να ταξινομηθεί στην κατηγορία  $A_i$  του χαρακτηριστικού  $A$  και (συγχρόνως) στην κατηγορία  $B_j$  του χαρακτηριστικού  $B$ .

Για να ελέγξουμε αν τα χαρακτηριστικά  $A$  και  $B$  είναι ανεξάρτητα, πρέπει προφανώς, να κάνουμε τον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης

$$H_0: p_{ij} = p_i \cdot q_j \text{ για κάθε } i \text{ και } j$$

έναντι της εναλλακτικής,

$$H_1: p_{ij} \neq p_i \cdot q_j \text{ για τουλάχιστον ένα } i \text{ και } j$$

Αν  $X_{ij}$ ,  $i=1,2, \dots, r$ ,  $j=1, 2, \dots, c$  τυχαίες μεταβλητές, που η κάθε μια εκφράζει τον αριθμό των παρατηρήσεων που ανήκουν στην αντίστοιχη κατηγορία  $(A_i, B_j)$ , είναι προφανές ότι έχουν από κοινού μια *πολυωνυμική κατανομή* με παραμέτρους  $v$  και  $p_{ij} = P(A_i \cap B_j)$ , όπου

$$i = 1, 2, \dots, r \text{ και } j = 1, 2, \dots, c.$$

Αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης  $H_0: p_{ij} = p_i \cdot q_j$  για κάθε  $i$  και  $j$  είναι ένας έλεγχος των παραμέτρων  $p_{ij}$  μιας πολυωνυμικής κατανομής.

Για κάθε δυνατή κατηγορία  $(A_i, B_j)$ , η παρατηρηθείσα συχνότητα,  $O_{ij}$  (η τιμή της  $X_{ij}$  στο δείγμα), μας είναι γνωστή. Η αντίστοιχη, με βάση τη μηδενική υπόθεση, αναμενόμενη συχνότητα  $E_{ij}$  προφανώς είναι

$$E_{ij} = v \cdot p_{ij} = v \cdot p_i q_j$$

Επειδή, κατά κανόνα, οι πιθανότητες  $p_i$ ,  $i=1,2, \dots, r$  και  $q_j$ ,  $j=1,2, \dots, c$  δεν είναι γνωστές, τις εκτιμάμε με τα δειγματικά ποσοστά:

$$\hat{p}_i = \frac{R_i}{v} \text{ και } \hat{p}_j = \frac{C_j}{v}$$

όπου,  $R_i$  το άθροισμα των στοιχείων της γραμμής  $i$  του πίνακα συνάφειας,  $C_j$  το άθροισμα των στοιχείων της στήλης  $j$  του πίνακα συνάφειας και  $v$  το μέγεθος του δείγματος.

Έτσι, οι *εκτιμώμενες αναμενόμενες συχνότητες* είναι:

$$\hat{E}_{ij} = v \hat{p}_i \hat{p}_j = v \frac{R_i}{v} \frac{C_j}{v} = \frac{R_i C_j}{v}$$

Ως στατιστική συνάρτηση ελέγχου (εύλογα) χρησιμοποιούμε τη στατιστική συνάρτηση  $\chi^2$  με

$$\chi^2 = \sum_{\forall ij} \frac{(O_{ij} - \hat{E}_{ij})^2}{\hat{E}_{ij}}$$

Με την παραδοχή ότι η μηδενική υπόθεση είναι αληθής, αποδεικνύεται ότι η τυχαία μεταβλητή  $\chi^2$ , για μεγάλα  $n$  ακολουθεί μια  $\chi^2$  κατανομή με  $(r-1)(c-1)$  βαθμούς ελευθερίας.

Έτσι, συνοψίζοντας, ο έλεγχος ανεξαρτησίας  $\chi^2$  αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

Σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$ , η μηδενική υπόθεση  $H_0: p_{ij} = p_i \cdot q_j$  για κάθε  $i$  και  $j$  απορρίπτεται έναντι της εναλλακτικής  $H_1: p_{ij} \neq p_i \cdot q_j$  για τουλάχιστον ένα  $i$  και  $j$ , αν

$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{(O_{ij} - \hat{E}_{ij})^2}{\hat{E}_{ij}} > \chi^2_{(r-1)(c-1); \alpha}$$

Συνήθως επιλέγεται επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=0.05$  (ή 5%).

Το επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$  έχει σκοπό να εξασφαλίσει να μην γίνει σφάλμα τύπου I, δηλαδή να απορριφθεί η υπόθεση  $H_0$ , ενώ στην πραγματικότητα είναι αληθής. Πρακτικά, το επίπεδο σημαντικότητας περιγράφει ένα μέγιστο ανεκτό επίπεδο σφάλματος τύπου I, που στην περίπτωση  $\alpha=0.05$ , σημαίνει ότι υπάρχει μόνο 5% ενδεχόμενο η  $H_0$  να μην είναι αληθής.

Η τιμή σημαντικότητας (p-value) του δείγματος είναι η πιθανότητα να εμφανιστεί η τιμή της στατιστικής συνάρτησης ελέγχου που εμφανίστηκε, ή κάποια πιο ακραία τιμή από αυτή, προς την κατεύθυνση της  $H_1$ , με δεδομένο ότι η  $H_0$  είναι αληθής. Όσο πιο μικρή είναι η p-value, τόσο ισχυρότερες ενδείξεις εναντίον της  $H_0$  προκύπτουν από το συγκεκριμένο τυχαίο δείγμα, ή αλλιώς τόσο πιο σημαντική είναι η τιμή της στατιστικής συνάρτησης ελέγχου που δίνει το δείγμα.

Άρα, αν  $p\text{-value} \leq \alpha$ , τότε, σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$ , η  $H_0$  απορρίπτεται και

αν  $p\text{-value} > \alpha$ , τότε, σε επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha$ , η  $H_0$  δεν απορρίπτεται.

[17]

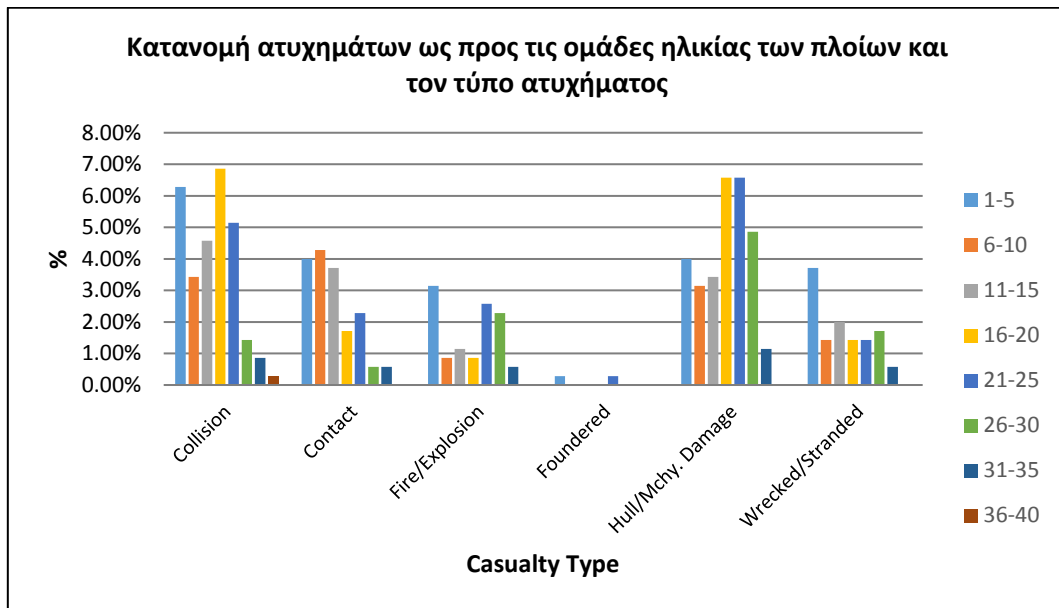
#### 4.7.2 Αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου ανεξαρτησίας $\chi^2$

Οι μεταβλητές που εξετάζονται ως προς την αλληλεπίδρασή τους με τον τύπο ατυχήματος, είναι οι εξής:

- Ηλικία πλοίου, ταξινομημένη σε ομάδες ηλικίας με εύρος τα πέντε έτη,
- GT (Gross Tonnage),
- Χωρητικότητα οχημάτων (Vehicles),
- Γεωγραφική ζώνη ατυχήματος (Zone),
- Χώρα κατασκευής του πλοίου (Country of Built),
- Σημαία του πλοίου (Flag).

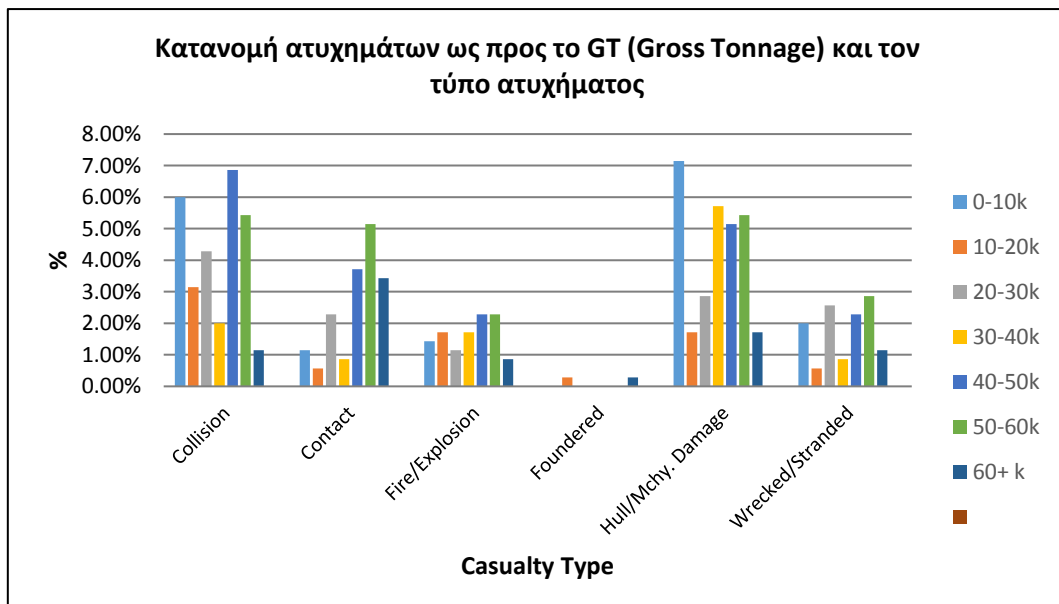
Ακολουθούν τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου ανεξαρτησίας  $\chi^2$  για κάθε μία από τις παραπάνω μεταβλητές, ως προς τον τύπο ατυχήματος.

## Ηλικία πλοίου



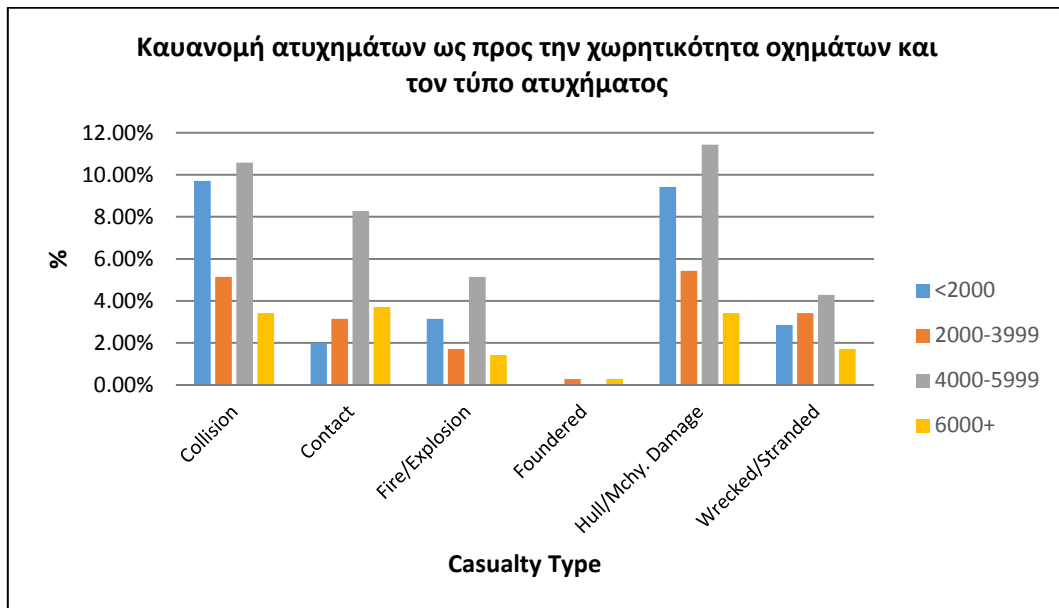
Σχήμα 50: Κατανομή ατυχημάτων ως προς τις ομάδες ηλικίας των πλοίων (Ships' Age) και τον τύπο του ατυχήματος (Casualty Type)

## GT (Gross Tonnage)



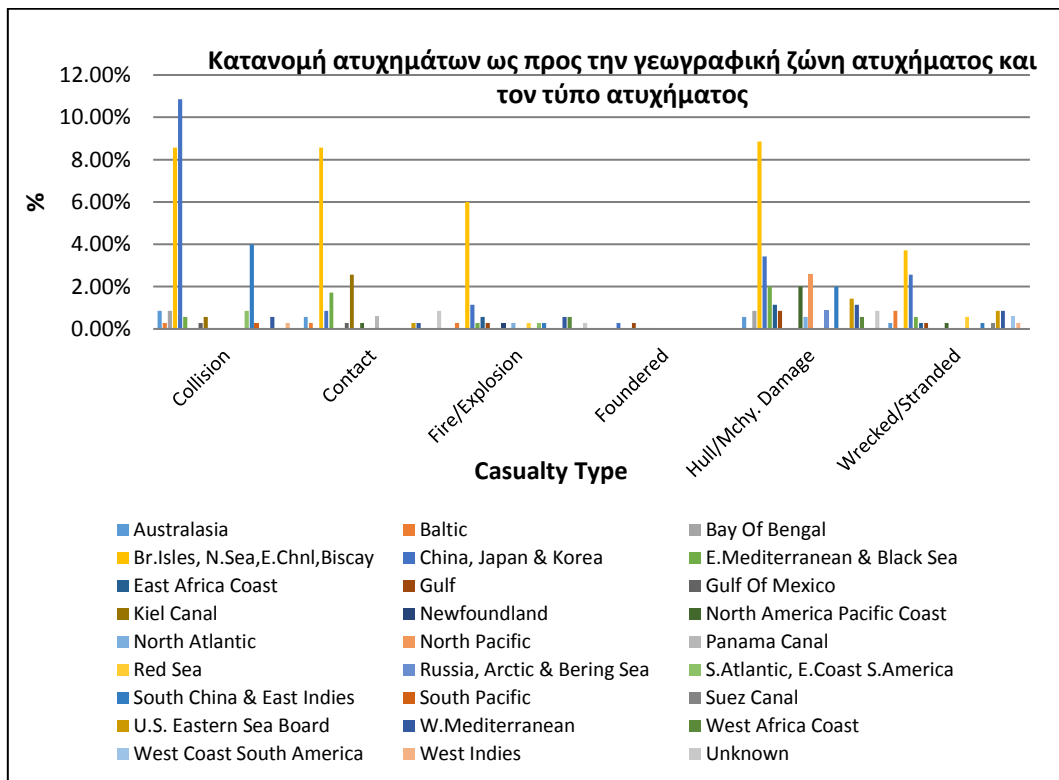
Σχήμα 51: Κατανομή ατυχημάτων ως προς το GT (Gross Tonnage) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type)

