



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

**“ ΣΥΣΤΗΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΡΟΡΑΧ
ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΒΛΑΒΗ ”**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΡΟΥΣΣΟΥ



ΜΕΛΗ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ:

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΖΑΡΑΦΩΝΙΤΗΣ (ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ, ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Δ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ)

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Ι. ΣΠΥΡΟΥ (ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ)

ΑΘΗΝΑ 2014

Θα ήταν παράληψη να μην ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Ζαραφονίτη για την ουσιαστική καθοδήγηση και τις εποικοδομητικές παρεμβάσεις καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Καθώς επίσης και την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη που μου πρόσφεραν και την κατανόηση τους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Σύντομη αναφορά στα πλοία τύπου «Ro-Pax»	3
1.2 Εξέλιξη κανονισμών για τα πλοία τύπου «Ro-Pax»	4
1.3 Καθορισμός προβλήματος	12
2. ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	
2.1 Ανάλυση Πιθανοθεωρητικού Μοντέλου	13
2.2 Απαιτούμενος δείκτης υποδιαίρεσης (R)	18
2.3 Πρόταση GOALDS	19
2.4 Πρόταση SLF 55	20
3. ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΤΥΠΟΥ «Ro-Pax» ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΒΛΑΒΗ	
3.1 Μεθοδολογία μελέτης ευστάθειας του πλοίου αναφοράς	21
3.2 Ναυπηγικό λογισμικό Nara	21
3.3 Σχεδίαση πλοίου αναφοράς	22
3.4 Εφαρμογή Πιθανοθεωρητικού Μοντέλου SOLAS 2009	30
3.4.1 Στεγανή υποδιαίρεση του πλοίου	30
3.4.2 Καταστάσεις φόρτωσης	32
3.4.3 Δημιουργία και εκτέλεση αλγόριθμου μακροεντολών	36
3.5 Υπολογισμός πιθανότητας απώλειας ζωής (PLL)	40
3.6 Σχολιασμός συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων και σύγκριση μεθόδων	41
4. ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΝ	
4.1 Ορισμός κριτηρίων βελτιστοποίησης της υπάρχουσας σχεδίασης	43
4.2 Εναλλακτικές σχεδιάσεις	44
4.3 Εφαρμογή Πιθανοθεωρητικού Μοντέλου (SOLAS 2009)	44
4.4 Οικονομική ανάλυση εναλλακτικών σχεδιάσεων	47
4.5 Σχολιασμός συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων	48
4.6 Τελικά συμπεράσματα	61

5. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ CROSS FLOODING PIPES ΣΤΟ ΔΕΙΚΤΗ A-INDEX ΤΗΣ SOLAS 2009

5.1 Περιγραφή λειτουργίας cross-flooding pipe	62
5.2 Εφαρμογή Πιθανοθεωρητικού Μοντέλου (SOLAS 2009) και σχολιασμός αποτελεσμάτων	63
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	
Πίνακας Α.1 Υδροστατικά Στοιχεία	68
Πίνακας Α.1 Διαμερίσματα	69
Πίνακας Α.3 Unprotected & weather tight ανοίγματα	73
Σχήμα Α.1 Εγκάρσιες τομές των cross flooding pipes (1,2,3,4,5)	76
Πίνακας Α.4 Όρια Διαμερισμάτων (Limits Table)	77

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ασφάλεια στις θαλάσσιες μεταφορές είναι ένα θέμα το οποίο έχει απασχολήσει έντονα τη ναυτιλιακή κοινότητα στο παρελθόν και συνεχίζει να απασχολεί. Πληθώρα κανονισμών και κανόνων εφαρμόζονται με κύριο μέλημα τη διαφύλαξη της ανθρώπινης ζωής. Η πίεση όμως που ασκείται από την κοινή γνώμη για αύξηση της ασφάλειας, ιδιαίτερα ύστερα από κάποιο ναυτικό ατύχημα, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν οδηγήσει στην επικράτηση της άποψης, ότι πρέπει να θεσμοθετηθούν αυστηρότεροι κανονισμοί.

Ο διεθνής ναυτιλιακός οργανισμός (ΙΜΟ) κινείται προς την κατεύθυνση αυτή διεξάγοντας μελέτες σχετικά με τις πιθανές ελλείψεις των ισχυόντων κανονισμών και τους πρόσθετους περιορισμούς που μπορούν να εφαρμοστούν. Αντικείμενο μελέτης αποτελεί και η υπάρχουσα μέθοδος αξιολόγησης του πόσο ασφαλές είναι ένα πλοίο, η οποία πραγματοποιείται μέσω του πιθανοθεωρητικού μοντέλου SOLAS 2009. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό κάθε πλοίο χαρακτηρίζεται από έναν επιτευχθέντα δείκτη υποδιαίρεσης A, ο οποίος αντιστοιχεί στην πιθανότητα επιβίωσης του πλοίου σε περίπτωση βλάβης. Το πιθανοθεωρητικό μοντέλο ορίζει ένα κατώτατο όριο του δείκτη A για το εκάστοτε πλοίο, το οποίο αντιστοιχεί στον απαιτούμενο δείκτη R.

Σε περίπτωση που εφαρμοστεί αυστηρότερο πλαίσιο κανονισμών που θα ορίζει υψηλότερο απαιτούμενο δείκτη υποδιαίρεσης R, θα υπάρχουν άμεσες συνέπειες στο σχεδιασμό και στο κόστος κατασκευής και λειτουργίας των πλοίων. Ο προβληματισμός λοιπόν έγκειται στο αν μπορούμε να σχεδιάσουμε πλοία με πολύ υψηλό δείκτη A και ως εκ τούτου πιο ασφαλή, τα οποία όμως να μην είναι οικονομικά ασύμφορα για τους πλοιοκτήτες. Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής.

Για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού, ακολουθήθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία μελέτης του πιθανοθεωρητικού μοντέλου για πλοία Ro-Pax, η οποία συνοψίζεται στα στάδια που ακολουθούν. Στο πρώτο στάδιο της μελέτης, σχεδιάστηκε ένα πλοίο αναφοράς που βασίστηκε σε υπαρκτό πλοίο και πραγματοποιήθηκαν όλα τα απαιτούμενα βήματα για την εφαρμογή του πιθανοθεωρητικού μοντέλου σε αυτό, με τη βοήθεια του προγράμματος NAPA. Στο επόμενο στάδιο της μελέτης στόχος ήταν η δημιουργία σχεδιάσεων τροποποιημένων μόνο ως προς τις δύο κύριες διαστάσεις του πλοίου (πλάτος και κοίλο), με απώτερο σκοπό τη δημιουργία μοντέλων που επιτυγχάνουν υψηλότερο δείκτη A. Η μελέτη ολοκληρώθηκε με τον υπολογισμό των οικονομικών στοιχείων των 12 εναλλακτικών σχεδιάσεων και τη σύγκριση των συνολικών αποτελεσμάτων ώστε να εκτιμηθεί αν υπάρχει περιθώριο ο κανονισμός να γίνει πιο αυστηρός. Συμπληρωματικά του πιθανοθεωρητικού μοντέλου SOLAS 2009, σε όλα τα παραπάνω στάδια πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για την πρόταση GOALDS και την πρόταση SLF55.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σύντομη αναφορά στα πλοία τύπου «Ro-Pax»

Επιβατηγά πλοία χαρακτηρίζονται εκείνα που κρίνονται κατάλληλα για μεταφορά 12 επιβατών και άνω. Υποκατηγορία των επιβατηγών πλοίων αποτελούν τα Επιβατηγά-Οχηματαγωγά πλοία «Ro-Pax» που αποτελούν κύριο τρόπο μεταφοράς επιβατών και οχημάτων. Αυτή η κατηγορία πλοίων είναι συνυφασμένη με την παροχή οικονομικής και ποιοτικής μετακίνησης των επιβατών. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με την υψηλή ταχύτητα υπηρεσίας τους, δικαιολογούν απόλυτα τον πρωταγωνιστικό ρόλο των Ro-Pax στον τομέα των σύντομων θαλάσσιων μεταφορών.

Τα πλοία Ro-Pax είναι κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να παρέχουν χώρους ενδιαίτησης για επιβάτες, ενώ ταυτόχρονα να μπορούν να φορτοεκφορτώνουν οχήματα αυτοκινούμενα (κυλιόμενα στους τροχούς τους), χωρίς να χρησιμοποιούν άλλα μέσα φορτοεκφόρτωσης. Σε αυτή την ιδιομορφία οφείλεται και η διεθνής ονομασία αυτών των πλοίων ως Roll on / Roll of passenger (to roll = κυλώ).

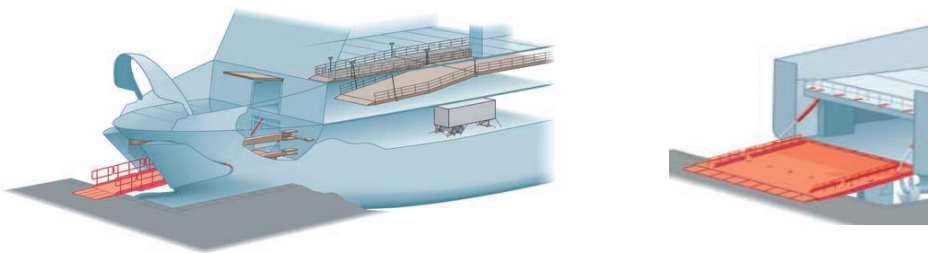
Το μέγεθος αλλά και ο σχεδιασμός τους διαφοροποιείται ανάλογα με το δρομολόγιο που εξυπηρετούν. Πιο συγκεκριμένα, τα μικρότερα πλοία της κατηγορίας με ολική χωρητικότητα της τάξης των 400 κόρων, που εκτελούν σύντομους πλόες μεταξύ κοντινών λιμανιών μεταφέρουν γύρω στους 300 επιβάτες. Τα αμέσως μεγαλύτερα πλοία σε μέγεθος είναι τα ταχύπλοα Ε/Γ-Ο/Γ, ολικής χωρητικότητας 2.500-7.000 κόρων και μεταφορικής ικανότητας που κυμαίνεται μεταξύ 1.000 και 2.000 επιβατών. Στους εσωτερικούς πλόες δραστηριοποιούνται επίσης πλοία πολύ μεγαλύτερης ολικής χωρητικότητας περίπου 75.000 κόρων, που φτάνουν σε μεταφορική ικανότητα τους 2.500 επιβάτες (σχήμα 1.1). Στο σύνολο τους τα πλοία Ro-Pax επιτυγχάνουν υψηλές ταχύτητες της τάξης των 20 έως 40 κόμβων παρά το αυξημένο λειτουργικό κόστος.



Σχήμα 1.1. «Stena Hollandica», πλοίο Ro-Pax ολικής χωρητικότητας 63.600 κόρων.

Η γενική διάταξη τους χωρίζεται σε τρία κυρίως επίπεδα ώστε να εξυπηρετείται με τον καλύτερο τρόπο ο σκοπός των πλοίων αυτών. Το κατώτερο εξ αυτών περιλαμβάνει κυρίως τους χώρους μηχανοστασίου. Στο αμέσως ανώτερο επίπεδο συμπεριλαμβάνονται τα καταστρώματα οχημάτων, ενώ στο υψηλότερο επίπεδο βρίσκονται τα καταστρώματα ενδιαίτησης των επιβατών.

Όσο αφορά στη μεταφορική ικανότητα οχημάτων των Ro-Pax, αυτή διαφέρει ανάλογα με το δρομολόγιο που εξυπηρετεί το πλοίο και εκφράζεται από το συνολικό μήκος φόρτωσης φορτηγών οχημάτων (lanes in meters) για τους χώρους που μπορούν να καταλειφθούν, είτε από φορτηγά είτε από Ι.Χ.. Η διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης των οχημάτων όπως και των επιβατών στα αντίστοιχα καταστρώματα πραγματοποιείται μέσω ειδικών ανοιγμάτων, θυρών εξοπλισμένων με ειδικούς καταπέλτες. Σε περίπτωση ύπαρξης πολλών καταστρώματων, η επικοινωνία μεταξύ τους επιτυγχάνεται μέσω ειδικών ραμπών. Η διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης στο πλοίο μπορεί να επιταχυνθεί με την ύπαρξη καταπέλτη πρόραθεν αλλά και πρύμνηθεν του πλοίου (σχήμα 1.2). Πέραν του μικρού χρονικού διαστήματος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί η φορτοεκφόρτωση με τη διαδικασία αυτή, επιτυγχάνεται επίσης η βέλτιστη εκμετάλλευση του χώρου.



Σχήμα 1.2. Απεικόνιση των τυπικών μέσων φορτοεκφόρτωσης οχημάτων σε Ro-Pax.

Τα πλοία Ro-Pax μπορούμε να τα διακρίνουμε επίσης σε «ανοιχτού» και «κλειστού» τύπου, με βάση τη διαμόρφωση του καταστρώματος οχημάτων. Ως ανοιχτού τύπου χαρακτηρίζονται όσα έχουν μόνο ένα κύριο κατάστρωμα οχημάτων το οποίο είναι ανοιχτό, μη προστατευμένο δηλαδή από πάνω. Το εκτεθειμένο κατάστρωμα επηρεάζει αρνητικά την ασφάλεια των πλοίων αυτών που τυγχάνουν μικρής συνήθως χωρητικότητας, υπαγόμενα σε πλείστους περιορισμούς. Αντίθετα τα πλοία κλειστού τύπου, διαθέτουν καλυμμένα καταστρώματα οχημάτων, γεγονός που τα καθιστά πολύ πιο ασφαλή σε ανοιχτές θάλασσες από τα ανοιχτού τύπου. Ως εκ τούτου, σήμερα μεγάλα Ro-Pax πλοία εξυπηρετούν κυρίως την τουριστική κίνηση και μεταφορές εισαγωγών και εξαγωγών που εκτελούνται σε γραμμές μεταξύ χωρών, καθώς και το σύνολο των εσωτερικών γραμμών.

❖ Ιστορική εξέλιξη των Ro-Pax

Στα πρώτα πλοία που μετέφεραν οχήματα πέραν των επιβατών, τα τροχήλατα οχήματα μεταφέρονταν ως φορτίο σε ποντοπόρα πλοία, αντιμετωπιζόμενα σαν όλα τα άλλα φορτία. Τα αυτοκινούμενα είχαν τις δεξαμενές καυσίμων άδειες και τις μπαταρίες τους απενεργοποιημένες πριν να μεταφερθούν με τη βοήθεια ανυψωτικών μέσων στα αμπάρια του πλοίου, όπου και φυλάσσονταν κλειδωμένα. Τέλος σε αυτήν την απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία, δόθηκε την περίοδο του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου, με τα πλοία απόβασης να κάνουν την εμφάνιση τους. Η λειτουργία τους ήταν απλή και βασιζόταν στην ύπαρξη πόρτας στην άκρη του πλοίου, η οποία επέτρεπε την πρόσβαση των οχημάτων στο ενιαίο κατάστρωμα οχημάτων. Σε περίπτωση που υπήρχε και δεύτερη πόρτα στην άλλη άκρη του πλοίου, η διαδικασία φορτοεκφόρτωσης

απλοποιούταν ακόμη περισσότερο καθώς τα οχήματα κατευθυνόντουσαν απευθείας μέσα στο πλοίο (roll-on) και έξω από αυτό σε άλλο λιμάνι (roll-off) σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Μετά το πέρας του πολέμου, η ιδέα αυτή λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της, υιοθετήθηκε στα εμπορικά πλοία και σε πλοία σύνδεσης κοντινών προορισμών, ιδιαίτερα σε χώρες νησιωτικές.

Στην περιοχή της Μεσογείου όπου η ανάκαμψη μετά τον πόλεμο ήταν πιο αργή από ότι στην βορειοδυτική Ευρώπη, η ανάπτυξη εμπορικής δραστηριότητας δημιούργησε την ανάγκη ναυπήγησης πολλών επιβατηγών οχηματαγωγών πλοίων στα τέλη της δεκαετίας του 50' αρχές 60'. Σε αντίθεση με την ανάπτυξη νέων σχεδίων Ro-Pax στην Βόρειο Ευρώπη, η αυξημένη ζήτηση για μεταφορά φορτηγών και αυτοκινήτων στην Μεσόγειο την δεκαετία του 60' ικανοποιήθηκε αρχικά με την εκτεταμένη μετασκευή παλαιότερων επιβατηγών, πλοίων φορτίου και δεξαμενόπλοιων. Οι κύριες τροποποιήσεις κατά τις μετασκευές ήταν η παροχή επαρκούς χώρου ενδιαιτήσεων και ανασχεδιασμός των χώρων φορτίου σε χώρους γκαράζ με πρόσβαση μέσω ραμπών στις πλευρές του πλοίου.

Τις δεκαετίες 1970-1980, η οικονομική ανάπτυξη και ευημερία στην Ευρώπη αντικατοπτρίστηκε στην ανάπτυξη όλων των μέσων μεταφοράς συμπεριλαμβανομένων και των Ro-Pax. Στην πραγματικότητα υλοποιήθηκαν σημαντικές αλλαγές στο σχεδιασμό τους, με σκοπό να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες συχνότερης σύνδεσης μεταξύ σημαντικών λιμανιών, περισσότερο χώρου μεταφοράς αυτοκινήτων και καλύτερων χώρων ενδιαιτήσης για τους επιβάτες που ταξίδευαν για αναψυχή. Τις επόμενες δεκαετίες ναυπηγήθηκαν ακόμη περισσότερα πλοία, των οποίων ο σχεδιασμός ήταν άμεσα επηρεασμένος από τις σπουδαίες τεχνολογικές εξελίξεις. Ένα χαρακτηριστικό των Ro-Pax που βελτιώθηκε σημαντικά εξαιτίας της προόδου της τεχνολογίας ήταν η ταχύτητα υπηρεσίας, η οποία έφτασε για πρώτη φορά τους 25 κόμβους και μετέπειτα αναρριχήθηκε στους 30 κόμβους. Πέραν όμως των τεχνολογικών εξελίξεων, σημαντικό ρόλο στην αύξηση της ταχύτητας έπαιξε και το μικρό κόστος των καυσίμων. Η συνεχής απαίτηση της αγοράς για μείωση του χρόνου μεταφοράς, οδήγησε στο σχεδιασμό πλοίων με διαφορετική μορφή γάστρας όπως τα καταμαράν, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο πολύ υψηλές ταχύτητες υπηρεσίας για τα πλοία αυτά (σχήμα 1.3).

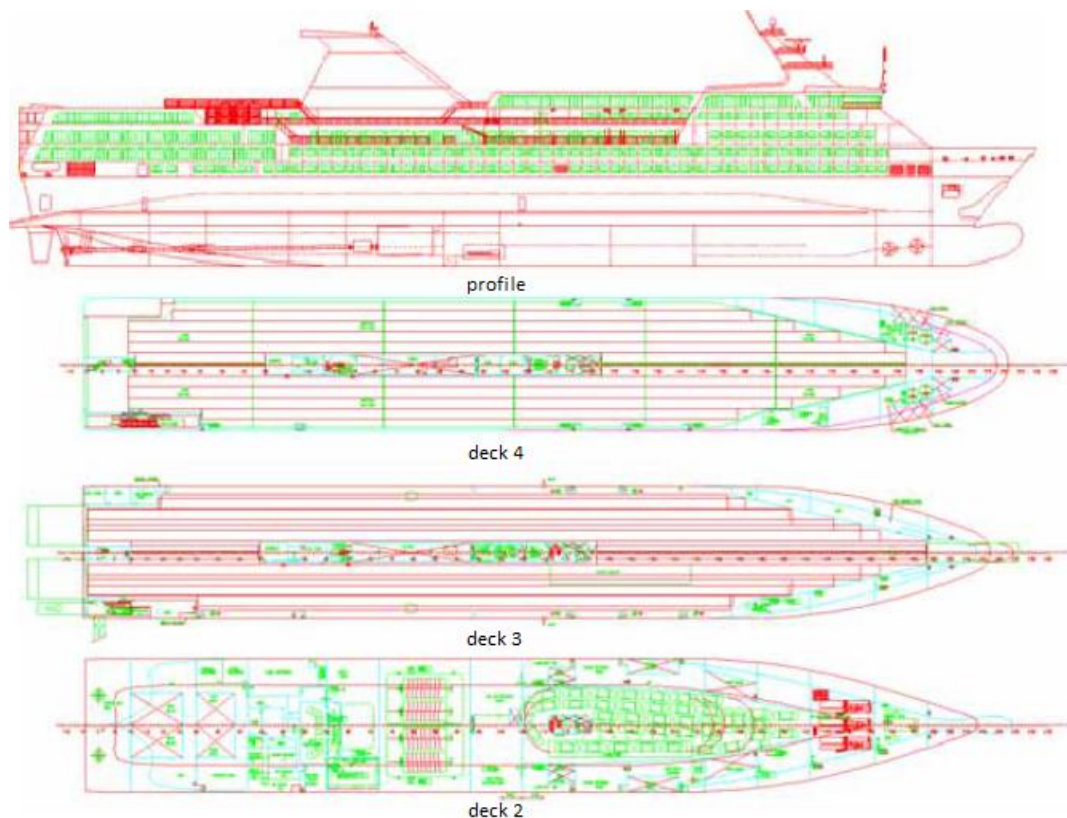


Σχήμα 1.3. Ε/Γ-Ο/Γ πλοίο τύπου καταμαράν με μέγιστη ταχύτητα 40 κόμβους.