## Χωρητικότητα οχημάτων (Vehicles)



Σχήμα 52: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την χωρητικότητα οχημάτων (Vehicles) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type)

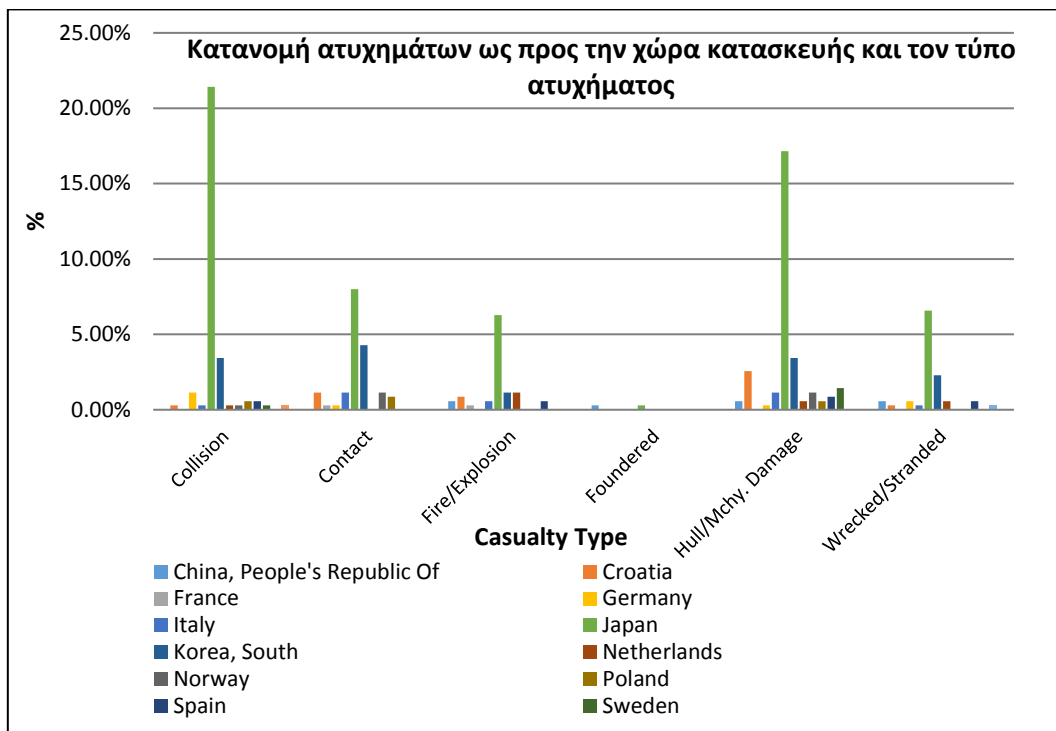
## Γεωγραφική ζώνη ατυχήματος (Zone)



Σχήμα 53: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την γεωγραφική ζώνη ατυχήματος (Zone) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type)

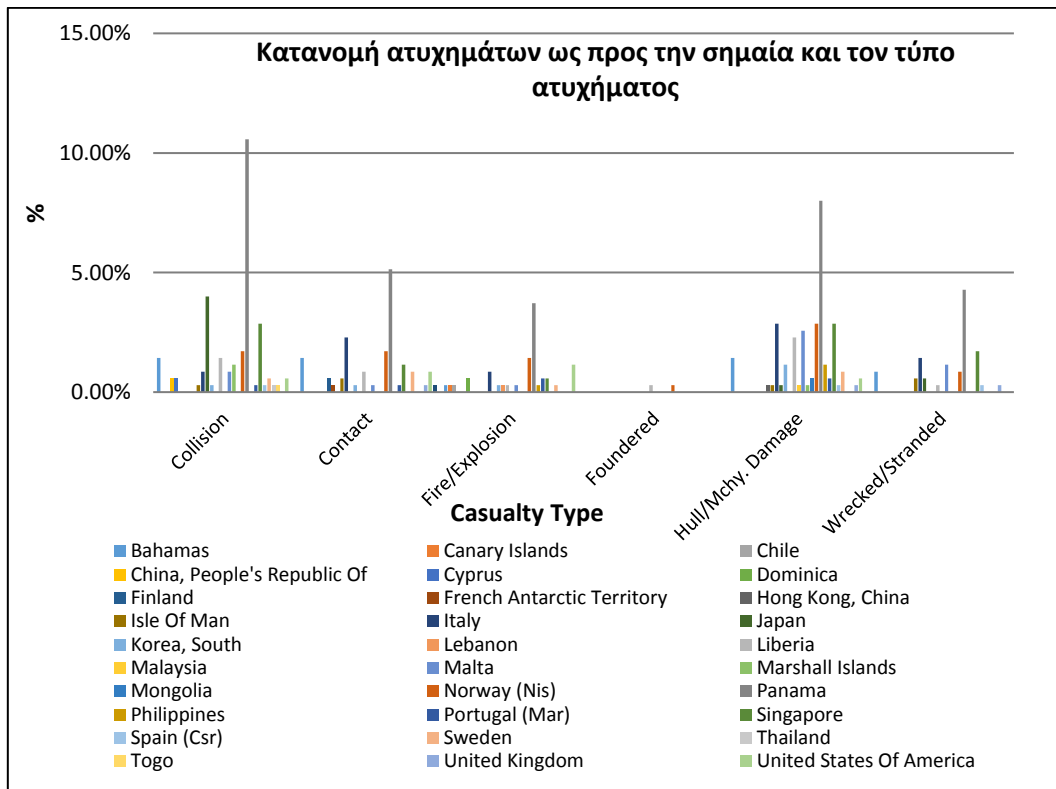


Χώρα κατασκευής του πλοίου (Country of Built)



Σχήμα 54: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την χώρα κατασκευής (Country of Built) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type)

Σημαία του πλοίου (Flag)



Σχήμα 55: Κατανομή ατυχημάτων ως προς την σημαία του πλοίου (Flag) και τον τύπο ατυχήματος (Casualty Type)

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατιστικού ελέγχου  $\chi^2$

Μεταβλητή	Βαθμοί ελευθερίας	$\chi^2$	P-value		
Ηλικία πλοίου	35	47.335	0.079349	>0.05	Ανεξάρτητη με τον τύπο ατυχήματος
GT	30	55.465	0.003144	<0.05	Εξαρτημένη με τον τύπο ατυχήματος
Vehicles	15	19.642	0.1861	>0.05	Ανεξάρτητη με τον τύπο ατυχήματος
Zone	130	282.949	0.00001	<0.05	Εξαρτημένη με τον τύπο ατυχήματος
Country of Built	65	107.718	0.000689	<0.05	Εξαρτημένη με τον τύπο ατυχήματος
Flag	150	185.036	0.027346	<0.05	Εξαρτημένη με τον τύπο ατυχήματος

Επομένως, οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν ως σήμα εισόδου του νευρωνικού δικτύου είναι:

- Gross Tonnage (GT)
- Γεωγραφική Ζώνη Ατυχήματος (Zone)
- Χώρα Κατασκευής του πλοίου (Country of Built)
- Σημαία του πλοίου (Flag)

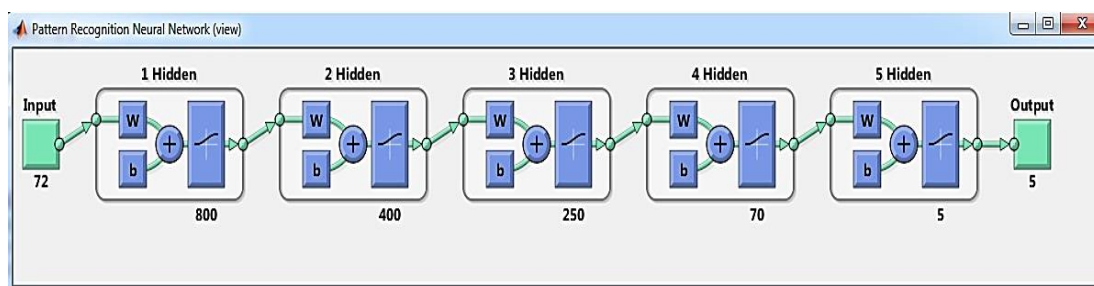
#### 4.8 Το νευρωνικό δίκτυο για Classification ατυχημάτων πλοίων PCCs

Στην περίπτωση των ατυχημάτων των πλοίων PCCs, τα attributes που θα χρησιμοποιηθούν είναι κατά μεγάλη αναλογία κατηγορικά (Zone, Country of Built, και Flag). Επίσης, θα χρησιμοποιηθεί και το Gross Tonnage, που δεν είναι κατηγορικό μέγεθος. Επομένως, επιλέγεται να γίνει ανάλυση των ατυχημάτων με την τεχνική της Ταξινόμησης. Ο στόχος είναι να βρεθεί ένα πρότυπο ταξινόμησης ως προς το target class: “Casualty Type”.

Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί ανήκει στην κατηγορία ταξινόμησης “Classification by Backpropagation” και εφαρμόζεται κυρίως σε νευρωνικά δίκτυα τύπου “multilayer feedforward neural networks”. Το μοντέλο ταξινόμησης βρίσκεται μετά από επαναλήψεις, όπου σε κάθε μια ο αλγόριθμος συγκρίνει την τιμή στην έξοδο του νευρωνικού δικτύου με την τιμή του target class και μεταβάλλει τις παραμέτρους του δικτύου μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση.

Επομένως, για την ταξινόμηση (classification) των ατυχημάτων των πλοίων PCCs, κατασκευάστηκε ένα νευρωνικό δίκτυο που ανήκει στην κατηγορία των multilayer feedforward neural networks. Το δίκτυο αποτελείται από πέντε (5) διαδοχικά hidden layers νευρώνων. Το τελευταίο (5<sup>ο</sup>) layer είναι εκείνο στο οποίο παράγεται η έξοδος του δικτύου (output layer). Οι νευρώνες κάθε layer είναι σε παράλληλη διάταξη και όλοι περιέχουν την ίδια συνάρτηση μεταφοράς, logsig, η οποία επιλέχθηκε γιατί περιορίζει το σήμα εξόδου στο διάστημα [0,1] που συνεισφέρει, όπως θα φανεί στην συνέχεια, στην καλή σύγκλιση του αλγόριθμου εκπαίδευσης. Επειδή είναι ένα νευρωνικό δίκτυο για classification, ο αριθμός των νευρώνων από layer σε layer είναι φθίνων και το output layer περιέχει μόνο πέντε (5) νευρώνες, αριθμός που ισούται με τον αριθμό των διαφορετικών τύπων ατυχημάτων.

Το νευρωνικό δίκτυο εικονίζεται μέσα στην MATLAB όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8: Εφαρμογή νευρωνικού δικτύου στην MATLAB για Classification ατυχημάτων πλοίων PCCs (Πηγή: MATLAB 2017a)

Ο στόχος του νευρωνικού δικτύου είναι να δημιουργήσει ένα μοντέλο ταξινόμησης ως προς τον τύπο των ατυχημάτων των πλοίων PCCs (target class). Τα δεδομένα των ατυχημάτων εισάγονται στο δίκτυο σε διανυσματική μορφή. Για κάθε ένα ατύχημα δημιουργείται ένα σήμα εισόδου, διάνυσμα  $X_i$  και ένα διάνυσμα στόχος,  $T_i$ . Το δίκτυο με βάση το σήμα  $X_i$ , κατασκευάζει ένα σήμα εξόδου, διάνυσμα  $Y_i$ , όπου  $i=\{1,2,\dots,341\}$ . Συνολικά για την κατασκευή των διανυσμάτων  $X_i$  και  $T_i$  χρησιμοποιούνται 341 ατυχήματα πλοίων PCCs και έτσι προκύπτει το εύρος του δείκτη  $i$ .

Σημειώνεται ότι, από το σύνολο των 350 ατυχημάτων αφαιρέθηκαν 7 ατυχήματα λόγω έλλειψης πληρότητας δεδομένων και 2 ατυχήματα που είχαν ως τύπο ατυχήματος την βύθιση (Foundered), γιατί εξαιτίας του πολύ μικρού ποσοστού τους (0.57%) ως προς το σύνολο των ατυχημάτων, κατέστρεφαν το μοντέλο ταξινόμησης σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το νευρωνικό δίκτυο.

Το διάνυσμα  $X_i$  αποτελείται από τέσσερις συνιστώσες, οι οποίες είναι τα attributes:

- Gross Tonnage (GT)
- Γεωγραφική Ζώνη Ατυχήματος (Zone)
- Χώρα Κατασκευής του πλοίου (Country of Built)
- Σημαία του πλοίου (Flag)

Η πρώτη συνιστώσα, Gross Tonnage, είναι συνεχής και εισάγεται για κάθε ατύχημα με την αριθμητική της τιμή στο  $X_i$ .

Οι υπόλοιπες τρεις συνιστώσες, Γεωγραφική Ζώνη Ατυχήματος (Zone), Χώρα Κατασκευής του πλοίου (Country of Built) και Σημαία του πλοίου (Flag) είναι κατηγορικές. Για να εισαχθούν στο νευρωνικό δίκτυο με τρόπο που να ερμηνευτούν σωστά κατά την διαδικασία κατασκευής του μοντέλου ταξινόμησης, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Για κάθε ένα ατύχημα, κάθε μια συνιστώσα αποτελεί ένα ξεχωριστό διάνυσμα.

Έστω  $Z$  το διάνυσμα της Zone,  $C$  το διάνυσμα της Country of Built και  $F$  το διάνυσμα της Flag.

- Το  $Z$  αποτελείται από 26 τεταγμένες, που αντιστοιχούν στις 26 διαφορετικές γεωγραφικές ζώνες, στις οποίες συνέβησαν ατυχήματα. Δηλαδή είναι  $Z(z_1, z_2, \dots, z_{26})$ .

- Το **C** αποτελείται από 14 τεταγμένες, που αντιστοιχούν στις 14 διαφορετικές χώρες κατασκευής, στις οποίες κατασκευάστηκαν τα πλοία που συμμετείχαν στα ατυχήματα. Δηλαδή είναι  $C(c_1, c_2, \dots, c_{14})$ .
- Το **F** αποτελείται από 31 τεταγμένες, που αντιστοιχούν στις 31 διαφορετικές σημαίες που έφεραν τα πλοία που συμμετείχαν στα ατυχήματα. Δηλαδή είναι  $F(f_1, f_2, \dots, f_{31})$ .

Άρα, το διάνυσμα  $X_i$  κατασκευάζεται ως εξής:  $X_i(GT_i, Z_i, C_i, F_i)$  και είναι τάξης 72. Στον Πίνακα 12 παρουσιάζονται οι τεταγμένες των διανυσμάτων **Z**, **C**, και **F**.