❖ Προβλήματα ασφάλειας των πλοίων Ro-Pax

Παρά την αποδεδειγμένη εμπορική επιτυχία των πλοίων Ro-Pax, από την πρώτη στιγμή που έκαναν την εμφάνιση τους, αμφισβητήθηκε το επίπεδο ασφάλειας που παρέχουν. Η ιδιομορφία του σχεδιασμού τους τα καθιστά πολύ διαφορετικά από τους υπόλοιπους τύπους πλοίων.

Πρώτο και κύριο χαρακτηριστικό των πλοίων Ro-Pax που τα κάνει να θεωρούνται μοναδικά είναι η απουσία εσωτερικών φρακτών στο χώρο οχημάτων. Η συνεισφορά των εγκάρσιων φρακτών στα συμβατικά πλοία είναι διπλή και εξίσου σημαντική. Οι φρακτές ενισχύουν την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής, ενώ παράλληλα περιορίζουν τον όγκο κατάκλυσης σε περίπτωση ρήγματος. Ακόμη και όταν η μείωση του όγκου κατάκλυσης δεν επαρκεί για την επιβίωση του πλοίου μετά από βλάβη, ο διαθέσιμος χρόνος εκκένωσης του πλοίου αυξάνεται. Στην περίπτωση όμως των Ro-Pax κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό στον επιθυμητό βαθμό, καθώς ο σχεδιασμός τους είναι μελετημένος ώστε να επιτρέπει την κίνηση των οχημάτων από το πρυμναίο τμήμα του πλοίου στο πωραίο και αντίστροφα. Η απουσία των εγκάρσιων φρακτών έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη ενός τεράστιου ενιαίου χώρου, που σε περίπτωση πυρκαγιάς ή κατάκλυσης ο περιορισμός του προβλήματος κρίνεται πολύ δύσκολος (σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4. Τυπική διάταξη των καταστρωμάτων οχημάτων ενός Ro-Pax.

Σοβαρό μειονέκτημα αποτελεί επίσης η ύπαρξη θυρών για φορτοεκφόρτωση στα άκρα ή ακόμα και στις πλευρές των πλοίων αυτού του τύπου. Ο κίνδυνος εισροής υδάτων εξαιτίας βλάβης στα συγκεκριμένα σημεία αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, λόγω κόπωσης των τμημάτων που επωμίζονται το βάρος των οχημάτων κατά την

φορτοεκφόρτωση τους. Ένα ακόμη στοιχείο διαφοροποίησης από τα πλοία άλλου τύπου είναι η στοιβασία του φορτίου. Σε περίπτωση φόρτωσης βαρέων οχημάτων στο πλοίο, προβλέπεται η ακινητοποίηση τους με ειδικούς ιμάντες. Ωστόσο, αν δεν έχει ακολουθηθεί η προβλεπόμενη διαδικασία έχμασης κάποιου οχήματος, είναι δυνατόν εξαιτίας έντονων καιρικών φαινομένων αυτό να κυλήσει και να προξενήσει ζημιές στο κατάστρωμα, ακόμα και ρήγμα. Τέλος η εξωτερική διαμόρφωση των υπερκατασκευών και το πολύ μεγάλο ύψος τους αποτελεί ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των Ro-Pax που επηρεάζει αρνητικά την ασφάλεια τους, καθώς καθιστά δύσκολη την καθέλκυση των ναυαγοσωστικών λέμβων, ειδικότερα σε σημαντικές κλίσεις του πλοίου. Συνυπολογίζοντας όλα τα παραπάνω ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Ro-Pax, γίνεται ξεκάθαρη η πολυπλοκότητα τους και η απαίτηση πολύ προσεκτικών χειρισμών από το πλήρωμα προς αποφυγή οποιουδήποτε ανθρώπινου λάθους.

1.2 Εξέλιξη κανονισμών για τα πλοία τύπου «Ro-Pax» [1]

Το ζήτημα της ‘επιβίωσης’ του πλοίου και πιο συγκεκριμένα η αποφυγή βύθισης του μετά από κατάκλυση, ξεκίνησε να απασχολεί την κοινή γνώμη το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα. Ήδη από το 1854 στην Μ. Βρετανία είχε μπει σε ισχύ η συνθήκη “Merchant Shipping Act”, η οποία απαιτούσε την ύπαρξη φραχτών μπροστά και πίσω από το μηχανοστάσιο για πλοία μεταλλικής κατασκευής άνω των 100 τόνων. Γνωστή και ως “διάταξη των τεσσάρων διαφραγμάτων”, όριζε επίσης αναγκαία την ύπαρξη μιας μικρής φρακτής που να περικλείει το πίσω μέρος του άξονα, επιπρόσθετα της πρωαίας φρακτής που προϋπήρχε. Αυτός ο τύπος διαχωρισμού του πλοίου σε τρία υδατοστεγή τμήματα κρίθηκε ικανοποιητικός για τα μικρά σε μέγεθος πλοία της εποχής εκείνης.

Μόλις ένα χρόνο αργότερα, ο Βρετανικός Νηογνώμονας Lloyd’s πρόσθεσε επιπλέον προδιαγραφές για το ύψος και την αντοχή των φρακτών. Ενώ το 1857, μία νέα απαίτηση επέτρεψε την ταύτιση της πρυμναίας φρακτής ζυγοστάθμισης με την πρυμναία φρακτή του μηχανοστασίου, στην περίπτωση της ύπαρξης μηχανοστασίου στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου. Παρά όμως τις πρόσθετες προδιαγραφές, μόλις 8 χρόνια αφότου τέθηκε σε ισχύ η συνθήκη “Merchant Shipping Act” ανακλήθηκε, λόγω της επικρατούσας άποψης ότι η πρόσθεση δύο φραχτών δεν επαρκούσε για την ουσιαστική επιβιωσιμότητα του πλοίου. Αντί αυτού, η καταλληλότητα των προδιαγραφών σχεδίασης αφέθηκε στην κρίση του εκάστοτε μελετητή.

Η ανωτέρω άποψη όμως αμφισβητήθηκε έντονα από σημαντικές προσωπικότητες της Ναυπηγικής εκείνης της εποχής, μετά την απώλεια του επιβατηγού «London» το 1866 που κόστισε την ζωή 233 ανθρώπων. Ο Edward J. Reed γνωστός για την καθιέρωση της καμπύλης GZ και ο Scott Russell, εκ των ιδρυτών του Ινστιτούτου Ναυπηγών της Μ. Βρετανίας (INA, σήμερα RINA), πέτυχαν την έκδοση Σύστασης από το Ινστιτούτο Ναυπηγών που πρότεινε την εγκατάσταση εγκάρσιων και διαμήκη φρακτών. Επιπλέον, χαρακτήριζαν μη καλά κατασκευασμένο ένα επιβατηγό μεταλλικής κατασκευής, σε περίπτωση που μετά την απώλεια στεγανότητας ενός οποιουδήποτε διαμερίσματος δεν εξακολουθούσε να επιπλέει. Τέλος σημαντική θεωρούνταν η συνεισφορά του διπύθμενου στην αντοχή του πλοίου όσο και στον περιορισμό πιθανής κατάκλυσης διαμερισμάτων του.

Μελέτη όμως του Βρετανικού Ναυαρχείου το 1875 έδειξε ότι η σύσταση δεν έτυχε αξιόλογης αποδοχής, καθώς μόνο 30 πλοία σε δείγμα 4.000 ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις της και μέχρι το 1883 ο αριθμός αυξήθηκε στα 400. Ακόμη, σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε το 1882-1883 σημειώνεται ότι πολλές φρακτές σταματούσαν στο ύψος της ισάλου, γεγονός που τις καθιστούσε άχρηστες σε περίπτωση κατάκλυσης. Την ίδια εποχή, εισήχθη νέος κανόνας από το Βρετανικό Νηογνώμονα για τα πλοία άνω των 85,4 μέτρων, που απαιτούσε την εγκατάσταση φραχτών ανάλογα με το μήκος του πλοίου. Επιπλέον αυτού του κανόνα, το 1887 ειδική επιτροπή της Βουλής των Κοινοτήτων της Μ. Βρετανίας εξέδωσε αναφορά όπου τονιζόταν η ανάγκη κατάλληλης τοποθέτησης φραχτών, με σκοπό την επίτευξη πλευστότητας του πλοίου για κάποιο χρονικό διάστημα μετά το ατύχημα.

Οι απαιτήσεις όμως για βελτίωση της ασφάλειας του πλοίου συνεχώς αυξάνονταν και το 1890 επιτροπή από το Βρετανικό Υπουργείο Εμπορίου, γνωστή σαν First Bulkhead Committee, ανέλαβε να προσδιορίσει τον καταλληλότερο τρόπο υποδιαίρεσης των πλοίων. Η μέθοδος υποδιαίρεσης έπρεπε να εξασφαλίζει ότι το πλοίο θα επιβιώσει μετά από κατάκλυση δύο συνεχών διαμερισμάτων και να ορίζει πως το νερό θα μπορεί να περνάει από τη διαμήκη φρακτή, σε περίπτωση ύπαρξης της, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται εξισορρόπηση και να αποφεύγεται ασύμμετρη κατάκλυση. Τα κριτήρια αυτά εφαρμόστηκαν σε πλοία άνω των 425 ποδιών και τα διαμερίσματα που χωρίζονταν με διαμήκη φρακτή λαμβάνονταν σαν ένα, εκτός των περιπτώσεων που μπορούσε να αποδειχτεί ότι το στεγανό κατάστρωμα δεν βυθιζόταν λόγω πλευρικής κατάκλυσης. Ένα επιπλέον μέτρο πρόληψης της ασύμμετρης κατάκλυσης ήταν η πρόταση για εγκατάσταση βαλβίδων επικοινωνίας επί των διαμήκη φραχτών.