Το διάνυσμα  $T_i$ , κατά αντίστοιχο τρόπο, κατασκευάζεται από το attribute "Casualty Type" των δεδομένων των ατυχημάτων. Το Casualty Type αποτελείται από 5 διαφορετικούς τύπους ατυχημάτων, οι οποίοι αποτελούν τις τεταγμένες του διανύσματος  $T_i$ . Δηλαδή είναι:

- $t_1$ = Collision
- $t_2$ = Contact
- $t_3$ = Fire/Explosion
- $t_4$ = Hull/Mchy. Damage
- $t_5$ = Wrecked/Stranded

Επομένως είναι  $T_i (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)$ .

Εφαρμογή για το πρώτο ατύχημα πλοίου PCC:

- Πρώτο κατά σειρά ατύχημα,  $i=1$
- $GT_1 = 44408$
- Zone = Br.Isles, N.Sea, E.Chnl, Biscay:  $z_4=1, z_1=z_2=z_3=z_5=\dots=z_{26}=0$  και  $Z_1(0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$
- Country of Built = Croatia:  $c_2=1, c_1=c_3=c_4=\dots=c_{14}=0$  και  $C_1(0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$
- Flag = Italy:  $f_{11}=1, f_1=f_2=\dots=f_{10}=f_{12}=\dots=f_{31}=0$  και  $F_1(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)$
- Casualty Type = Collision:  $t_1=1, t_2=\dots=t_5=0$  και  $T_1(1,0,0,0,0)$

Με την διαδικασία που μόλις περιγράφηκε, μετατρέπονται σε διανυσματική μορφή όλα τα ατυχήματα, ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν σωστά από το νευρωνικό δίκτυο. Τα διανύσματα  $X_i$  και  $T_i$  αποθηκεύονται σε αρχείο δεδομένων τύπου csv (comma separated values), τα οποία μπορεί να διαβάσει ο κώδικας του νευρωνικού δικτύου κατά την διαδικασία της εκπαίδευσής του.

Το δίκτυο, κάθε φορά που εισάγεται ένα διάνυσμα  $X_i$ , δημιουργεί ένα δικό του διάνυσμα εξόδου  $Y_i$ , το οποίο στην συνέχεια συγκρίνει με το αντίστοιχο  $T_i$ . Από την διαφορά που προκύπτει, ακολουθεί κατάλληλη μεταβολή των τιμών των βαρών **W** και **b** σε κάθε layer, με τελικό στόχο την σύγκλιση μεταξύ των  $Y_i$  και  $T_i$ . Αυτό το μέρος των υπολογισμών αναλαμβάνει η συνάρτηση εκπαίδευσης που εφαρμόζεται στο δίκτυο.

Πίνακας 12: Τεταγμένες των διανυσμάτων Z, C, και F

Διάνυσμα Z		Διάνυσμα C		Διάνυσμα F	
Australasia	z <sub>1</sub>	China	c <sub>1</sub>	Bahamas	f <sub>1</sub>
Baltic	z <sub>2</sub>	Croatia	c <sub>2</sub>	Canary Islands	f <sub>2</sub>
Bay Of Bengal	z <sub>3</sub>	France	c <sub>3</sub>	Chile	f <sub>3</sub>
Br.Isles, N.Sea,E.Chnl,Biscay	z <sub>4</sub>	Germany	c <sub>4</sub>	China	f <sub>4</sub>
China, Japan & Korea	z <sub>5</sub>	Italy	c <sub>5</sub>	Cyprus	f <sub>5</sub>
E.Mediterranean & Black Sea	z <sub>6</sub>	Japan	c <sub>6</sub>	Dominica	f <sub>6</sub>
East Africa Coast	z <sub>7</sub>	Korea, South	c <sub>7</sub>	Finland	f <sub>7</sub>
Gulf	z <sub>8</sub>	Netherlands	c <sub>8</sub>	French Antarctic Territory	f <sub>8</sub>
Gulf Of Mexico	z <sub>9</sub>	Norway	c <sub>9</sub>	Hong Kong, China	f <sub>9</sub>
Kiel Canal	z <sub>10</sub>	Poland	c <sub>10</sub>	Isle Of Man	f <sub>10</sub>
Newfoundland	z <sub>11</sub>	Spain	c <sub>11</sub>	Italy	f <sub>11</sub>
North America Pacific Coast	z <sub>12</sub>	Sweden	c <sub>12</sub>	Japan	f <sub>12</sub>
North Atlantic	z <sub>13</sub>	Vietnam	c <sub>13</sub>	Korea, South	f <sub>13</sub>
North Pacific	z <sub>14</sub>	Yugoslavia	c <sub>14</sub>	Lebanon	f <sub>14</sub>
Panama Canal	z <sub>15</sub>			Liberia	f <sub>15</sub>
Red Sea	z <sub>16</sub>			Malaysia	f <sub>16</sub>
Russia, Arctic & Bering Sea	z <sub>17</sub>			Malta	f <sub>17</sub>
S.Atlantic, E.Coast S.America	z <sub>18</sub>			Marshall Islands	f <sub>18</sub>
South China & East Indies	z <sub>19</sub>			Mongolia	f <sub>19</sub>
South Pacific	z <sub>20</sub>			Norway (Nis)	f <sub>20</sub>
Suez Canal	z <sub>21</sub>			Panama	f <sub>21</sub>
U.S. Eastern Sea Board	z <sub>22</sub>			Philippines	f <sub>22</sub>
W.Mediterranean	z <sub>23</sub>			Portugal (Mar)	f <sub>23</sub>
West Africa Coast	z <sub>24</sub>			Singapore	f <sub>24</sub>
West Coast South America	z <sub>25</sub>			Spain (Csr)	f <sub>25</sub>
West Indies	z <sub>26</sub>			Sweden	f <sub>26</sub>
				Thailand	f <sub>27</sub>
				Togo	f <sub>28</sub>
				United Kingdom	f <sub>29</sub>
				United States Of America	f <sub>30</sub>
				Vanuatu	f <sub>31</sub>

Το σύνολο από τα ζεύγη διανυσμάτων  $\mathbf{X}_i$  και  $\mathbf{T}_i$  διαιρούνται κατά το στάδιο της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου σε τρεις ομάδες: training, validation και test, σε ποσοστά 70%, 15% και 15% αντιστοίχως, που είναι η προεπιλεγμένη διαμέριση της MATLAB και θεωρείται η πιο ενδεδειγμένη. Η πρώτη ομάδα, training, χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο για την βασική εκπαίδευση του δικτύου, κατά την οποία διαμορφώνονται οι τιμές των βαρών  $\mathbf{W}$  και biases  $\mathbf{b}$ . Η δεύτερη ομάδα, validation, χρησιμοποιείται επικουρικά κατά την εκπαίδευση, για το έλεγχο της γενικής συμπεριφοράς του δικτύου. Όταν αυτή σταματήσει να βελτιώνεται, η εκπαίδευση του δικτύου διακόπτεται. Η τρίτη ομάδα, test, δεν συμμετέχει στο στάδιο της εκπαίδευσης, αλλά χρησιμοποιείται ανεξάρτητα στο τέλος, ως μέτρο της επίδοσης του δικτύου, ελέγχοντας την έξοδο  $\mathbf{Y}_i$  με το γνωστό  $\mathbf{T}_i$ . Η διαίρεση των δεδομένων στις ομάδες αυτές γίνεται από το δίκτυο με τυχαίο τρόπο, ορίζοντας μόνο τα ποσοστά αναλογίας. Υπάρχει η δυνατότητα, αν απαιτείται, να γίνει διαίρεση των δεδομένων με διαφορετική ποσοστιαία αναλογία, ή με συγκεκριμένο τρόπο, ή ακόμα και να παραληφθεί κάποια από τις τρεις ομάδες.

Η συνάρτηση εκπαίδευσης, που έχει επιλεγεί για το νευρωνικό δίκτυο ταξινόμησης των ατυχημάτων, είναι η Resilient Backpropagation–RPROP ή “trainrp” όπως λέγεται στο περιβάλλον της MATLAB. Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η MATLAB θεωρεί γενικά ως συνάρτηση (function) οποιοδήποτε εξωτερικό κώδικα, ο οποίος μπορεί να καλείται σε διάφορα σημεία του κύριου προγράμματος. Επομένως, στα νευρωνικά δίκτυα η συνάρτηση εκπαίδευσης είναι στην πραγματικότητα ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του δικτύου. Ο τρόπος λειτουργίας του αλγόριθμου RPROP περιγράφεται αναλυτικά στην συνέχεια.

#### Train Function: Resilient Backpropagation Algorithm (RPROP)

Ο αλγόριθμος RPROP αναπτύχθηκε από τους Martin Riedmiller και Heinrich Braun και ανήκει στην κατηγορία αλγορίθμων τύπου “backpropagation”. Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1993 στο International Conference on Neural Networks, που έγινε υπό την εποπτεία του Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Με τον αλγόριθμο RPROP, η μεταβολή της τιμής κάθε βάρους (weight,  $w$ ), και bias,  $b$ , του νευρωνικού δικτύου γίνεται εξετάζοντας την συμπεριφορά της συνάρτησης σφάλματος,  $E$ . Ειδικότερα, ο αλγόριθμος προσαρμόζει τις τιμές αυτές, ανάλογα με το πρόσημο της μερικής παραγώγου της  $E$ , ως προς το συγκεκριμένο  $w$  ή  $b$  που εξετάζεται και όχι σύμφωνα με το αντίστοιχο μέτρο της μερικής παραγώγου της  $E$ . Ο στόχος του αλγόριθμου RPROP, είναι να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα  $E$ , μεταξύ της εξόδου του δικτύου και της πραγματικής τιμής που πρέπει να έχει η έξοδος, δηλαδή να βρεθεί ένα τοπικό ελάχιστο της  $E$ , μεταβάλλοντας κατάλληλα τις τιμές κάθε  $w$  και  $b$  του δικτύου. Η όλη διαδικασία επιτυγχάνεται με επαναλήψεις (iterations), εφαρμόζοντας στο δίκτυο με την σειρά όλα τα σήματα εισόδου και τις αντίστοιχες πραγματικές εξόδους (learning by epochs). Υπενθυμίζεται ότι στην MATLAB, το bias κάθε νευρώνα θεωρείται ότι είναι μια είσοδος με μέτρο την μονάδα (1), στην οποία αντιστοιχεί ένα ακόμα βάρος  $w$ . Με το τρόπο αυτό ο χειρισμός του bias είναι ίδιος με εκείνον ενός  $w$ .

Η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου με έναν αλγόριθμο τύπου “backpropagation” επιτυγχάνεται με τον υπολογισμό της μερικής παραγώγου της συνάρτησης σφάλματος  $E$  ως προς κάθε ένα  $w_{ij}$ , δηλαδή,

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = \frac{\partial E}{\partial s_i} \cdot \frac{\partial s_i}{\partial net_i} \cdot \frac{\partial net_i}{\partial w_{ij}}$$

$w_{ij}$  = το βάρος που αντιστοιχεί στο σήμα από τον νευρώνα  $j$  στον νευρώνα  $i$ ,

$s_i$  = το σήμα εξόδου του νευρώνα  $i$ ,

$net_i$  = το αλγεβρικό άθροισμα των σημάτων που καταλήγουν στην είσοδο του νευρώνα  $i$

Στην συνέχεια η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης σφάλματος γίνεται με έναν υπολογισμό μείωσης της κλίσης (gradient descent), όπου λαμβάνεται υπόψη το μέτρο της μερικής παραγώγου της  $E$ :

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) - \varepsilon \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t)$$

Ο συντελεστής  $\varepsilon$  λέγεται ρυθμός εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Πολλές φορές η επιλογή του ρυθμού  $\varepsilon$  είναι προβληματική. Ένας μικρός  $\varepsilon$  μπορεί να οδηγήσει σε πολύ αργή σύγκλιση των  $w_{ij}$ , δηλαδή σε ανάγκη για πολλές επαναλήψεις. Αντίθετα ένας μεγάλος  $\varepsilon$  μπορεί να οδηγήσει το δίκτυο σε ταλάντευση γύρω από το τοπικό ελάχιστο της  $E$ , εμποδίζοντας την τιμή της  $E$  να πέσει κάτω από μια επιθυμητή τιμή.

Ο αλγόριθμος RPROP ξεπερνά το παραπάνω πρόβλημα με μια διαφορετική προσέγγιση. Για κάθε βάρος  $w_{ij}$  του νευρωνικού δικτύου, ορίζεται μια χαρακτηριστική τιμή προσαρμογής  $\Delta_{ij}$ , που καθορίζει μόνο το μέγεθος της μεταβολής της τιμής του  $w_{ij}$  στο τέλος κάθε επανάληψης.

Η  $\Delta_{ij}$  προκύπτει κατά την διαδικασία εκπαίδευσης του δικτύου και βασίζεται στην τοπική τιμή της συνάρτησης σφάλματος  $E$ , σε κάθε ένα  $w_{ij}$ :

$$\Delta_{ij}(t) = \begin{cases} \eta^+ \cdot \Delta_{ij} \cdot (t-1), & \text{αν } \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t) > 0 \\ \eta^- \cdot \Delta_{ij} \cdot (t-1), & \text{αν } \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t) < 0 \\ \Delta_{ij} \cdot (t-1), & \text{αλλού} \end{cases}$$

όπου  $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$

Κάθε φορά που η μερική παράγωγος  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  ενός βάρους  $w_{ij}$  αλλάζει πρόσημο, σημαίνει ότι η προηγούμενη μεταβολή της τιμής του βάρους ήταν πολύ μεγάλη και ο αλγόριθμος ξεπέρασε το τοπικό ελάχιστο. Οπότε, η  $\Delta_{ij}$  μειώνεται κατά τον συντελεστή  $\eta^-$ . Αν η μερική παράγωγος  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  διατηρεί το ίδιο πρόσημο, τότε η μεταβολή του βάρους αυξάνεται, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η σύγκλιση, ειδικά στις περιοχές που η κλίση είναι μικρή (shallow regions).

Όταν προσδιοριστούν όλες οι τιμές προσαρμογής  $\Delta_{ij}$  του δικτύου, τότε ακολουθεί η μεταβολή της τιμής κάθε βάρους,  $\Delta w_{ij}$ , ως εξής: αν η  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  είναι θετική, (αύξηση του σφάλματος), το  $w_{ij}$  μειώνεται κατά  $\Delta_{ij}(t)$ , ενώ αν η  $\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}$  είναι αρνητική (μείωση του σφάλματος), το βάρος  $w_{ij}$  αυξάνεται κατά  $\Delta_{ij}(t)$ :

$$\Delta w_{ij}(t) = \begin{cases} -\Delta_{ij}(t), & \text{αν } \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t) > 0 \\ +\Delta_{ij}(t), & \text{αν } \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t) < 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

Και τελικά:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t - 1)$$

Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση όπου η παράγωγος  $\partial E$  αλλάζει πρόσημο μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων. Αυτό σημαίνει ότι η αμέσως προηγούμενη μεταβολή του  $w$  ήταν πολύ μεγάλη και ξεπεράστηκε το τοπικό ελάχιστο. Τότε γίνεται επιστροφή του  $w$  στην προηγούμενη τιμή:

$$\Delta w_{ij}(t) = -\Delta w_{ij}(t - 1), \quad \text{αν } \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t - 1) \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t) < 0$$

Αυτή η παλινδρόμηση θα οδηγήσει στην επόμενη επανάληψη τον αλγόριθμο να «δεί» εκ νέου μεταβολή στο πρόσημο της  $\partial E$ . Όμως, αυτή την φορά δεν θα πρέπει να γίνει και πάλι αλλαγή της τιμής μεταβολής  $\Delta w_{ij}$ . Αυτό μπορεί να γίνει ορίζοντας μέσα στον αλγόριθμο, στο επόμενο βήμα ενός τέτοιου συμβάντος, μια συνθήκη του τύπου:

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ij}}(t - 1) = 0$$

[18]

Στην περίπτωση του νευρωνικού δικτύου που εφαρμόζεται για το classification των ατυχημάτων των πλοίων PCCs, ο αλγόριθμος RPROP αποδεικνύεται ότι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως αναφέρθηκε, το διάνυσμα (σήμα) κάθε εισόδου (ατύχημα) είναι τάξης 72 και αποτελείται από τεταγμένες μηδέν (0) και ένα (1), γεγονός που οδηγεί σε πολύ μικρή αριθμητική τιμή της παραγώγου  $\partial E$  και θα είχε σαν αποτέλεσμα πολύ αργή σύγκλιση, ή χειρότερα, σε ταλάντευση γύρω από το τοπικό ελάχιστο. Τις περισσότερες φορές η εκπαίδευση του δικτύου θα σταματούσε, όχι λόγω επίτευξης της σύγκλισης, αλλά λόγω υπέρβασης του μέγιστου αριθμού επαναλήψεων, οδηγώντας σε ένα μέτριο, ή κακό μοντέλο ταξινόμησης ατυχημάτων. Έτσι εξετάζοντας μόνο το πρόσημο της  $\partial E$  επιτυγχάνεται η καλή εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και κατ' επέκταση ένα καλό μοντέλο ταξινόμησης.

#### Performance Function: "mse"

Η συνάρτηση επίδοσης (performance function) σε ένα νευρωνικό δίκτυο της MATLAB αντιστοιχεί στην συνάρτηση σφάλματος  $E$  που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος εκπαίδευσης. Η "mse" είναι η συνάρτηση επίδοσης που υπολογίζει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean squared error) του δικτύου σε κάθε επανάληψη και εφαρμόζεται ως εξής:



Αν  $t=\{t_i|i=1,2,\dots,N\}$  είναι οι πραγματικές τιμές της εξόδου, δηλαδή όπου  $t_i$  ο πραγματικός τύπος ατυχήματος και  $N$  το πλήθος των τύπων ατυχημάτων και αν  $y=\{y_i|i=1,2,\dots,N\}$  οι τιμές εξόδου του νευρωνικού δικτύου, τότε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ  $t$  και  $y$  είναι:

$$MSE(t, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - y_i)^2$$

[19]

Ο έλεγχος της επίδοσης του νευρωνικού δικτύου γίνεται με τα παρακάτω, ενσωματωμένα στον κώδικά του, κριτήρια:

- Κριτήριο και Γράφημα ROC (Receiver Operating Characteristic)

Το κριτήριο ROC χρησιμοποιείται για την οπτική παρουσίαση και επιλογή ενός νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης με βάση την επίδοσή του. Αρχικά, είχε εφαρμογή στην λήψη ιατρικών αποφάσεων, αλλά πλέον αποτελεί σημαντικό εργαλείο σε πολλές τεχνικές εξόρυξης δεδομένων μέσω νευρωνικών δικτύων.

Κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, από κάθε είσοδο  $X_i$  δημιουργείται μία έξοδος (κλάση)  $Y_i$ , η οποία στην συνέχεια συγκρίνεται με την τιμή (πραγματική κλάση)  $T_i$ . Τα ενδεχόμενα της σύγκρισης αυτής παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 13.

Πίνακας 13: Σύγκριση εξόδου νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης  $Y_i$  και διανύσματος target class  $T_i$

		Διάνυσμα $T_i$	
		class i	not class i
Διάνυσμα $Y_i$	class i	True Positives (TP)	False Positives (FP)
	not class i	False Negatives (FN)	True Negatives (TN)
	Total	P	N

Από τον Πίνακα 13 προκύπτουν τα ενδεχόμενα:

- η πραγματική κλάση ήταν  $i$  και ταξινομήθηκε ως  $i$ : True positive, TP
- η πραγματική κλάση ήταν  $i$  και δεν ταξινομήθηκε ως  $i$ : False negative, FN
- η πραγματική κλάση δεν ήταν  $i$  και ταξινομήθηκε ως  $i$ : False positive, FP
- η πραγματική κλάση δεν ήταν  $i$  και δεν ταξινομήθηκε ως  $i$ : True negative, TN

Στην συνέχεια, από τα αποτελέσματα για κάθε κλάση, υπολογίζονται οι λόγοι:

True positive rate or sensitivity:  $tp\ rate = \frac{True\ Positives}{Total\ "Class\ i"} = \frac{TP}{P}$

False positive rate:  $fp\ rate = \frac{False\ Positives}{Total\ "not\ Class\ i"} = \frac{FP}{N}$

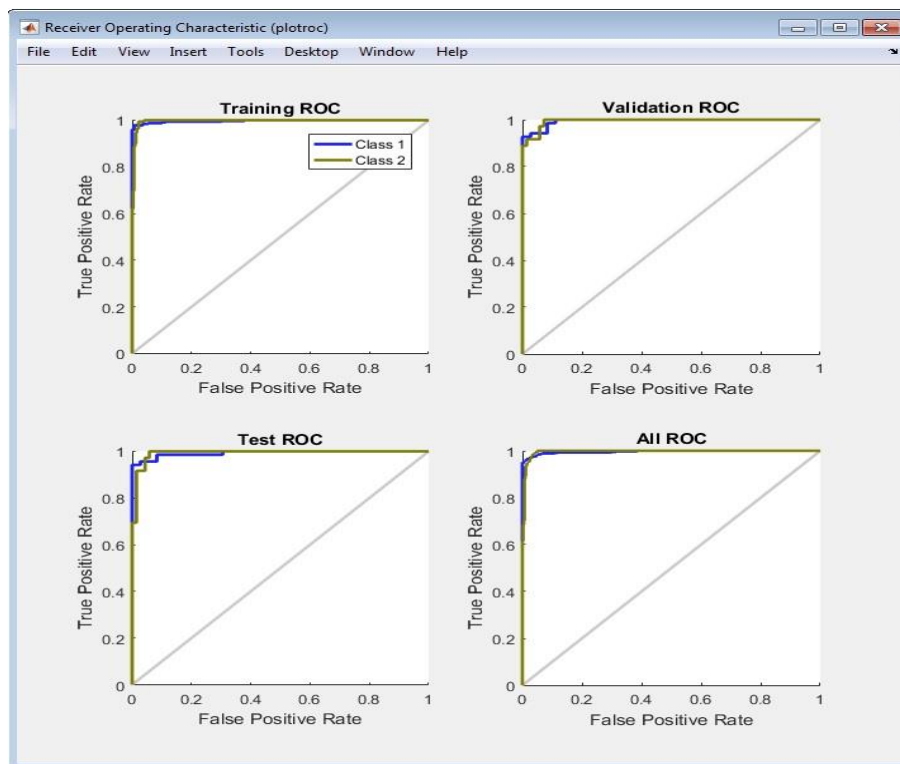
και σχεδιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες, με άξονα x το μέγεθος  $f_p$  rate και άξονα y το μέγεθος  $t_p$  rate. Στην Εικόνα 9 φαίνεται ένα παράδειγμα γραφήματος ROC νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης σε δύο κλάσεις.

Το κύριο χαρακτηριστικό του γραφήματος ROC είναι η περιοχή στο άνω αριστερά τμήμα πάνω από την ευθεία  $y=x$ . Οι αλγόριθμοι που παράγουν καμπύλες σε αυτή την περιοχή, εμφανίζουν περισσότερα true positives αποτελέσματα και λιγότερα false positives. Ειδικότερα, θεωρείται ότι όσο πιο κοντά περνούν από το σημείο (0,1), τόσο καλύτερα λειτουργεί ο αλγόριθμος εκπαίδευσης.

Οι καμπύλες που περνούν κοντά στην περιοχή της ευθείας  $y=x$  ή ταυτίζονται με αυτή, θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν αλγόριθμους ταξινόμησης που επιλέγουν τυχαία την κλάση κάθε εισόδου στο δίκτυο, γεγονός που σημαίνει ότι δεν έχει επιτευχθεί η εξόρυξη πληροφορίας από τα δεδομένα κατά την εκπαίδευση.

Οι αλγόριθμοι που βρίσκονται στην περιοχή του επιπέδου ROC κάτω από την ευθεία  $y=x$ , θεωρείται ότι λειτουργούν χειρότερα από την προηγούμενη περίπτωση.

[20]



Εικόνα 9: Παράδειγμα γραφήματος ROC νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης σε δύο κλάσεις (Πηγή: [19])

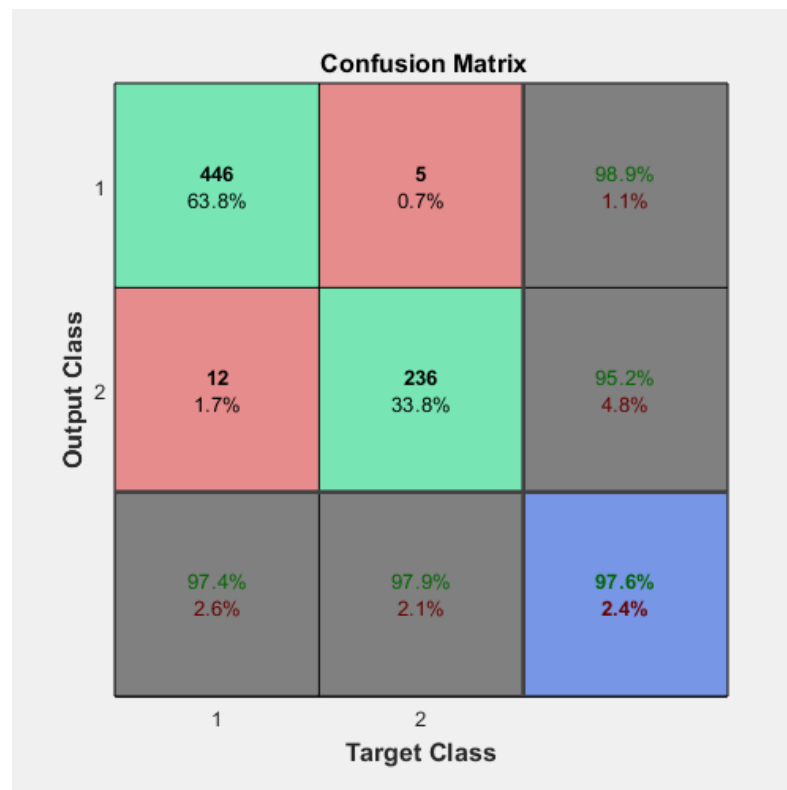
- **Γράφημα Confusion Matrix**

Το γράφημα Confusion Matrix χρησιμοποιείται για την οπτική παρουσίαση της επίδοσης ενός αλγόριθμου ταξινόμησης, κυρίως για τις περιπτώσεις εκπαίδευσης νευρωνικών δικτύων με επίβλεψη. Οι γραμμές του πίνακα παριστάνουν την κλάση (output class), που έδωσε στην έξοδο το νευρωνικό δίκτυο από ένα διάλυμα εισόδου, ενώ οι στήλες την πραγματική κλάση (target class). Ο πίνακας κατασκευάζεται μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης του δικτύου, οπότε στα κελιά απεικονίζεται ο συνολικός αριθμός των εισόδων που ταξινομήθηκε σε κάθε κλάση, καθώς και το ποσοστό που του αντιστοιχεί. Η διαγώνιος ενός Confusion Matrix αντιστοιχεί στις περιπτώσεις που το νευρωνικό δίκτυο ταξινομεί με επιτυχία, ενώ τα υπόλοιπα κελιά αντιστοιχούν σε λανθασμένες ταξινομήσεις.

Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα Confusion Matrix, που προέρχεται από νευρωνικό δίκτυο ταξινόμησης σε δύο κλάσεις, τις “1” και “2”.

Στο πρώτο κελί εμφανίζεται ο αριθμός και το ποσοστό των σωστών ταξινομήσεων του νευρωνικού δικτύου για την κλάση “1” (446 σωστές ταξινομήσεις ή 63.8% του συνόλου), κοκ. Στην τελευταία γραμμή του πίνακα υπολογίζονται τα αποτελέσματα για κάθε ένα target class, ενώ στην τελευταία στήλη τα αποτελέσματα για κάθε ένα output class. Το τελευταίο κελί του πίνακα, κάτω δεξιά, περιέχει το συνολικό ποσοστό σωστών και λανθασμένων ταξινομήσεων του νευρωνικού δικτύου, ανεξάρτητα της κλάσης.

[19]

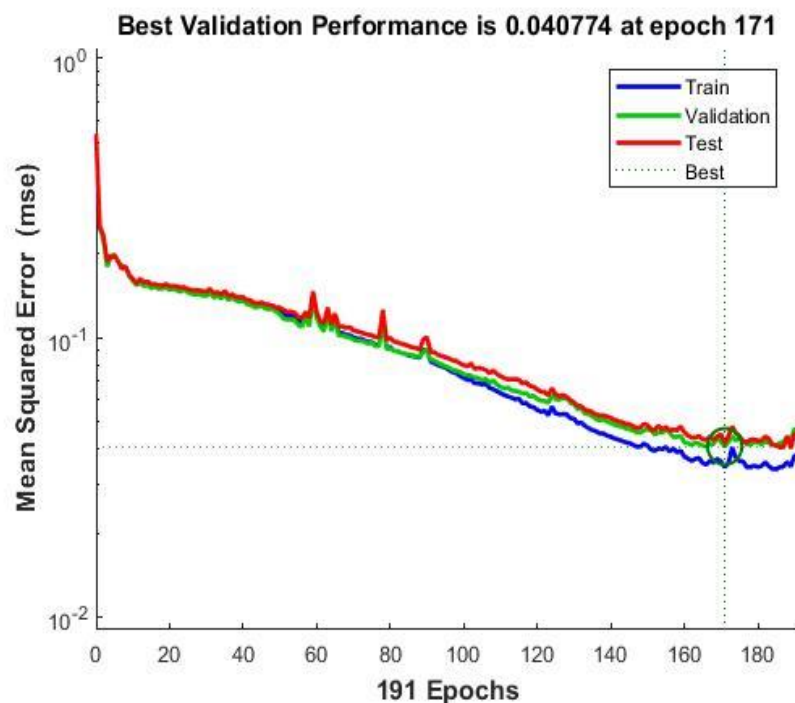


Εικόνα 10: Παράδειγμα Confusion Matrix νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης σε δύο κλάσεις, “1” και “2” (Πηγή: [19])

- Γράφημα Network Performance

Το γράφημα Network Performance απεικονίζει το σφάλμα (mean squared error, mse) που υπολογίζεται κατά την φάση του training, validation και test ενός νευρωνικού δικτύου, σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου. Στον άξονα x είναι το μέγεθος εποχές (epochs), που η κάθε μια αντιστοιχεί σε μια επανάληψη, η οποία ολοκληρώνεται μετά από ένα πλήρες «πέρασμα» από το νευρωνικό δίκτυο όλων των δεδομένων κάθε σετ (train, validation, test) και στον άξονα y είναι η αριθμητική τιμή της mse. Επίσης, στο διάγραμμα σημειώνεται και το ελάχιστο σφάλμα του σετ validation (best performance) όλων των επαναλήψεων. Η εκπαίδευση του δικτύου σταματά, όταν το mse αρχίζει να αυξάνει, και το δίκτυο προσαρμόζεται στο ελάχιστο mse που υπολογίστηκε. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα γραφήματος Network Performance νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης.