Η απώλεια του «Titanic», το 1912, υπήρξε η αφορμή για τη σύγκλιση στο Λονδίνο της δεύτερης Bulkhead Committee για τον προσδιορισμό των κριτηρίων που πρέπει να πληροί μια ικανοποιητική υποδιαίρεση. Ως κατακλύσιμο μήκος ορίστηκε το μέγιστο μήκος που μπορεί να έχει κάποιο διαμέρισμα ενός πλοίου, το οποίο διαμέρισμα όταν αποκτήσει ελεύθερη επικοινωνία με το περιβάλλον (ήρεμο) νερό και με βάση αποκλειστικά υδροστατική θεώρηση, δεν προκαλεί τη βύθιση του πλοίου πέραν της οριακής γραμμής. Η οριακή γραμμή (margin line) για την ασφάλεια του πλοίου καθορίστηκε στις τρεις ίντσες (76mm) κάτω από το κατάστρωμα στεγανών διαφραγμάτων.

Το 1914, η ανατροπή του επιβατηγού πλοίου «Empress of Ireland» με τραγικό απολογισμό 1.012 ανθρώπινων απωλειών, ανέδειξε την αναγκαιότητα της πραγματοποίησης της πρώτης διεθνούς συνδιάσκεψης, με θέμα την ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα. Στη Διάσκεψη αυτή που είναι γνωστή ως SOLAS, μεταξύ άλλων, καθορίστηκε μια εμπειρική μέθοδος για την οριοθέτηση των στεγανών διαφραγμάτων, με βάση τον τύπο και το μήκος του πλοίου, μέσω ενός συντελεστή στεγανής υποδιαίρεσης F. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στη Διάσκεψη αποφασίστηκε η αυστηρότητα των κανονισμών να μειώνεται σταδιακά, καθώς μεταβαίνουμε από ένα κατά κύριο λόγο επιβατηγό πλοίο προς ένα φορτηγό που καθορίζεται από το κριτήριο υπηρεσίας.

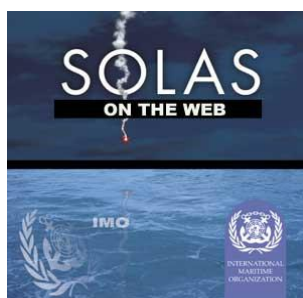
Οι εναλλακτικές προτάσεις που μελετήθηκαν εκείνη την περίοδο, δεν τέθηκαν ποτέ σε εφαρμογή, και δεν υπήρξε καμία περαιτέρω εξέλιξη λόγω του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου. Μια δεκαετία μετά το τέλος του πολέμου, το 1929, συγκλήθηκε νέα διεθνής

Διάσκεψη SOLAS, με σκοπό τον καθορισμό των πρώτων διεθνών κανονισμών για την υποδιαίρεση. Η επονομαζόμενη Διεθνής Σύμβαση SOLAS'29, υιοθέτησε τα αποτελέσματα νέας μελέτης για το συντελεστή υποδιαίρεσης και καθόρισε λεπτομέρειες για την έκταση της βλάβης.

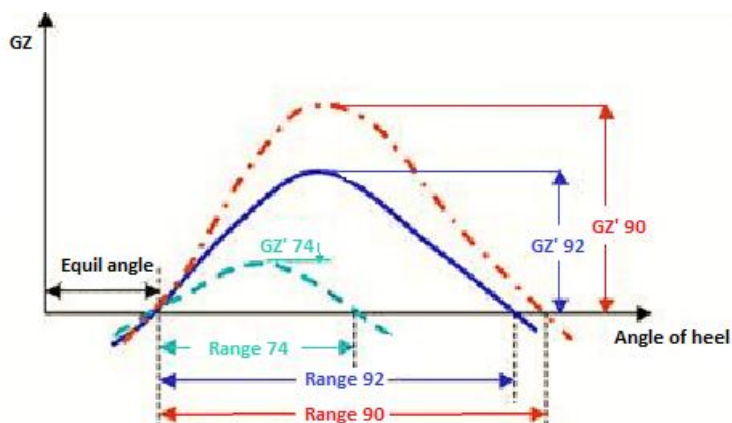
Με την πάροδο του χρόνου, το πλάτος των πλοίων άρχισε να μεγαλώνει κάνοντας το πρόβλημα της ασύμμετρης κατάκλυσης πιο επιτακτικό. Μέτρα αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος ελήφθησαν το 1948 στη νέα Διεθνή Διάσκεψη, με την έκδοση νέας σύμβασης, SOLAS 1948, στην οποία προδιαγράφονταν πλέον αναλυτικές απαιτήσεις πλευστότητας και ευστάθειας κατόπιν βλάβης για τα επιβατηγά πλοία. Οι βασικότερες απαιτήσεις ήταν ως προς την τελική κατάσταση, την μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία εγκάρσιας κλίσης επτά (7) μοιρών και το θετικό μετακεντρικό ύψος GM στην κατάσταση ισορροπίας του πλοίου. Την ίδια χρονιά ιδρύθηκε στη Γενεύη ο «Διακυβερνητικός Ναυτιλιακός Συμβουλευτικός Οργανισμός» IMCO, υπηρεσία του ΟΗΕ για θέματα σχετικά με την ασφάλεια της διεθνούς ναυσιπλοΐας, που αργότερα μετονομάστηκε σε «Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός» IMO.

Το 1960, συγκλήθηκε νέα SOLAS όπου τέθηκε κατώτατη αποδεκτή τιμή του μετακεντρικού ύψους GM ίση με 0,05 μέτρα μετά από βλάβη, ώστε να εξισορροπούνται οι επιδράσεις από τα κύματα και τον άνεμο. Αναθεωρημένο και πιο αυστηρό μοντέλο αυτών των κανονισμών θεοπίστηκε με τη SOLAS του 1974. Ωστόσο το έτος 1960, ένα νέο πιθανοθεωρητικό μοντέλο καθορισμού της ευστάθειας μετά από κατάκλυση δημοσιεύτηκε από το Γερμανό καθηγητή K. Wendel [2]. Η πρόταση της εργασίας έγινε αποδεκτή από τον IMO και συμπεριλήφθηκε στη SOLAS'74 μέσω της Διακήρυξης (IMO Resolution A.265 [3]) ως εναλλακτική μέθοδος υπολογισμού της ευστάθειας.

Ταυτόχρονα το προσδιοριστικό μοντέλο απαιτούμενης ευστάθειας μετά από βλάβη συμπληρώθηκε με πρόσθετες προδιαγραφές για την ευστάθεια του πλοίου, όταν εισήχθησαν νέα κριτήρια το 1980. Αυτά αφορούσαν τα ενδιάμεσα στάδια κατάκλυσης και το απαιτούμενο εύρος της καμπύλης του μοχλοβραχίονα ευστάθειας μετά από βλάβη. Δύο σημαντικά ατυχήματα επιβατηγών πλοίων την ίδια δεκαετία, με συνέπεια την απώλεια πολλών ανθρώπινων ζωών, οδήγησαν στην υιοθέτηση ακόμα πιο αυστηρών κανονισμών. Πιο συγκεκριμένα η ανατροπή του «European Gateway» λόγω σύγκρουσης, το 1982, και του «Herald of Free Enterprise» κατά την έξοδό του από το λιμάνι Zeebrugge, το 1987, οδήγησαν τις αρχές στην εισαγωγή νέων κριτηρίων στην υπάρχουσα SOLAS'74, δημιουργώντας την SOLAS'90.



Στο σχήμα 1.5 φαίνεται σχηματικά η ποιοτική εξέλιξη των κριτηρίων ευστάθειας κατόπιν βλάβης των επιβατηγών πλοίων.



Σχήμα 1.5. Ποιοτική εξέλιξη κριτηρίων ευστάθειας κατόπιν βλάβης επιβατηγών πλοίων.

Τα νέα κριτήρια προσδιόρισαν την ελάχιστη τιμή του εύρους του μοχλοβραχίονα ευστάθειας GZ , την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη του μοχλοβραχίονα ευστάθειας και την γωνία ισορροπίας μετά από βλάβη ενός ή δύο διαμερισμάτων. Η εναρμόνιση με τους νέους κανονισμούς για τα υπάρχοντα πλοία έγινε σταδιακά και η ημερομηνία μέχρι την οποία έπρεπε να έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή για ένα πλοίο, υπολογιζόταν με βάση ένα απλοποιημένο πιθανοθεωρητικό μοντέλο.

Τέσσερα χρόνια αργότερα όμως από την δημιουργία της τελευταίας SOLAS, μια ακόμα απώλεια πλοίου επαναφέρει το θέμα της επάρκειας των ισχυόντων κανονισμών περί ασφάλειας των Ro-Pax πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, ήταν η ανατροπή του πλοίου «Estonia» με τραγικό απολογισμό 852 ανθρώπινες απώλειες που υπήρξε η αφορμή για την επανεξέταση των ισχυόντων κανονισμών που όρισε ο IMO (πίνακας 1.1). Η επιτροπή που επανεξέτασε την επάρκεια των κανονισμών θέλησε να ορίσει μέτρα, που θα βελτιώναν ουσιαστικά την ευστάθεια των πλοίων με μεγάλους χώρους οχημάτων και για το λόγο αυτό, πρότεινε να εξετάζεται η ευστάθεια λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη ορισμένης ποσότητας νερού στο κατάστρωμα οχημάτων. Η πρόταση χαρακτηρίστηκε υπερβολικά αυστηρή λόγω του υψηλού κόστους για τον πλοιοκτήτη, αποτυγχάνοντας εξαιτίας αυτού να γίνει καθολικά αποδεκτή στον IMO. Παρά το γεγονός αυτό, επτά βορειοευρωπαϊκές χώρες έκαναν χρήση του δικαιώματος τους για θέσπιση τοπικών συμβάσεων και το 1996 στη Στοκχόλμη συμφωνήθηκε η γνωστή “Stockholm Regional Agreement”. Ουσιαστικά το περιεχόμενο της ήταν μια μερική τροποποίηση των προτάσεων της Επιτροπής Ειδικών και αφορούσε μόνο τα πλοία που έπλεαν στην περιοχή της βορειοδυτικής Ευρώπης.