[19]



Εικόνα 11: Παράδειγμα γραφήματος Network Performance νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης (Πηγή: [19])

## 4.9 Κώδικας MATLAB νευρωνικού δικτύου και αποτελέσματα

Ο κώδικας εκπαίδευσης νευρωνικού δικτύου για classification των ατυχημάτων των πλοίων PCCs είναι:

```
close all; clear; clc
%neural network for classification
net=patternnet;
net.numlayers=5;
net.layerconnect=[0 0 0 0 0;1 0 0 0 0;0 1 0 0 0;0 0 1 0 0;0 0 0 1 0];
net.outputconnect=[0 0 0 0 1];
net.biasconnect=[1;1;1;1;1];
%setting layers
%1o layer
net.layers{1}.name='1 Hidden';
net.layers{1}.size=800;
net.layers{1}.initFcn='initnw';
net.layers{1}.transferFcn='logsig';
net.inputWeights{1,1}.learnFcn='learngdm';
net.biases{1}.learnFcn='learngdm';
%2o layer
net.layers{2}.name='2 Hidden';
net.layers{2}.size=400;
net.layers{2}.initFcn='initnw';
net.layers{2}.transferFcn='logsig';
net.layerWeights{2,1}.learnFcn='learngdm';
net.biases{2}.learnFcn='learngdm';
%3o layer
net.layers{3}.name='3 Hidden';
net.layers{3}.size=250;
net.layers{3}.initFcn='initnw';
net.layers{3}.transferFcn='logsig';
net.layerWeights{3,2}.learnFcn='learngdm';
net.biases{3}.learnFcn='learngdm';
%4o layer
net.layers{4}.name='4 Hidden';
net.layers{4}.size=70;
net.layers{4}.initFcn='initnw';
net.layers{4}.transferFcn='logsig';
net.layerWeights{4,3}.learnFcn='learngdm';
net.biases{4}.learnFcn='learngdm';
%5o layer
net.layers{5}.name='5 Hidden';
net.layers{5}.size=5;
net.layers{5}.initFcn='initnw';
net.layers{5}.transferFcn='logsig';
net.layerWeights{5,4}.learnFcn='learngdm';
net.biases{5}.learnFcn='learngdm';
%net
net.performFcn='mse';
net.trainFcn='trainrp';
net.trainParam.max_fail=20;
net.adaptFcn='adaptwb';
%loading data, configure network to data
x=csvread('Inputs_PCCs.csv');
t=csvread('Targets_PCCs.csv');
net = configure(net,x,t);
%setting data:training, validation, test split
net.divideFcn='dividerand';
```

```

net.divideParam.trainRatio=0.70;
net.divideParam.valRatio=0.15;
net.divideParam.testRatio=0.15;
%net training
[net, tr]=train(net,x,t);
view(net)

```

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές ομάδες δεδομένων (ζεύγη διανυσμάτων  $X_i, T_i$ ). Η επιλογή αυτή προήλθε μετά από επίμονες προσπάθειες να βρεθεί ο καλύτερος αλγόριθμος εκπαίδευσης, η καλύτερη συνάρτηση μεταφοράς και η κατάλληλη δομή του νευρωνικού δικτύου ταξινόμησης (αριθμός νευρώνων σε κάθε layer και αριθμός των layer), ώστε το εκπαιδευμένο δίκτυο να έχει ικανοποιητική απόδοση.

Το κυριώτερο πρόβλημα, που αντιμετωπίστηκε κατά την εκπαίδευση, ήταν ο πολύ μικρός αριθμός των ατυχημάτων των πλοίων PCCs της περιόδου 1996-2016, που έρχεται σε αντίθεση με το γεγονός ότι τα νευρωνικά δίκτυα για classification προορίζονται να μάθουν με εκπαίδευση από πολύ μεγάλο πληθυσμό δεδομένων. Επίσης, σημαντικό πρόβλημα ήταν και το μεγάλο εύρος διαφορετικών τιμών κάθε attribute των ατυχημάτων, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.8, καθώς και η συγκέντρωση ανά attribute σε συγκεκριμένες τιμές του εύρους, όπως για παράδειγμα, το 60% των ατυχημάτων είχε ως χώρα κατασκευής την Ιαπωνία. Η περίπτωση που εξετάζεται εδώ, με διαθέσιμα μόνο 341 ατυχήματα πλοίων και διανύσματα εισόδου τάξης 72 είναι ιδιαίτερα αποθαρυντική.

Οι ομάδες δεδομένων εκπαίδευσης, που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας και επίδοσης του νευρωνικού δικτύου, είναι:

- 1<sup>η</sup> ομάδα

Τα ζεύγη διανυσμάτων  $X_i$  και  $T_i$  αντιστοιχούν στην χρονολική σειρά που συνέβησαν τα ατυχήματα των πλοίων PCCs. Το νευρωνικό δίκτυο κατανέμει με τυχαίο τρόπο τον πληθυσμό των  $X_i$  και  $T_i$  σε κάθε σετ train, validation και test μέσω της συνάρτησης dividerand, διατηρώντας την ποσοστιαία αναλογία 70%, 15%, και 15%.

Νευρωνικό Δίκτυο: "PCC\_Classifier1.m"

Αρχεία δεδομένων:  $X_i$ : "Inputs\_PCCs.csv",  $T_i$ : "Targets\_PCCs.csv"

- 2<sup>η</sup> ομάδα

Εξετάστηκε η κατανομή όλου του πληθυσμού των ζευγαριών  $X_i$  και  $T_i$  ως προς τον τύπο του ατυχήματος. Στην συνέχεια, κατασκευάστηκαν τα σετ train, validation και test έτσι ώστε να έχουν ίδια κατανομή, ως προς τον τύπο ατυχήματος, με εκείνη του αρχικού πληθυσμού, διατηρώντας την ποσοστιαία αναλογία σε κάθε σετ 70%, 15%, 15%. Το νευρωνικό δίκτυο, μέσω της συνάρτησης devideint, χρησιμοποίησε για την εκπαίδευση αυτά τα προκατασκευασμένα σετ. Έτσι, ξεπεράστηκε το πρόβλημα που παρουσιάστηκε στην 1<sup>η</sup> ομάδα, δηλαδή να υπάρχουν, λόγω της τυχαίας διαίρεσης, σετ στα οποία έλειπε κάποιος τύπος ατυχήματος, με επακόλουθο την χαμηλή επίδοση του δικτύου.

Νευρωνικό Δίκτυο: "PCC\_Classifier2.m"

Αρχεία δεδομένων:  $X_i$ : "Inputs\_PCCsOptimized.csv",  $T_i$ : "Targets\_PCCsOptimized.csv"

- 3<sup>η</sup> ομάδα

Εξαιτίας της σχετικά μέτριας επίδοσης του νευρωνικού δικτύου κατά τις δύο πρώτες ομάδες, κατασκευάστηκε μια τεχνητή ομάδα δεδομένων με μεγάλο πληθυσμό ατυχημάτων. Ο σκοπός ήταν να εξεταστεί η συμπεριφορά της δομής του συγκεκριμένου δικτύου σε συνθήκες εκπαίδευσης που πλησιάζουν της ιδανικής για δίκτυα classification. Με την μέθοδο “Monte Carlo Simulation” δημιουργήθηκαν 4000 εικονικά ατυχήματα πλοίων PCCs, των οποίων οι τιμές των attributes και target class ακολουθούν τις αντίστοιχες κατανομές του αρχικού πληθυσμού ατυχημάτων. Στην συνέχεια, το νευρωνικό δίκτυο μέσω της συνάρτησης `dividerand` διαιρεί με τυχαίο τρόπο, σε ποσοστό 70%, 15%, 15%, τον πληθυσμό αυτό στα σετ `train`, `validation`, και `test`.

Νευρωνικό Δίκτυο: “PCC\_Classifier3.m”

Αρχεία δεδομένων:  $X_i$ : “Input\_Samples.csv”,  $T_i$ : “Target\_Samples.csv”

Από τον κώδικα του νευρωνικού δικτύου που παρουσιάστηκε αρχικά, όπως φαίνεται στην γραμμή 2, το δίκτυο δηλώνεται ως “net”. Μετά την ολοκλήρωση της εκπαίδευσης και με δεδομένο ότι μετά από έλεγχο των κριτηρίων επίδοσης τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά, το δίκτυο μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε στιγμή για πρόβλεψη (prediction), χωρίς να «ξανατρέξει» ο παραπάνω κώδικας εκπαίδευσης.

Η αποθήκευση ενός εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου στην MATLAB γίνεται ως εξής:

```
PCC_Classifier1=net  
save PCC_Classifier1
```

Στην συνέχεια, η πρόβλεψη του τύπου του ατυχήματος με χρήση του αποθηκευμένου – εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου, για πληροφορίες πλοίων με attributes ίδια με εκείνα του σήματος εισόδου, διάνυσμα  $X_i$ , (Κεφάλαιο 4.8), γίνεται με τις εντολές:

```
load PCC_Classifier1  
x=csvread('NewInput.csv');  
y=PCC_Classifier1(x)
```

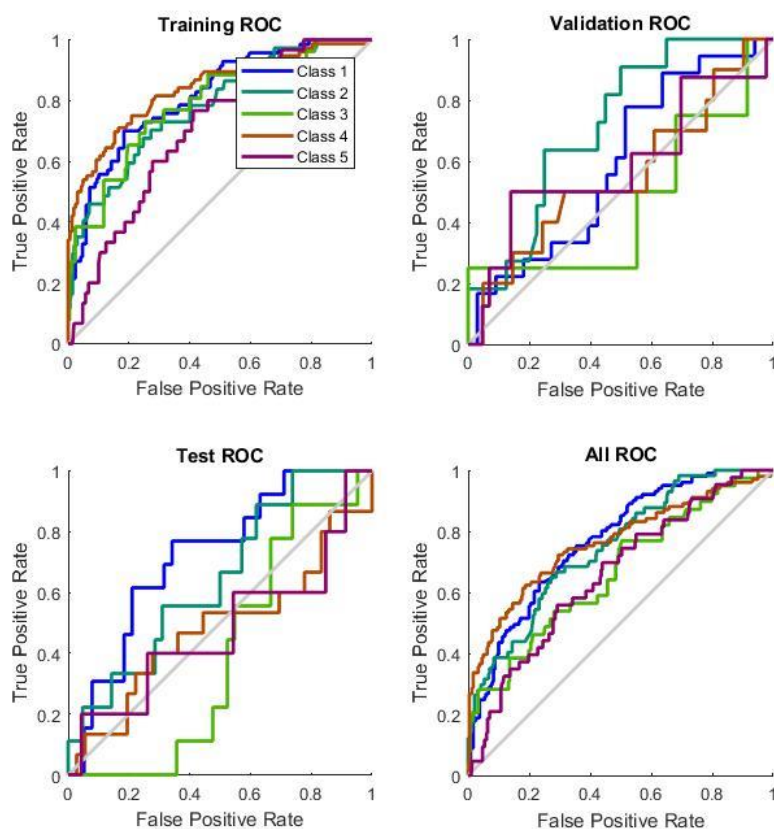
Το αρχείο “NewInput.csv” περιέχει τα νέα διανύσματα εισόδου  $X_i$ , που αντιστοιχούν σε  $i$  διαφορετικά πλοία. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει target class ( $T_i$ ). Η μεταβλητή  $y$  δίνει το διάνυσμα εξόδου του εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου “PCC\_Classifier1” και είναι στην μορφή  $y(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5)$ . Οπότε, αναλόγως ποιά από τα  $t_j$  είναι ίσο με μονάδα, προκύπτει η πρόβλεψη του τύπου ατυχήματος για το συγκεκριμένο πλοίο  $i$ , που εξετάζεται.

#### 4.9.1 Αποτελέσματα 1<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων ( $X_i, T_i$ )

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με την 1<sup>η</sup> ομάδα δεδομένων ( $X_i, T_i$ ) δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

α) Γράφημα ROC

Από το γράφημα ROC, Σχήμα 56, παρατηρείται ότι το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται σχετικά καλά κατά την φάση του training σε όλες τις κλάσεις, αλλά εμφανίζει μέτρια έως κακή συμπεριφορά κατά το validation και test. Οι καμπύλες της φάσης training βρίσκονται στο ενδιάμεσο της άνω αριστερά περιοχής του επιπέδου ROC. Αντίθετα, κατά την φάση validation και test οι καμπύλες βρίσκονται πολύ κοντά στην ευθεία  $y=x$ , γεγονός που δηλώνει ότι το δίκτυο μαντεύει την κλάση, δηλαδή δεν έχει καταφέρει να ανακαλύψει ένα ικανοποιητικό μοντέλο ταξινόμησης. Ειδικότερα, οι καμπύλες των κλάσεων 3, 4 και 5 περνούν και στην κάτω δεξιά περιοχή, παρουσιάζοντας αυξημένο αριθμό false positive ταξινομήσεων. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο ταξινομεί θετικά ως προς την κλάση περιπτώσεις που δεν ανήκουν σε αυτή. Στο τελικό γράφημα, All ROC, όλες οι καμπύλες βρίσκονται στην άνω αριστερά περιοχή του επιπέδου, αλλά σε θέση που φανερώνει την ελαφρά υπεροχή των true positives σε σχέση με τα false positives, οπότε επαληθεύεται ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει μέτρια επίδοση.

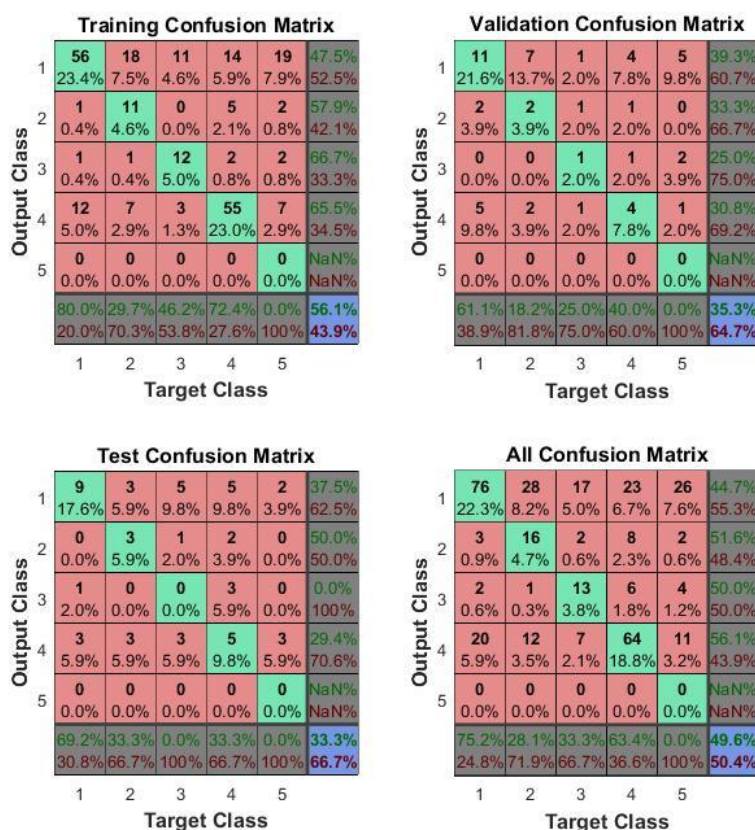


Σχήμα 56: Γράφημα ROC 1<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων



## β) Γράφημα Confusion Matrix

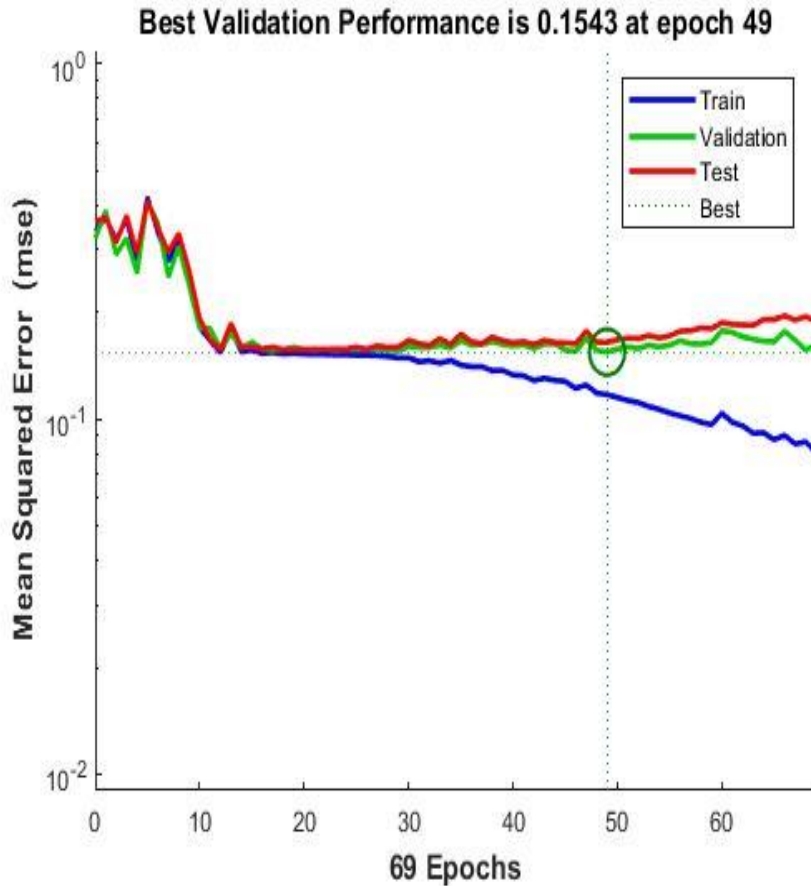
Από το γράφημα Confusion Matrix, Σχήμα 57, δίνεται η εικόνα των true positive και false positive ταξινομήσεων του νευρωνικού δικτύου κατά το training, validation και test. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κλάση 5, την οποία το δίκτυο δεν καταφέρνει να ταξινομήσει σωστά σε καμία φάση (0%). Αυτό το γεγονός δηλώνει ότι πιθανότατα κατά την τυχαία διαίρεση των δεδομένων, στο σετ training δεν υπήρχαν καθόλου ατυχήματα της κλάσης 5. Επομένως, το δίκτυο δεν εκπαιδεύτηκε καθόλου για την κλάση αυτή και κατά συνέπεια δεν κατάφερε να ταξινομήσει σωστά τα δεδομένα των σετ validation και test. Η επίδοση του δικτύου στο test είναι 33.3%, ενώ η συνολική επίδοση είναι 49.6%.



Σχήμα 57: Γράφημα Confusion Matrix 1<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων

## γ) Γράφημα Network Performance

Το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mse) του δικτύου στην φάση validation είναι 0.1543 στην 49<sup>η</sup> επανάληψη, Σχήμα 58. Η φάση training εμφανίζει φθίνουσα συμπεριφορά του mse καθώς αυξάνουν οι επαναλήψεις, που είναι αναμενόμενο, αφού ο αλγόριθμος του δικτύου ισχυροποιεί συνεχώς το μοντέλο ταξινόμησης που δημιουργεί, με κίνδυνο πάντα να οδηγηθεί σε overfitting.



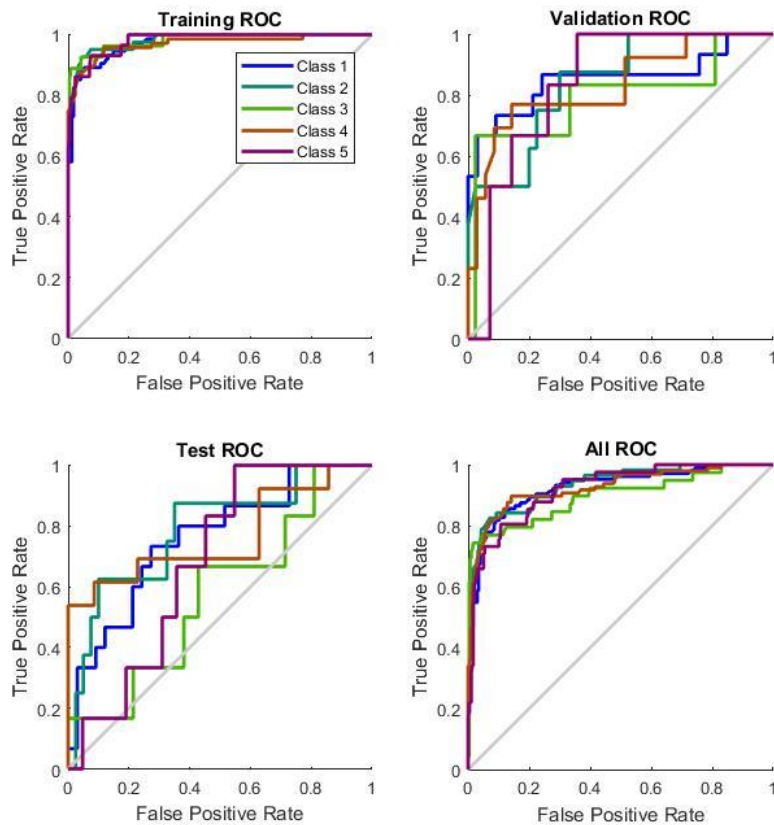
Σχήμα 58: Γράφημα Network Performance 1<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων

#### 4.9.2 Αποτελέσματα 2<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων ( $X_i, T_i$ )

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με την 2<sup>η</sup> ομάδα δεδομένων ( $X_i, T_i$ ) δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

α) Γράφημα ROC

Κατά την φάση του training, Σχήμα 59, οι καμπύλες ROC όλων των κλάσεων βρίσκονται στην άνω δεξιά περιοχή του γραφήματος, κοντά στο σημείο (0,1), γεγονός που δηλώνει ότι υπερσχύουν οι true positives ταξινομήσεις του δικτύου και ότι έχει δημιουργηθεί ένα σχετικά καλό μοντέλο ταξινόμησης. Κατά την φάση του validation, η συμπεριφορά του δικτύου είναι μέτρια, οι καμπύλες ROC βρίσκονται στην ενδιάμεση περιοχή μεταξύ της ευθείας  $y=x$  και του σημείου (0,1), δηλαδή το νευρωνικό δίκτυο εμφανίζει αύξηση των false positives ταξινομήσεων, αλλά εξακολουθεί να έχει περισσότερα true positives. Κατά την φάση του test, το δίκτυο αποδεικνύεται ότι δεν μπορεί να ανταπεξέλθει σωστά. Ειδικότερα, η κλάση 3 βρίσκεται πολύ κοντά στην ευθεία  $y=x$ , γεγονός που φανερώνει ότι το δίκτυο σχεδόν μαντεύει την κλάση. Περίπου την ίδια συμπεριφορά εμφανίζει και η κλάση 5, ενώ οι υπόλοιπες μια ενδιάμεση κατάσταση. Από το τελικό γράφημα, All ROC, το νευρωνικό δίκτυο εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά σε σύγκριση με το δίκτυο της 1<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων.



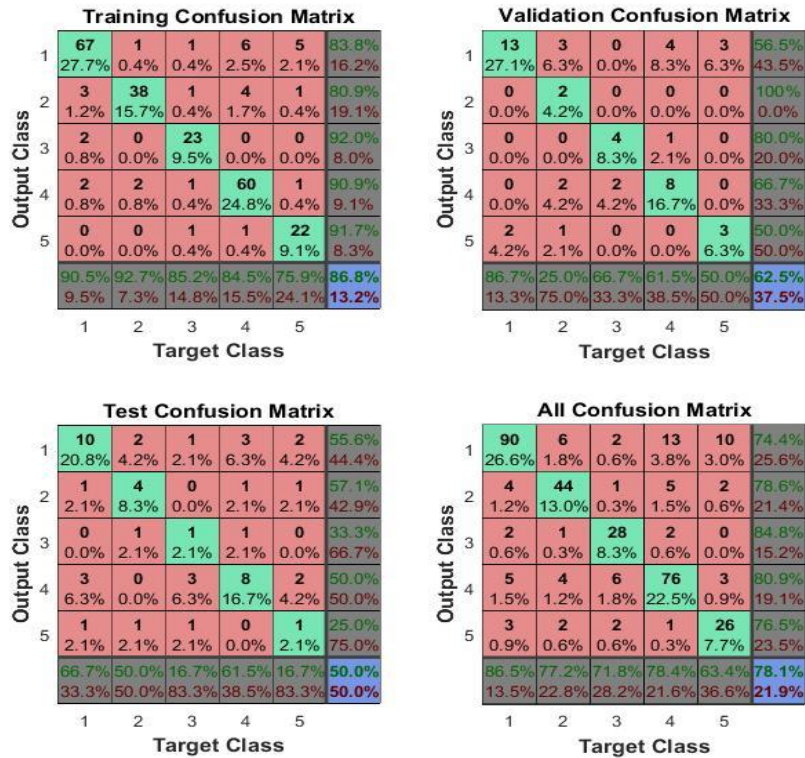
Σχήμα 59: Γράφημα ROC 2<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων

### β) Γράφημα Confusion Matrix

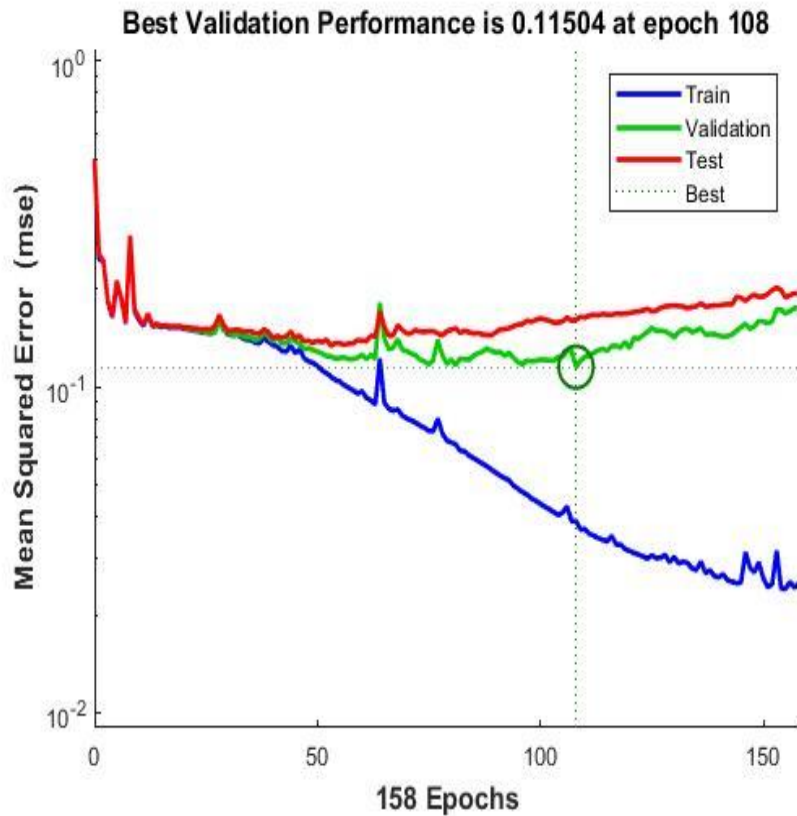
Από το γράφημα Confusion Matrix της 2<sup>ης</sup> ομάδας, Σχήμα 60, φαίνεται ότι ενώ το δίκτυο πετυχαίνει στην φάση training ένα πολύ καλό σκορ 86.8% true positives ταξινομήσεων, στις υπόλοιπες φάσεις, validation και test, δεν ανταποκρίνεται το ίδιο καλά, εμφανίζοντας χαμηλά σκορ 62.5% και 50.0% αντίστοιχα. Η συνολική επίδοση του δικτύου είναι σχετικά καλή με σκορ 78.1%, με δεδομένο μάλιστα ότι σε κάθε σετ δεν παραλείφθηκε κανένα target class, όπως συνέβει στην 1<sup>η</sup> ομάδα δεδομένων με την κλάση 5. Γενικότερα, το δίκτυο εμφανίζει μέσω και αυτού του κριτηρίου καλύτερη επίδοση συγκρινόμενο με εκείνη που προήλθε από την εκπαίδευση με την 1<sup>η</sup> ομάδα διανυσμάτων.

### γ) Γράφημα Network Performance

Το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mse) του δικτύου στην φάση validation είναι 0.11504 στην 108<sup>η</sup> επανάληψη, Σχήμα 61, που είναι βελτιωμένο κατά 34% σε σχέση με την 1<sup>η</sup> ομάδα δεδομένων εκπαίδευσης. Και σε αυτή την περίπτωση, η φάση training εμφανίζει φθίνουσα συμπεριφορά του mse καθώς αυξάνουν οι επαναλήψεις, όμως με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με την 1<sup>η</sup> ομάδα.