Πίνακας 1.1. Σημαντικά ναυτικά ατυχήματα πλοίων Ro-Pax και οι νομοθετικές ρυθμίσεις που προκάλεσαν.

A/A	ΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΟΥ	ΕΤΟΣ	ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΗ ΠΡΑΞΗ
1	Titanic	1912	SOLAS 1914
2	Torrey Canyon	1967	MARPOL 1973 STCW 1978
3	Herald of Free Enterprize	1987	IMO A. 547(16) SOLAS τροποποιήσεις
4	Exxon Valdez	1989	OPA 1990 (ΗΠΑ) MARPOL τροποποιήσεις
5	Scandinavian Star	1990	STCW τροποποιήσεις 1995 IMO A.680(12) & A.741(18) Safety Management System (Νορβηγία)
6	Estonia	1994	SOLAS κεφάλαιο IX (ISM Code) E.E. κανονισμός No 3051/95

Αφορμή για την εφαρμογή του κριτηρίου Stockholm Regional Agreement και στις υπόλοιπες περιοχές της Ευρώπης υπήρξε η βύθιση του ελληνικού Ro-Pax «Express Samina» το 2000 με 81 νεκρούς ύστερα από πρόσκρουση σε νησίδα. Ως εκ τούτου, σύμφωνα με την Οδηγία 25 [Directive/25 (2003)], τα πλοία που πλέουν στα ύδατα της Ευρωπαϊκής Ένωσης οφείλουν να ικανοποιούν το κριτήριο Stockholm Regional Agreement.

Η πληθώρα των κανονισμών, όσο αφορά στην θεωρητική τους βάση αλλά και την διαμόρφωση τους ανάλογα με το είδος του πλοίου, οδήγησε στην επιτακτική ανάγκη δημιουργίας ενός νέου εναρμονισμένου ενιαίου πλαισίου κανονισμών για όλους τους τύπους πλοίων. Προς εξυπηρέτηση αυτού του σκοπού οργανώθηκε ένα μεγάλο ερευνητικό πρόγραμμα ευρωπαϊκής κλίμακας (HARDER– Harmonization of Rules and Design Rational, 1999-2003 [4]). Το HARDER ήταν ένα ερευνητικό πρόγραμμα, το οποίο είχε αναλάβει μια ευρωπαϊκή κοινοπραξία βιομηχανικών, ερευνητικών και ακαδημαϊκών ινστιτούτων, με αντικείμενο την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την μελέτη μέσω πιθανοθεωρητικής προσέγγισης της ευστάθειας μετά από βλάβη ενός πλοίου. Επιπλέον, σκοπός ήταν η δημιουργία νέων κριτηρίων όσο αφορά στην υποδιαίρεση του πλοίου στηριζόμενων στην πιθανότητα επιβίωσης, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις τυχόν επιδράσεις από κυματισμούς και τις γωνίες κλίσης του πλοίου.

Το Μάιο του 2003, στα πλαίσια της εργασίας του «International Correspondence Group IMO-ISCG-SLF47», πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί του απαιτούμενου δείκτη υποδιαίρεσης R για συνολικό δείγμα 52 πλοίων (32 επιβατηγά και 20 φορτηγά πλοία). Αντικείμενο της εργασίας ήταν και η εκτίμηση εναλλακτικών τρόπων υπολογισμού του δείκτη R. Αποτέλεσμα των ερευνών που προαναφέρθηκαν ήταν η δημιουργία της πρότασης SLF47 (SLF47/3/3, 2004 [5]), ενώ το Σεπτέμβριο του ίδιου έτους ολοκληρώθηκε η μελέτη εναρμόνισης της πρότασης αυτής σε όλους τους τύπους πλοίων.

Δείγμα των προσπαθειών αυτών αποτελεί ο μεγάλος αριθμός των ερευνητικών προγραμμάτων που έχουν δημιουργηθεί με σκοπό την περαιτέρω μελέτη των ισχυόντων κανονισμών ευστάθειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ερευνητικό έργο GOALDS (Goal based Damage Stability), που ολοκληρώθηκε το 2012 και ένας από τους κύριους σκοπούς του ήταν η ανάπτυξη μιας βελτιωμένης διατύπωσης

για τον υπολογισμό του δείκτη επιβιωσιμότητας «si». Τα αποτελέσματα μάλιστα του προγράμματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν μεταγενέστερα στην δημιουργία της πρότασης SLF 55, η οποία συμπεριλαμβάνει στον υπολογισμό της ευστάθειας ύστερα από βλάβη την επίδραση της υπαρξής νερού στο κατάστρωμα οχημάτων.

1.1 Καθορισμός προβλήματος

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, τα πλοία τύπου Ro-Pax για να θεωρηθούν αξιόπλοια όσο αφορά στην ευστάθεια τους, οφείλουν να ικανοποιούν την SOLAS 2009. Επί του παρόντος, το επίπεδο ασφάλειας των πλοίων που επιβάλει ο ισχύων κανονισμός θεωρείται ικανοποιητικός. Επιθυμία όμως όλων είναι στο μέλλον να ναυπηγούνται πλοία μεγαλύτερης ασφάλειας, το οποίο συνεπάγεται αυστηρότερους κανονισμούς. Στην περίπτωση της επιβίωσης του πλοίου μετά από βλάβη, ο αυστηρότερος κανονισμός ορίζει ουσιαστικά υψηλότερο όριο απαιτούμενου δείκτη υποδιαίρεσης (R). Βέβαια προτού πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε αλλαγή τέτοιου είδους στους ισχύοντες κανονισμούς, είναι απαραίτητο να εξεταστεί το κατά πόσο είναι εφικτό να σχεδιαστούν πλοία που να μπορούν να ξεπεράσουν ένα υψηλότερο όριο του απαιτούμενου δείκτη υποδιαίρεσης από το υπάρχον.

Σαφώς υπάρχει πληθώρα εναλλακτικών σχεδιάσεων ενός πλοίου, που μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις ενός αυστηρότερου κανονισμού. Οι διαφορετικές σχεδιάσεις όμως, πέρα από τον επιτευχθέντα δείκτη υποδιαίρεσης διαφέρουν και ως προς το κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Είναι, συνεπώς, πολύ πιθανό η εκπόνηση της σχεδίασης με πολύ υψηλό δείκτη A να οδηγήσει σε ένα πλοίο οικονομικά ασύμφορο. Χωρίς αμφιβολία θα ήταν πάρα πολύ δύσκολο να γίνει καθολικά αποδεκτή η εφαρμογή ενός κανονισμού που έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές οικονομικές επιβαρύνσεις, ακόμη και αν πρόκειται για την προστασία της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητο να εξεταστεί πρώτα η δυνατότητα σχεδίασης πλοίων που θα επιτυγχάνουν υψηλότερο δείκτη A, ενώ θα παραμένουν ταυτόχρονα συμφέροντα από οικονομικής πλευράς, έτσι ώστε να αξιολογηθεί το κατά πόσο είναι δυνατόν να τροποποιηθεί ο ισχύων κανονισμός.

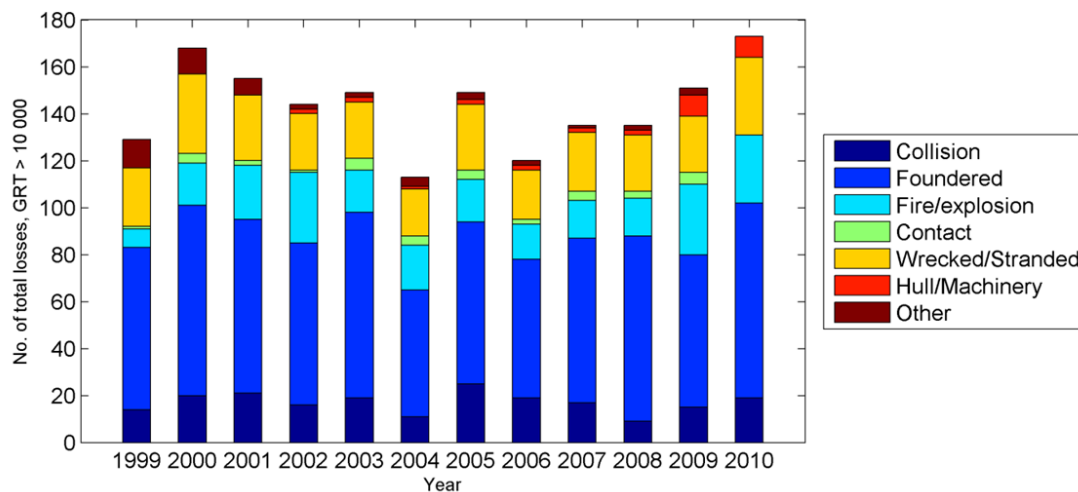
Για να απαντηθεί το ερώτημα που παρουσιάστηκε προηγουμένως, αρχικά απαιτείται η ανεύρεση χαρακτηριστικών σχεδίασης των πλοίων τύπου Ro-Pax, η μεταβολή των οποίων επηρεάζει σημαντικά το δείκτη υποδιαίρεσης. Σε δεύτερο στάδιο πρέπει να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν τα οικονομικά στοιχεία του πλοίου, έτσι ώστε να αξιολογηθεί αν κάποια από τις τροποποιημένες σχεδιάσεις είναι οικονομικά συμφέρουσα. Ο τελικός στόχος είναι εξετάζοντας τα αποτελέσματα να μπορούμε να αποφανθούμε αν υπάρχει το περιθώριο να εφαρμοστεί ένα αυστηρότερο πλαίσιο κανονισμών σχετικά με την ευστάθεια των πλοίων τύπου Ro-Pax μετά από βλάβη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

2.1 Ανάλυση Πιθανοθεωρητικού Μοντέλου

Η ιδέα της πιθανοθεωρητικής μεθόδου παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από το Γερμανό καθηγητή Kurt Wendel το 1960 και έγινε αντικείμενο προβληματισμού για πολλούς ειδικούς. Η αρχική ιδέα υπέστη επεξεργασία και αναπτύχθηκε περαιτέρω ύστερα από συλλογή αρκετών στατιστικών στοιχείων που αφορούσαν ατυχήματα σύγκρουσης, από τους Comstock & Robertson (1961), Volkov (1963), Wendel (1968), καθώς και από υποεπιτροπές του IMO. Λίγα χρόνια αργότερα, έγινε η επίσημη υιοθέτηση των «Ισοδύναμων κανονισμών υποδιαίρεσης και ευστάθειας» των επιβατηγών πλοίων [IMO (1974)], (Assembly Resolution A.265) ως εναλλακτική προς τη προδιαγραφόμενη στη SOLAS μέθοδο.