Σχήμα 60: Γράφημα Confusion Matrix 2<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων



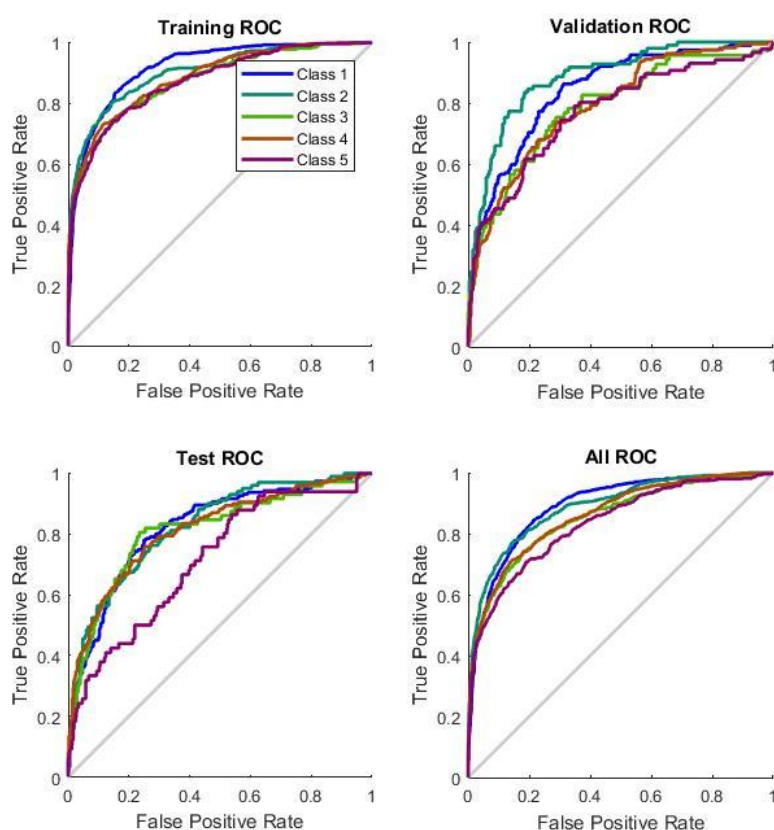
Σχήμα 61: Γράφημα Network Performance 2<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων

### 4.9.3 Αποτελέσματα 3<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων ( $X_i, T_i$ )

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με την 3<sup>η</sup> ομάδα δεδομένων ( $X_i, T_i$ ) δίνει τα παρακάτω αποτελέσματα:

α) Γράφημα ROC

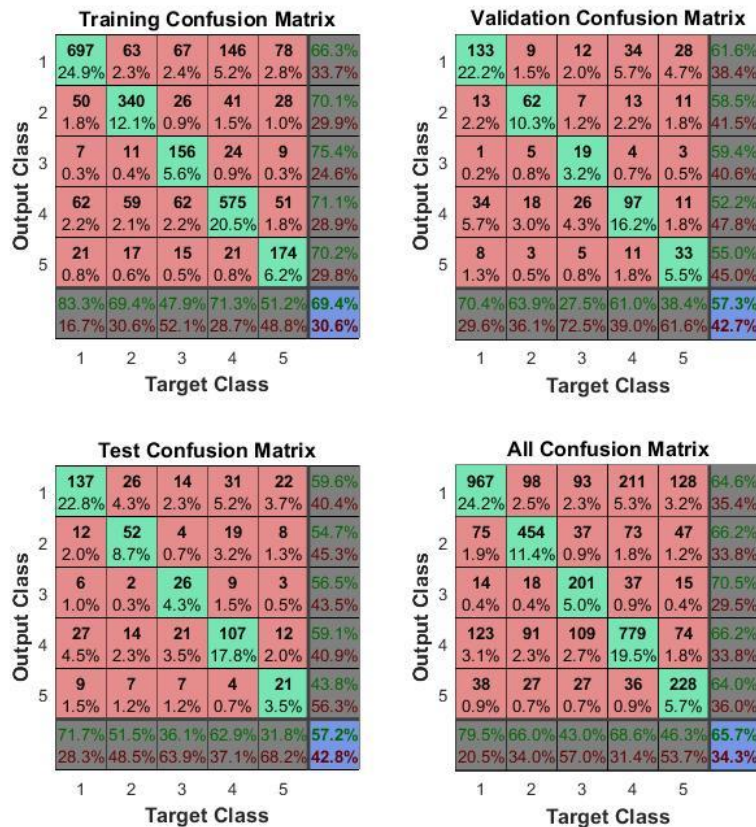
Από το Σχήμα 62, διαπιστώνεται ότι το νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζει βελτιωμένη επίδοση σε όλες τις φάσεις training, validation και test, αφού οι καμπύλες ROC όλων των κλάσεων είναι ομαλές, βρίσκονται στην άνω αριστερά περιοχή του επιπέδου και μακριά από την ευθεία  $y=x$ . Αυτό σημαίνει ότι έχει δημιουργηθεί ένα ικανοποιητικό μοντέλο ταξινόμησης, το οποίο μπορεί να ταξινομήσει τα δεδομένα στις σωστές κλάσεις (περισσότερα true positives από false positives), παρά το γεγονός ότι δεν βρίσκονται πολύ κοντά στο σημείο (0,1). Εξακολουθεί να παραμένει ένα πρόβλημα σχετικά με την κλάση 5 (ατυχήματα τύπου wrecked/stranded), όπως φαίνεται στο Test ROC, όπου η καμπύλη εμφανίζει αυξημένα false positives σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κλάσεις.



Σχήμα 62: Γράφημα ROC 3<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων

## β) Γράφημα Confusion Matrix

Το νευρωνικό δίκτυο πετυχαίνει στην φάση training σκορ 69.4%, στην φάση validation 57.3% και στην φάση test 57.2%, ενώ η συνολική του επίδοση 65.7%, Σχήμα 63. Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο είναι το σκορ της φάσης του test, που είναι το υψηλότερο μέχρι τώρα σε σύγκριση με το αντίστοιχο των προηγούμενων δύο ομάδων δεδομένων (33.3% και 50.0%), γεγονός που επιβεβαιώνει την βελτίωση του μοντέλου ταξινόμησης, όσο αυξάνεται αριθμητικά ο πληθυσμός των δεδομένων που χρησιμοποιούνται κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

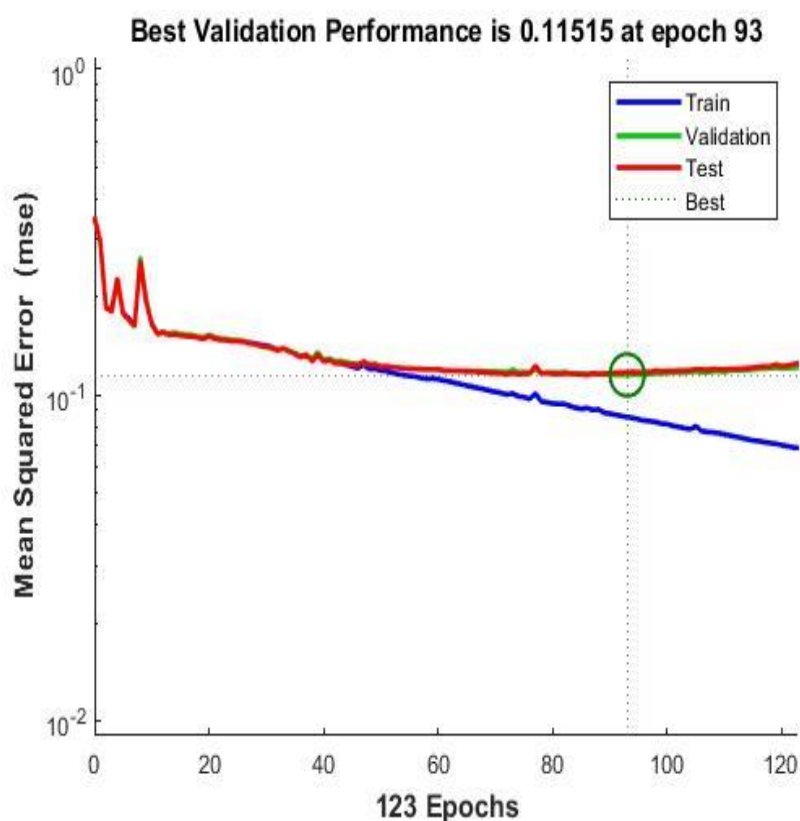


Σχήμα 63: Γράφημα Confusion Matrix 3<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων

## γ) Γράφημα Network Performance

Το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mse) του δικτύου στην φάση validation είναι 0.11515 στην 93<sup>η</sup> επανάληψη, Σχήμα 64, που είναι βελτιωμένο κατά 34% σε σχέση με την 1<sup>η</sup> ομάδα δεδομένων εκπαίδευσης και σχεδόν ίδιο με την 2<sup>η</sup> ομάδα. Σημαντική διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες ομάδες δεδομένων είναι η πανομοιότυπη συμπεριφορά του mse για τις φάσεις validation και test, όπως επιβεβαιώνεται από τις δύο αντίστοιχες καμπύλες, αλλά και από τα αντίστοιχα σκορ του Confusion Matrix, που είναι 57.3% και 57.2%. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση ταξινόμησης νέων ατυχημάτων, το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο θα συμπεριφερθεί με αξιοπιστία σύμφωνα με την φάση validation, οπότε για την αξιολόγηση

των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα αυτής της φάσης.



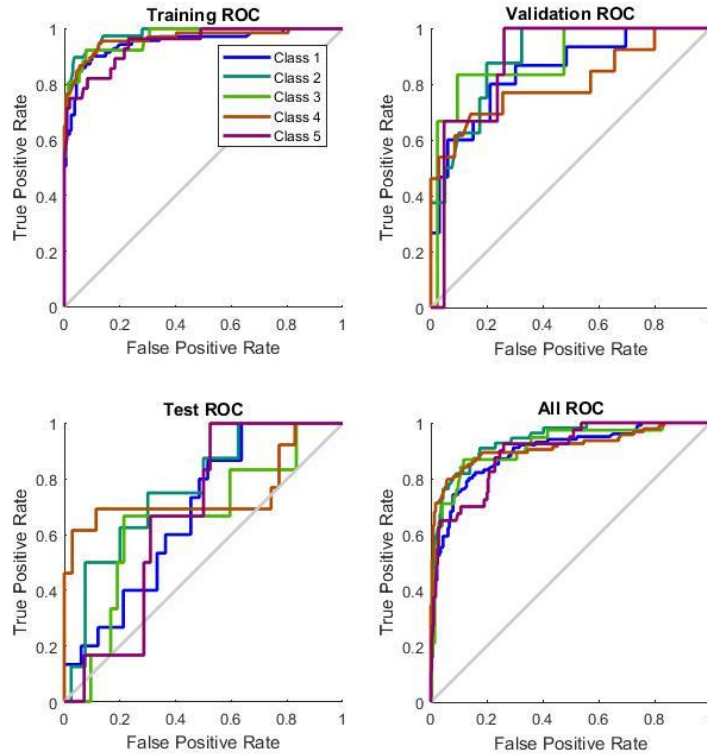
Σχήμα 64: Γράφημα Network Performance 3ης ομάδας δεδομένων

#### 4.10 Εφαρμογή σε εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο

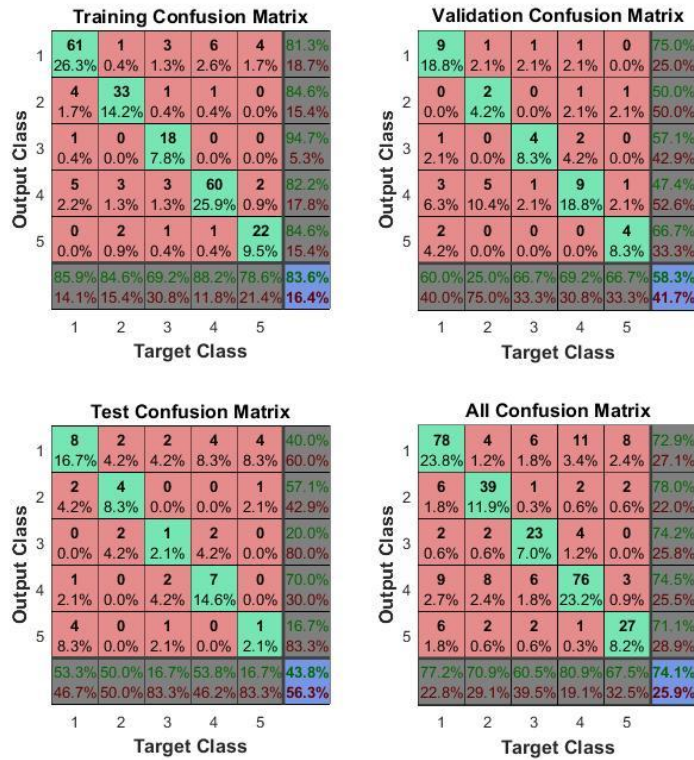
Στην συνέχεια των δοκιμών εκπαίδευσης με διαφορετικές ομάδες δεδομένων, έγινε ο εξής έλεγχος:

Το αρχικό νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με μια νέα, τέταρτη, ομάδα δεδομένων από την οποία αφαιρέθηκαν τυχαία δέκα ατυχήματα πλοίων PCC. Αυτά τα δέκα ατυχήματα χρησιμοποιήθηκαν, μετά το πέρας της εκπαίδευσης, για να ελεγχθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα των κριτηρίων εκπαίδευσης συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα που δίνει το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο.

Τα κριτήρια επίδοσης του νέου εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου παρουσιάζονται στα επόμενα Σχήματα 65,66 και 67:

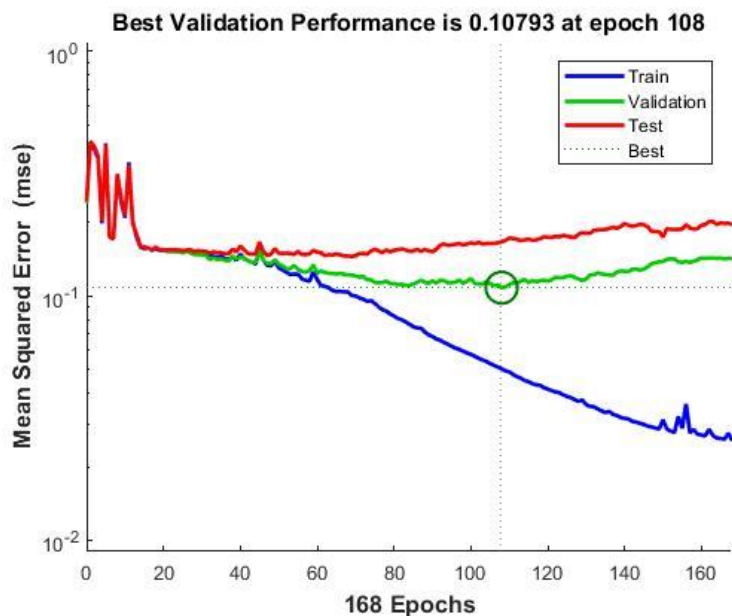


Σχήμα 65: Γράφημα ROC εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου



Σχήμα 66: Γράφημα Confusion Matrix εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου





Σχήμα 67: Γράφημα Network Performance 3ης ομάδας διανυσμάτων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πρόβλεψης του τύπου ατυχήματος που έδωσε το παραπάνω εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο για τα δεδομένα που παρακρατήθηκαν, όπως αναφέρθηκε.

Πίνακας 14: Αποτελέσματα ταξινόμησης εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου

Δοκιμές	Έξοδος εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου	Πραγματικός τύπος ατυχήματος	Επιτυχία
1	Collision	Collision	Ναί
2	Contact	Contact	Ναί
3	Hull/Machinery Damage	Contact	Όχι
4	Hull/Machinery Damage	Hull/Machinery Damage	Ναί
5	Wrecked/Stranded	Collision	Όχι
6	Collision	Collision	Ναί
7	Contact	Contact	Ναί
8	Fire/Explosion	Fire/Explosion	Ναί
9	Collision	Collision	Ναί
10	Hull/Machinery Damage	Contact	Όχι

Από τον Πίνακα 14, προκύπτει ότι το νευρωνικό δίκτυο έχει 70% επιτυχία σωστής ταξινόμησης ως προς τον τύπο του ατυχήματος, το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στο συνολικό σκορ του δικτύου, 74.1% (Σχήμα 66, Confusion Matrix).