Κατά τους υπολογισμούς δεν εξετάζονται όλα τα ενδεχόμενα που δυνητικά θέτουν το πλοίο σε κίνδυνο λόγω κατάκλυσης. Η επιβιωσιμότητα του πλοίου υπολογίζεται μόνο για ρήγμα προερχόμενο από ατύχημα σύγκρουσης. Η τακτική αυτή ακολουθήθηκε εξαιτίας του σημαντικού αριθμού αυτού του τύπου ατυχημάτων που οδήγησαν σε ολική απώλεια του πλοίου. Ακόμη και σήμερα, οι συγκρούσεις αποτελούν συχνή αιτία ολικής απώλειας ενός πλοίου όπως διαφαίνεται και από την αναφορά των ετήσιων παγκόσμιων ατυχημάτων για την χρονική περίοδο 1999-2010 (Lloyd's register 199-2010 [6]). Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1, κατά τη διάρκεια της πρώτης δεκαετίας της χιλιετίας, οι συγκρούσεις ήταν υπεύθυνες για το 10% των συνολικών απωλειών πλοίων, ποσοστό που αντιστοιχεί περίπου σε 15-20 πλοία παγκοσμίως ετησίως.



Σχήμα 2.1: Αριθμός συνολικών απωλειών πλοίων με GRT>10.000 tons κατά την περίοδο 1999-2010 (Lloyd's register 1999-2010).

Όσο αφορά στις καταστάσεις βλάβης που προέρχονται από προσάραξη ή εμβολισμό, αντιμετωπίζονται με την εισαγωγή προσδιοριστικών περιορισμών. Πιο συγκεκριμένα, η ασφάλεια του πλοίου έναντι προσάραξης εξασφαλίζεται από το ντετερμινιστικό καθορισμό του ελάχιστου ύψους διπυθμένων, ενώ ο καθορισμός της θέσης της προραίας φρακτής σύγκρουσης (collision bulkhead) βελτιώνει την απόκριση του πλοίου σε περίπτωση που εμβολίσει κάποιο άλλο πλοίο.

Η θέση και η έκταση μιας βλάβης θεωρούνται τυχαίες μεταβλητές. Η εκάστοτε βλάβη περιγράφεται πλήρως από τη θέση του κέντρου της κατά μήκος του πλοίου και τη

διαμήκη έκταση της, την εισχώρησή της κατά τη διεύθυνση του πλάτους του πλοίου και από την κατακόρυφή της έκταση. Τα παραπάνω στοιχεία της βλάβης συσχετίζονται με τους συντελεστές p_i , r_i και v_i αντιστοίχως, που εμφανίζονται κατά τον υπολογισμό του δείκτη A .

Ο Επιτευχθείς Δείκτης Υποδιαίρεσης (Attained Subdivision Index) αντιστοιχεί στο άθροισμα όλων των γινομένων ($wfi \cdot Ai$), για όλες τις πιθανές καταστάσεις βλάβης σε ένα αριθμό ορισμένων αρχικών καταστάσεων φόρτωσης. Οι τιμές του συντελεστή A κυμαίνονται μεταξύ του 0 και του 1, ενώ δύο πλοία με τον ίδιο δείκτη A θεωρούνται το ίδιο ασφαλή. Ο τύπος υπολογισμού του δείκτη A είναι ο παρακάτω:

$$A = \sum_{i=1}^t wfi * Ai$$

Όπου:

Ai : Επιτευχθείς Δείκτης Υποδιαίρεσης της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης (βυθισματος)

wfi : συντελεστής βάρους της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης

Η συνεισφορά της κάθε κατάστασης βλάβης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Ai = \sum_{i=1}^t pi * vi * si$$

Όπου,

i : το σενάριο βλάβης που εξετάζεται

t : το σύνολο των σεναρίων βλαβών

p_i : η πιθανότητα ότι μόνο ο χώρος (ή οι χώροι) στη συγκεκριμένη διαμήκη θέση του πλοίου θα κατακλυσθεί, αγνοώντας την οριζόντια υποδιαίρεση. Ο συντελεστής p_i εμπεριέχει και το συντελεστή r_i , που σε περίπτωση ύπαρξης διαμήκους φρακτής εκφράζει την πιθανότητα μη κατάκλυσης των εσωτερικών διαμερισμάτων (in board rooms).

v_i : η πιθανότητα μη κατάκλυσης του χώρου πάνω από την κάθετη υποδιαίρεση

s_i : η πιθανότητα το πλοίο να μην ανατραπεί και να μη βυθιστεί μετά από την αντίστοιχη κατάκλυση

Ο συντελεστής p_i εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία της στεγανής υποδιαίρεσης του πλοίου με εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές (μέσω του συντελεστή r).

Ο συντελεστής v_i εξαρτάται από την οριζόντια στεγανή υποδιαίρεση του πλοίου με καταστρώματα και από το βύθισμα στην αρχική άθικτη κατάσταση φόρτωσης.

Ο συντελεστής s_i εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ευστάθειας του πλοίου μετά από βλάβη για τη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης. Εκφράζει την πιθανότητα να επιβιώσει το πλοίο, δηλαδή να μην ανατραπεί και να μη βυθιστεί μετά από βλάβη.

Για $s_i = 0$ το πλοίο χάνεται, ενώ για $s_i = 1$ το πλοίο θεωρείται ότι έχει 100% πιθανότητα να επιβιώσει. Για ενδιάμεσες τιμές του συντελεστή, υπάρχει s πιθανότητα να επιβιώσει το πλοίο. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του δείκτη είναι οι παρακάτω:

- ✓ Το αρχικό βύθισμα και το μετακεντρικό ύψος GM
- ✓ Η θέση, έκταση και διαχωρητικότητα των χώρων που κατακλύζονται
- ✓ Οι καιρικές συνθήκες τη στιγμή της βλάβης
- ✓ Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του πλοίου

Ο υπολογισμός του δείκτη της εκάστοτε βλάβης υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$S_i = \text{minimum}\{S_{\text{intermediate},i} \text{ or } S_{\text{final},i} * S_{\text{mom},i}\}$$

Όπου,

$S_{\text{intermediate},i}$: η πιθανότητα να επιβιώσει το πλοίο όλων των ενδιάμεσων σταδίων κατάκλισης μέχρι το τελικό στάδιο εξισορρόπησης

$$S_{\text{intermediate},i} = \left[\frac{GZ_{\text{max}}}{0,05} \cdot \frac{\text{Range}}{7} \right]^{1/4}$$

Σε περίπτωση που σε ενδιάμεσο στάδιο η γωνία κλίσης ξεπεράσει τις 15° το $S_{\text{intermediate},i} = 0$.

$S_{\text{final},i}$: η πιθανότητα επιβίωσης στο τελικό στάδιο κατάκλισης

$$S_{\text{final}} = K \cdot \left[\frac{GZ_{\text{max}}}{0,12} \cdot \frac{\text{Range}}{16} \right]^{1/4},$$

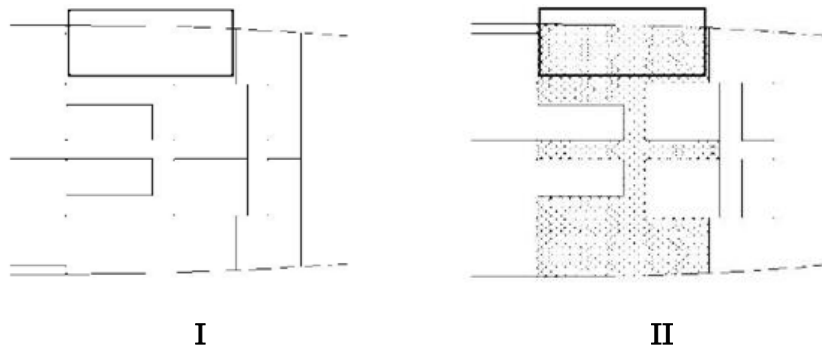
Όπου, $K = 1$, αν $\theta_e \leq 7$, $K = \left[\frac{15 - \theta_e}{8} \right]^{1/2}$, αν $7 < \theta_e < 15$, $K = 0$, αν $\theta_e \geq 15$

$S_{\text{mom},i}$: είναι η πιθανότητα επιβίωσης υπό εγκάρσια ροπή

$$S_{\text{mom},i} = \frac{(GZ_{\text{max}} - 0,04) * \text{Displacement}}{\text{Mheel}}$$

Όπου, Displacement αντιστοιχεί στο εκτόπισμα στο subdivision draught και Mheel είναι η μέγιστη εγκάρσια ροπή που ασκείται στο πλοίο.

Ο Επιτευχθείς Δείκτης Υποδιαίρεσης A συγκρίνεται με τον Απαιτούμενο Δείκτη Υποδιαίρεσης R (Required Subdivision Index), και πρέπει να ισχύει η ανισότητα $A > R$ για να θεωρείται ένα πλοίο ασφαλές. Για τον υπολογισμό των p , v και r μόνο η ζημία πρέπει να εξεταστεί, ενώ για τον υπολογισμό του s εκτιμάται ο πλημμυρισμένος χώρος. Τα σχήματα 2.2 (I,II) επεξηγούν τη διαφορά.



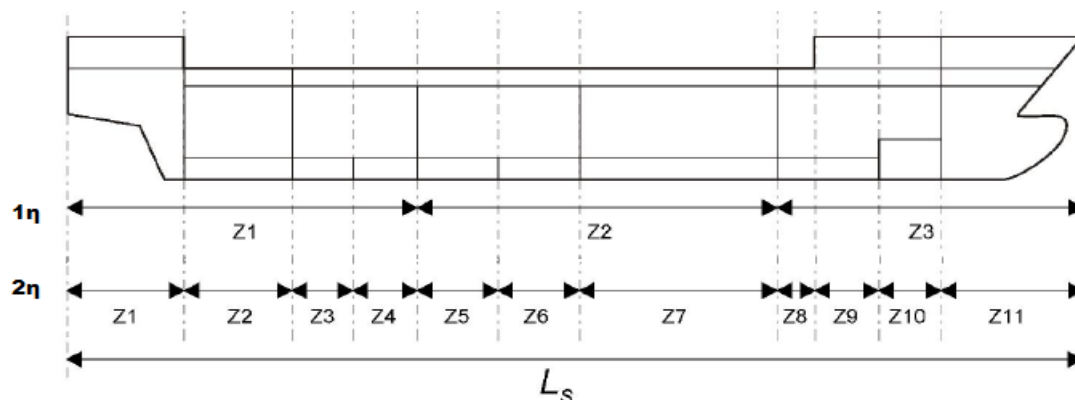
Σχήμα 2.2: (I) Βλάβη του πλοίου απεικονιζόμενη ως τετράγωνο.
(II) Μαυρισμένος ο πλημμυρισμένος χώρος λόγω βλάβης του πλοίου.

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο η στεγανή υποδιαίρεση του πλοίου επηρεάζει τους συντελεστές που αναφέρθηκαν παραπάνω και σχετίζονται με την έκταση της βλάβης.

➤ Υποδιαίρεση με εγκάρσιες στεγανές φράκτες

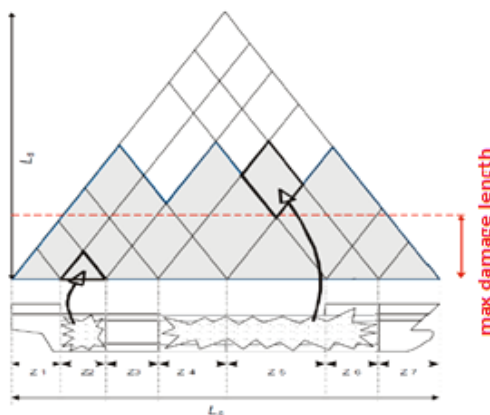
Για τον υπολογισμό του δείκτη A απαιτείται ο χωρισμός του μήκους υποδιαίρεσης του πλοίου σε έναν αριθμό ζωνών «damage zones», που συνήθως οριοθετούνται από τη θέση των εγκάρσιων στεγανών φρακτών. Για κάθε ζώνη υπολογίζεται διαφορετική τιμή του συντελεστή p . Είναι δυνατός ο ορισμός λιγότερων ή και περισσότερων ζωνών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Όμως, σε κάθε περίπτωση σκοπός είναι ο επιτευχθείς δείκτης A να είναι μεγαλύτερος από τον απαιτούμενο R (Required) που προκύπτει από τον κανονισμό.

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί τρόποι θεώρησης υδατοστεγών διαμερισμάτων. Στην πρώτη περίπτωση όπου έχει οριστεί μικρός αριθμός ζωνών, αυξάνεται η πιθανότητα ο συντελεστής s που υπολογίζεται σε μία ζώνη να είναι μηδέν, δηλαδή το πλοίο να μην επιβιώνει σε περίπτωση κατάκλυσης αυτής της ζώνης. Στη δεύτερη περίπτωση, που τα όρια των ζωνών συμπίπτουν με τις θέσεις των εγκάρσιων στεγανών φρακτών αναμένονται περισσότερες καταστάσεις βλάβης όπου ο συντελεστής επιβίωσης s θα έχει μεγαλύτερη συνεισφορά ($0 < s \leq 1$).



Σχήμα 2.3: Θεώρηση Υδατοστεγών Ζωνών [Velschou & Schroter (2001)].

Στο σχήμα 2.4, τα τρίγωνα αντιστοιχούν στην περίπτωση κατάκλυσης μονής ζώνης, ενώ τα παραλληλόγραμμα αντιστοιχούν στην περίπτωση κατάκλυσης συνδυασμού παρακείμενων ζωνών. Η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή ορίζει το μέγιστο μήκος βλάβης.



Σχήμα 2.4: Τρίγωνα πιθανοτήτων κατάκλυσης.

➤ Υποδιαίρεση με διαμήκεις στεγανές φράκτες

Μία βλάβη μπορεί να εκτείνεται κατά τη διεύθυνση του πλάτους του πλοίου από το εξωτερικό κέλυφος μέχρι τη κεντρική γραμμή. Σε περίπτωση ύπαρξης διαμήκους φρακτής υπολογίζουμε το συντελεστή r , ο οποίος εκφράζει την πιθανότητα κατάκλυσης μόνο των εξωτερικών διαμερισμάτων (wing compartments), ή ισοδύναμα εκφράζει την πιθανότητα μη κατάκλυσης των εσωτερικών διαμερισμάτων (in board rooms).

Ο συντελεστής r_i εξαρτάται από την απόσταση b της διαμήκους φρακτής από το εξωτερικό κέλυφος. Η απόσταση αυτή μετρείται στο μέγιστο βύθισμα υπολογισμού (ds) ως οριζόντια εγκάρσια απόσταση. Ο συντελεστής r παίρνει την τιμή 1, όταν η διαμήκης φρακτή απέχει απόσταση ίση ή μεγαλύτερη από $B/2$ από την πλευρά, όπου B το μέγιστο πλάτος του πλοίου στο μέγιστο βύθισμα υπολογισμού (ds).

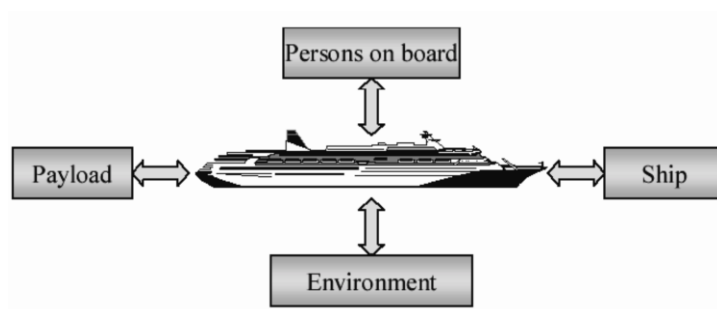
➤ Υποδιαίρεση με καταστρώματα

Στους νέους κανονισμούς έχει συμπεριληφθεί ο συντελεστής v_i , ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν και η οριζόντια στεγανή υποδιαίρεση του πλοίου με καταστρώματα. Το ενδεχόμενο να μην κατακλυστεί ο χώρος πάνω από την οριζόντια υποδιαίρεση εκφράζεται με την πιθανότητα v_i και αν $s_i > 0$, προκύπτει θετική συνεισφορά στο δείκτη υποδιαίρεσης A . Αυτό σημαίνει ότι υπολογίζεται η προσαυξημένη ασφάλεια του πλοίου έναντι κατάκλυσης.

Επίσης, σύμφωνα με τον κανονισμό η μέγιστη δυνατή καθ' ύψος έκταση της βλάβης ορίζεται από το άθροισμα $d + 12,5\text{m}$, όπου d το εκάστοτε βύθισμα του πλοίου. Για τον καθορισμό του συντελεστή v_i λαμβάνονται ως όρια μόνο όσα καταστρώματα βρίσκονται πάνω από την ίσαλο. Ωστόσο, τα καταστρώματα που βρίσκονται κάτω από την ίσαλο λαμβάνονται υπ' όψιν στον καθορισμό των πιθανών σεναρίων κατάκλυσης, από τα οποία προκύπτει το χειρότερο s , δηλαδή η μικρότερη τιμή για την πιθανότητα επιβίωσης του πλοίου.

2.2 Απαιτούμενος δείκτης υποδιαίρεσης R

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να εξεταστεί αν ένα πλοίο είναι ασφαλές συγκρίνεται ο επιτευχθείς δείκτης υποδιαίρεσης A με τον απαιτούμενο δείκτη υποδιαίρεσης R (Required Subdivision Index). Σύμφωνα με τον κανονισμό SOLAS Part B-1, ο δείκτης R ήταν κοινός για τα πλοία διαφορετικού τύπου και εξαρτιόταν μόνο από το μήκος υποδιαίρεσης του. Στον παρόντα όμως κανονισμό ο απαιτούμενος δείκτης υποδιαίρεσης διαφοροποιείται ανάλογα με τον τύπο του πλοίου. Η τροποποίηση του δείκτη βασίστηκε γενικότερα στο γεγονός ότι η απαιτούμενη ασφάλεια του πλοίου εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων, όπως είναι ο αριθμός των επιβατών, το φορτίο του και το περιβάλλον. Η αλληλεπίδραση των παραγόντων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.5 που ακολουθεί:



Σχήμα 2.5: Αλληλεπίδραση παραγόντων που επηρεάζουν την ασφάλεια του πλοίου.

Για τα επιβατηγά πλοία ο δείκτης R δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$R = 1 - \frac{5000}{L_s + 2,5 * N_p + 15.225}$$

Όπου,

L_s : μήκος υποδιαίρεσης του πλοίου

$N_p = N1 + 2 \cdot N2$

$N1$: ο αριθμός των ανθρώπων πάνω στο πλοίο, για τους οποίους παρέχονται σωσίβιες λέμβοι

$N2$: ο αριθμός των ανθρώπων (συμπεριλαμβανομένων των αξιωματικών και του πληρώματος) που επιτρέπονται πάνω στο πλοίο, επιπλέον του $N1$.