## 4.11 Συμπεράσματα από την εφαρμογή του νευρωνικού δικτύου στα ατυχήματα των πλοίων PCCs

Από την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με τις τρεις διαφορετικές ομάδες δεδομένων που προέρχονται από τα ατυχήματα των πλοίων PCCs της χρονικής περιόδου 1996-2016 και οι οποίες παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.9, προκύπτουν τα παρακάτω χρήσιμα συμπεράσματα:

1) Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των κριτηρίων επίδοσης, η δομή του νευρωνικού δικτύου, που είναι ένα 5 layer feedforward neural network, με αριθμό νευρώνων σε κάθε layer 800-400-250-70-5, ανταποκρίνεται πολύ καλά ως προς την κατασκευή ενός μοντέλου ταξινόμησης των ατυχημάτων των πλοίων PCCs. Ο τύπος δικτύου feedforward, που επιλέχθηκε, είναι ο πιο συνηθισμένος και συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος νευρωνικών δικτύων για classification. Ο απαιτούμενος αριθμός των layer και των νευρώνων σε κάθε layer προσδιορίστηκε μετά από επίπονες και επίμονες δοκιμές διαφορετικών κάθε φορά συνθέσεων, αφού στην βιβλιογραφία δεν υπάρχει πουθενά σχετική αναφορά για τον εκ των προτέρων υπολογισμό ή έστω εκτίμησή τους. Επομένως, δεν αποκλείεται να υπάρχουν και άλλα νευρωνικά δίκτυα του ίδιου τύπου, διαφορετικής δομής, που να επιτυγχάνουν παρόμοια ή και καλύτερα αποτελέσματα.

2) Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, ο οποίος ονομάζεται Resilient Backpropagation Algorithm (RPROP), ανταποκρίνεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στα κατηγορικά attributes των δεδομένων των ατυχημάτων των PCCs, σε αντίθεση με άλλους αλγόριθμους για classification που δοκιμάστηκαν. Για την ακρίβεια, πριν την τελική επιλογή του συγκεκριμένου αλγόριθμου, δοκιμάστηκαν όλοι οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης για νευρωνικά δίκτυα classification που διαθέτει η MATLAB και έγινε σύγκριση των επιδόσεών τους. Ο αλγόριθμος RPROP κατάφερε να αναπτύξει το καλύτερο μοντέλο ταξινόμησης σε όλες τις δοκιμές. Η επιτυχία του βασίζεται στο γεγονός ότι μεταβάλλει τις τιμές των μεταβλητών  $\mathbf{w}$  και  $\mathbf{b}$  του δικτύου σύμφωνα με το πρόσημο της μερικής παραγώγου του σφάλματος  $E$  και όχι σύμφωνα με την αριθμητική τιμή της.

3) Η συνάρτηση μεταφοράς logsig, που επιλέχθηκε να είναι ίδια σε όλους τους νευρώνες του δικτύου, είχε την καλύτερη απόκριση ως προς την ενεργοποίηση των νευρώνων κατά την μεταβίβαση και επεξεργασία του σήματος εισόδου διαμέσου των layers προς την έξοδο συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαθέσιμες από την MATLAB. Τα σήματα εισόδου του δικτύου, διανύσματα  $\mathbf{X}_i$ , λόγω των δεδομένων κατασκευής τους, έχουν τιμές που ανήκουν στο διάστημα  $[0,1]$ , οπότε μέσω της logsig, που έχει πεδίο τιμών το διάστημα  $[0,1]$ , τα παραγόμενα ενδιάμεσα σήματα εξόδου από layer σε layer του δικτύου, διανύσματα  $\mathbf{a}$ , παίρνουν τιμές στο ίδιο διάστημα. Αυτό οδηγεί την έξοδο του νευρωνικού δικτύου, layer 5, να δημιουργεί διανύσματα  $\mathbf{Y}_i$  ανάλογα των διανυσμάτων του target class,  $\mathbf{T}_i$ , που έχει εύρος τιμών τεταγμένων επίσης στο διάστημα  $[0,1]$ . Με άλλα λόγια, η συνάρτηση μεταφοράς logsig ευνοεί τον περιορισμό των τιμών όλων των σημάτων του δικτύου στο εύρος τιμών του target class, με αποτέλεσμα να ευνοείται η λειτουργία του αλγόριθμου εκπαίδευσης και κατ'επέκταση η σωστή ταξινόμηση των δεδομένων στις καθορισμένες κλάσεις.

4) Η συνάρτηση επίδοσης mse, η οποία υπολογίζει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των διανυσμάτων  $\mathbf{Y}_i$  και  $\mathbf{T}_i$ , είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συνάρτηση σφάλματος σε νευρωνικά δίκτυα classification, τα οποία χρησιμοποιούν αλγόριθμους backpropagation και

αποτελεί προεπιλογή της MATLAB. Επομένως, υιοθετήθηκε αυτή η προεπιλογή, χωρίς περαιτέρω διερεύνηση και από τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου στις τρεις ομάδες δεδομένων, επαληθεύεται η καλή λειτουργία της συνάρτησης mse.

5) Το πλήθος των διαθέσιμων ατυχημάτων, είναι πολύ μικρό για να μπορέσει να εκπαιδεύσει σε ικανοποιητικό βαθμό και με αξιοπιστία ένα νευρωνικό δίκτυο που προορίζεται για classification. Αυτό είναι χαρακτηριστική ιδιαιτερότητα των δικτύων αυτού του τύπου, που εκπαιδεύονται μέσω παραδειγμάτων. Όπως φάνηκε από τις δοκιμές με τις τρεις διαφορετικές ομάδες δεδομένων εκπαίδευσης, τόσο το μέτρο επίδοσης Training ROC, όσο και το μέτρο Training Confusion Matrix βελτιώθηκε στην περίπτωση που το πλήθος των δεδομένων εισόδου αυξήθηκε (3<sup>η</sup> ομάδα δεδομένων). Επιπλέον, το νευρωνικό δίκτυο παρουσίασε σημαντική βελτίωση και στα μέτρα επίδοσης κατά την φάση Validation και Test, γεγονός που δηλώνει ότι δεν βρέθηκε ποτέ σε κατάσταση overfitting εξαιτίας του πλήθους των παραδειγμάτων κατά την εκπαίδευση. Σε αντίθετη περίπτωση στις φάσεις αυτές τα μέτρα επίδοσης θα χειρότερευαν, ενώ ταυτόχρονα θα βελτιώνονταν μόνο κατά την φάση Training.

6) Ταυτόχρονα με την απαίτηση για μεγάλο πλήθος δεδομένων εκπαίδευσης, η επίδοση ενός νευρωνικού δικτύου για classification εξαρτάται και από το περιεχόμενο αυτών των δεδομένων, δηλαδή, από την παρουσία στο σήμα εισόδου ενός ικανοποιητικού αριθμού παραδειγμάτων για όλες τις κλάσεις ταξινόμησης. Αυτό σημαίνει ότι, το νευρωνικό δίκτυο θα επιτυγχάνει περισσότερες true positives ταξινομήσεις και λιγότερες false positives, αν κάθε μία από τις κλάσεις ταξινόμησης «χαρτογραφήθηκε» από το δίκτυο στο στάδιο της εκπαίδευσης μέσω ποικίλων παραδειγμάτων. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούν τα αποτελέσματα της 2<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων, τα οποία κατασκευάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε σετ (training, validation, test) να περιέχει παραδείγματα από όλες τις κλάσεις, με κατανομή ίδια ή παραπλήσια των αρχικών δεδομένων. Η επίδοση του δικτύου σε όλες της κλάσεις ταξινόμησης είναι σαφώς βελτιωμένη συγκριτικά με την δοκιμή της 1<sup>ης</sup> ομάδας.

7) Το νευρωνικό δίκτυο είναι ένα σύστημα που προσαρμόζεται, μέσω της εκπαίδευσής του, να εκτελεί μια συγκεκριμένη εργασία, η οποία στην περίπτωση που εξετάζεται είναι η ταξινόμηση ατυχημάτων πλοίων PCCs ως προς τον τύπο ατυχήματος, με απώτερο σκοπό να προβλέπει ποιός τύπος ατυχήματος είναι περισσότερο πιθανό να συμβεί σε ένα πλοίο. Όμως, αυτή η τεχνική Data Mining έχει και έναν πολύ σημαντικό περιορισμό. Για κάθε τύπο ατυχήματος που περιέχεται στο target class θα πρέπει να δίνεται και ικανός αριθμός παραδειγμάτων κατά το στάδιο της εκπαίδευσης. Σε διαφορετική περίπτωση το νευρωνικό δίκτυο αδυνατεί να αναπτύξει μέσω των δεδομένων που του παρέχονται ένα ικανό μοντέλο ταξινόμησης και αποτυγχάνει. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούν τα αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> ομάδας δεδομένων, όπου φάνηκε ότι κατά την φάση του training το νευρωνικό δίκτυο δεν είχε καθόλου επιτυχία με την κλάση 5, σχήμα 53. Όπως εξετάστηκε στην συνέχεια, μετά από την τυχαία υποδιαίρεση των δεδομένων στα σετ training, validation και test, που εκτέλεσε ο κώδικας του δικτύου, στο σετ training δεν υπήρχαν παραδείγματα της κλάσης 5. Έτσι στην συνέχεια κατά την φάση validation και test, το δίκτυο δεν μπόρεσε να κάνει σωστή ταξινόμηση δεδομένων για τα οποία προηγουμένως δεν είχε εκπαιδευτεί. Αλλά και όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.8, από το σύνολο των τύπων ατυχημάτων αφαιρέθηκε ο τύπος Foudered, που αποτελεί το 0.57% του συνόλου των ατυχημάτων υπό μελέτη, γιατί προκαλούσε αξεπέραστο πρόβλημα στην σωστή εκπαίδευση του δικτύου.

8) Από το σύνολο των δοκιμών αναδεικνύεται η δυσκολία που αντιμετωπίζει ένα νευρωνικό δίκτυο στο να ανακαλύψει ένα μοντέλο ταξινόμησης όταν τα δεδομένα εισόδου είναι κατηγορικά, σε αντίθεση με την περίπτωση που τα δεδομένα αποτελούνται από συνεχείς τιμές. Αυτό διαπιστώθηκε και κατά την διάρκεια της μελέτης, κυρίως μέσω της σύγκρισης των παραδειγμάτων νευρωνικών δικτύων classification της βιβλιογραφίας, τα οποία στην πλειοψηφία τους επεξεργάζονταν σήματα συνεχών τιμών, με την εφαρμογή για τα ατυχήματα των πλοίων PCCs. Αλλά και από την ιδιαίτερα εκτεταμένη ανάγκη μετατροπής των αρχικών δεδομένων, ώστε τελικά να γίνουν αξιοποιήσιμα από το νευρωνικό δίκτυο (βήμα 4, διαδοχικά βήματα τεχνικής εξόρυξης δεδομένων, Κεφάλαιο 4.2 και Κεφάλαιο 4.8).

9) Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου με τον αλγόριθμο Resilient Backpropagation, χρησιμοποιώντας ως βάση μια παραλλαγή της 2<sup>ης</sup> ομάδα δεδομένων (όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.10), οδήγησε στην δημιουργία ενός προτύπου ταξινόμησης ως προς τον τύπο ατυχήματος με ποσοστό επιτυχίας 74.1% και στον έλεγχο που έγινε το δίκτυο ανταποκρίθηκε με ποσοστό επιτυχίας σωστής πρόβλεψης 70.0% (true positives). Με τον τρόπο αυτό επιβεβαιώνεται η αξιοπιστία των κριτηρίων επίδοσης του νευρωνικού δικτύου.

## Βιβλιογραφία

- [1] Martin Stopford, "Maritime Economics 3<sup>rd</sup> Edition", Taylor & Francis Ltd, 2008.
- [2] The Car Carrier Story, "A Reservoir of Innovative Technologies", [www.mol.co.jp](http://www.mol.co.jp) (Mitsui O.S.K. Lines).
- [3] IMO Resolution A.849 (20) "Code for the investigation of Marine Casualties and Incidents".
- [4] The International Salvage Union.
- [5] European Maritime Safety Agency.
- [6] Παναγιώτης Λαμπετίδης, «Ανάλυση και μελέτη της ναυλαγοράς των Car Carriers, ανάπτυξη αλγόριθμου βελτιστοποίησης των δρομολογίων πλοίων τύπου PCTC εντός ενός δικτύου ως προς το κόστος και το κέρδος και πρακτική εφαρμογή του με χρήση Γενετικών Αλγόριθμων», Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2012.
- [7] Pang-Ning Tan, Michael Steinbach, Vipin Kumar, "Introduction to Data Mining", Pearson Addison Wesley, 2006.
- [8] Jiawei Han, Micheline Kamber, "Data Mining Concepts and Techniques", 2<sup>nd</sup> edition, Morgan Kaufmann Publishers, 2006.
- [9] Κωνσταντίνος Δασκαλάκης, "Ομιλία για Τεχνητή Νοημοσύνη", Public Café Συντάγματος, 9/1/2018 (<https://www.youtube.com/watch?v=G8DRPneKEGM>, λεπτό 15:00÷20:00).
- [10] Simon Haykin, "Neural Networks: A Comprehensive Foundation", 2<sup>nd</sup> edition, Pearson Prentice Hall, 1999.
- [11] I.Lazakis, Y.Raptodimos, T.Varelas, "Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks", Ocean Engineering 2017.
- [12] Soo-Young Kim, Byung-Young Moon, Duk-Eun Kim, Sung Chul Shin, "Automation of hull plates classification in ship design system using neural network method", Mechanical Systems and Signal Processing 2006.
- [13] L.A. Le Blanca, R.R. Hashemib, C.T. Rucks, "Pattern development for vessel accidents: a comparison of statistical and neural computing techniques", Expert Systems with Applications 2001.
- [14] Ray R. Hashemi, Louis A. Le Blanc, Conway T. Rucks, Angela Shearry, "A Neural Network for Transportation Safety Modeling", Expert Systems with Applications 1995.
- [15] Neural Network Toolbox, MATLAB User's Guide, Version 4, The Mathworks.
- [16] Larsen, R. J. and Marx, M. R., "An Introduction to Mathematical Statistics and its Applications", Pearson Prentice Hall, Fourth Edition, 2006.
- [17] Χ. Δαμιανός, «Μεθοδολογία Δειγματοληψίας-Τεχνικές και Εφαρμογές», Εκδόσεις Σοφία, 2006.

[18] Riedmiller, M., and H. Braun, "A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm", *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, 1993.

[19] MATLAB's Online Documentation: <https://www.mathworks.com/help/nnet>.

[20] Tom Fawcett, "An introduction to ROC analysis, *Pattern Recognition Letters* 27 (2006) 861-74", Institute for the Study of Learning and Expertise.