2.3 Πρόταση GOALDS

Το 2009 ξεκίνησε το ερευνητικό έργο GOALDS (Goal based Damage Stability) [7], που αποτελεί ένα από τα ερευνητικά προγράμματα της Ε.Ε. σχετικά με την αναθεώρηση των κανονισμών ασφαλείας και ολοκληρώθηκε το 2012. Οι στόχοι του προγράμματος ήταν οι εξής:

- Ανάπτυξη μιας βελτιωμένης διατύπωσης για τον υπολογισμό του δείκτη επιβιωσιμότητας s_i που θα λαμβάνει υπ' όψιν βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους, καθώς και τη χρονική εξέλιξη της διαδικασίας κατάκλυσης.
- Ανάπτυξη μιας νέας μεθοδολογίας αξιολόγησης της ευστάθειας πλοίων μετά από βλάβη, που θα περιλαμβάνει τόσο πλευρικές βλάβες λόγω σύγκρουσης με άλλο πλοίο όσο και βλάβες στον πυθμένα λόγω προσάραξης.
- Επαλήθευση της νέας μεθοδολογίας μέσω πειραμάτων και αριθμητικών υπολογισμών.
- Διατύπωση νέων απαιτήσεων ευστάθειας μετά από βλάβη με εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης επικινδυνότητας (risk based).
- Διερεύνηση των επιπτώσεων της νέας μεθοδολογίας αξιολόγησης πλοίων μετά από βλάβη, με την εκπόνηση μιας σειράς νέων σχεδιάσεων πλοίων.
- Υποβολή σχετικής πρότασης αναθεώρησης των κανονισμών στον IMO.

Σύμφωνα με τη μέθοδο GOALDS το κρίσιμο σημαντικό ύψος κύματος υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο και ο δείκτης s_i από το ολοκλήρωμα που ακολουθεί.

$$H_{Scrit} = \frac{A_{GZE}}{\frac{1}{2} * GM_f * Range} V_R^{1/3}$$

Όπου,

A_{GZE} : η περιοχή κάτω από την καμπύλη εναπομένουσας ευστάθειας μέχρι τη γωνία κατάκλυσης [rad·m]

GM_f : το μετακεντρικό ύψος του κατακλυσθέντος πλοίου [m]

V_R : ο υπολειπόμενος όγκος – ο όγκος των στεγανών διαμερισμάτων που επικοινωνούν με τη θάλασσα [m³]

Range: το εύρος της ευστάθειας μέχρι τη γωνία κατάκλυσης [rad]

$$S(Hs) = \int_0^{H_{Scrit}} dHs * f_{Hs|coll} * (Hs) = \exp(-\exp(0,16 - 1,2 * H_{Scrit}))$$

2.4 Πρόταση SLF55

Η πρόταση SLF 55 μιλά για μία νέα διατύπωση του s_i , όπου θα πρέπει να εκτιμηθεί και η επίδραση του ύδατος στο κατάστρωμα οχημάτων των πλοίων Ro-Pax. Το αναθεωρημένο s_i από τη SOLAS 2009 (ref SOLAS 2009 II-1 Rule 7-2) θα πρέπει να ορίζεται ως εξής:

$$s_i = \min \{S_{intermediate}, S_{final} * S_{moment}\}$$

$$S_{final} = \left[\frac{GZ_{max} * Range}{TGZ_{max} * TRange} \right]^{1/4}$$

Όπου,

GZ_{max} δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο του TGZ_{max}

Range δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο του TRange

$TGZ_{max} = 0,20m$, σε περίπτωση κατάκλυσης διαμερίσματος τύπου Ro-Ro,

=0,12m, σε κάθε άλλη περίπτωση

TRange = 20° , σε περίπτωση κατάκλυσης διαμερίσματος τύπου Ro-Ro,

= 16° , σε κάθε άλλη περίπτωση

Εάν η πρόταση αυτή απαιτήσει επιβεβαίωση με περαιτέρω έλεγχο σε ένα σχετικά ευρύτερο φάσμα σύγχρονων πλοίων Ro-Pax, θα μπορεί να προσφέρει το πλεονέκτημα ότι είναι σχετικά απλή χωρίς να θίγει άλλο τύπο πλοίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΜΕΛΕΤΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΤΥΠΟΥ «Ro-Pax» ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΒΛΑΒΗ

3.1 Μεθοδολογία μελέτης ευστάθειας του πλοίου αναφοράς

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα [1.3]), είναι η βελτιστοποίηση του επιπέδου ασφαλείας πλοίων Ro-Pax, σε συνδυασμό με την εξασφάλιση της οικονομικής βιωσιμότητας τους ώστε να αξιολογηθεί το περιθώριο εφαρμογής αυστηρότερων κανονισμών.

Σε πρώτο στάδιο, εξετάστηκε αν ένα υπάρχον πλοίο μπορεί, με τροποποιήσεις στη σχεδίαση του, να επιτύχει δείκτη A αρκετά υψηλότερο του αρχικού, χωρίς να είναι οικονομικά ασύμφορο. Το πλοίο που μελετήθηκε δεν είναι πραγματικό αλλά βασίστηκε σε υπάρχον πλοίο τύπου Ro-Pax της ελληνικής ακτοπλοΐας, το οποίο έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τις απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών. Πιο συγκεκριμένα, το πλοίο αναφοράς δημιουργήθηκε με τη βοήθεια του ναυπηγικού λογισμικού Nara και ορίστηκαν όλα τα απαιτούμενα στοιχεία για την εφαρμογή της SOLAS 2009. Έπειτα, δημιουργήθηκε αλγόριθμος μακροεντολών για την εφαρμογή του πιθανοθεωρητικού μοντέλου και την οικονομική ανάλυση της σχεδίασης.

Στο δεύτερο στάδιο, υλοποιήθηκαν 12 εναλλακτικές σχεδιάσεις του αρχικού πλοίου και εκτελέστηκαν όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για τη μελέτη της ευστάθειας του εκάστοτε μοντέλου όπως και των οικονομικών του στοιχείων. Ύστερα από την ολοκλήρωση όλων των υπολογισμών έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εξήχθησαν συμπεράσματα σχετικά με τα ερωτήματα που είχαν τεθεί.

3.2 Ναυπηγικό λογισμικό Nara

Η σχεδίαση των μοντέλων καθώς και όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί, διενεργήθηκαν με τη χρήση του ναυπηγικού σχεδιαστικού πακέτου Nara 2013. Η επιλογή του συγκεκριμένου σχεδιαστικού προγράμματος έγινε εξαιτίας της εκτεταμένης χρήσης του για σχεδίαση και μελέτη πλοίων από τους Νηογνώμονες και τα Ναυπηγεία καθώς και λόγω της πληθώρας των δυνατοτήτων που προσφέρει στο χρήστη. Μερικές εκ των βασικότερων δυνατοτήτων παρουσιάζονται παρακάτω:

- ✓ Είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο, με μεγάλη ποικιλία εφαρμογών απαραίτητων για τη σχεδίαση πλοίων (αντοχή, υδροστατικά μεγέθη, υδροδυναμική κ.τ.λ.).
- ✓ Παρέχει πληθώρα εργαλείων επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου και παραμετρικής σχεδίασης αυτού.
- ✓ Δυνατότητα πολύ γρήγορης πραγματοποίησης εναλλακτικών σχεδιάσεων.
- ✓ Οι δύσκολοι υπολογισμοί που αφορούν το πιθανοθεωρητικό μοντέλο γίνονται αρκετά εύκολα και γρήγορα μέσω έτοιμων εργαλείων.
- ✓ Διαθέτει πληθώρα μακροεντολών για την υλοποίηση πολύπλοκων υπολογισμών και διαχείριση της βάσης δεδομένων.

Όπως προαναφέρθηκε το Nara είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο με πληθώρα εφαρμογών που εξυπηρετούν τη μελέτη διαφορετικών χαρακτηριστικών ενός πλοίου. Οι εφαρμογές αυτές στην πραγματικότητα είναι υποσυστήματα που ομαδοποιούν κάποιες λει-

τουργίες προς διευκόλυνση του σχεδιαστή. Η διαμερισματοποίηση και η υδροστατική μελέτη του πλοίου αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα υποσυστημάτων (subsystems). Συμπληρωματικά των υποσυστημάτων το πρόγραμμα χρησιμοποιεί και αντικείμενα (objects) για την κάλυψη των εσωτερικών λειτουργιών του συστήματος, όπως είναι η διαχείριση δεδομένων, η πραγματοποίηση των υπολογισμών και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Στα πλαίσια των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν, έγινε εκτενής χρήση των παρακάτω υποσυστημάτων με τη σειρά που αναφέρονται:

✓ Reference System

Αφορά ότι έχει να κάνει με τα βασικά στοιχεία του πλοίου αναφοράς, όπως είναι οι διαστάσεις του, το σύστημα συντεταγμένων, ο ορισμός των frames κ.τ.λ..

✓ Υποσύστημα Geometry

α) Δημιουργία γραμμών του πλοίου αναφοράς στο υποσύστημα Definition – DEF, δημιουργία γάστρας HULL με βάση τις γραμμές.

β) Σχεδίαση της γάστρας στο υποσύστημα Drawing – DR.

γ) Δημιουργία διαμερισμάτων στο υποσύστημα Ship Model – SM.

✓ Υποσύστημα Hydrostatics

Αφορά τον υπολογισμό και την παρουσίαση των υδροστατικών στοιχείων του πλοίου αναφοράς.

✓ Υποσύστημα Loading Conditions

Ορισμός καταστάσεων φόρτωσης του πλοίου αναφοράς και υπολογισμός των υδροστατικών μεγεθών που τους αντιστοιχούν.

✓ Υποσύστημα Damage Stability

Παρέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για τον προσδιορισμό της υποδιαίρεσης του πλοίου, και τον υπολογισμό όλων των επιθυμητών μεγεθών.

3.3 Σχεδίαση πλοίου αναφοράς

Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου φαίνονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Κύρια χαρακτηριστικά πλοίου αναφοράς.

ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΟΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	
Loa [m]	146,2
Lpp [m]	134
Breadth [m]	23,1
Depth (main deck) [m]	8,4
Draught max (summer) [m]	5,9
Gross Tonnage [t] (international)	18.498
DWT [t]	2.823
Light Ship [t]	8.398,2
Lane Meters [m]	602+144 cars
Cars Capacity (max)	430
Number of Passengers (international)	1.616
Number of Passengers (domestic)	2.400
Service Speed (Knots)	25,5

Το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο Nara και αντιστοιχεί στο πλοίο αναφοράς ονομάστηκε «A2» και η σχεδίαση του ολοκληρώθηκε με τη βοήθεια του σχεδιαστικού πακέτου Nara σε 7 βήματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1. Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών
2. Δημιουργία γραμμών
3. Δημιουργία γάστρας
4. Υπολογισμός υδροστατικών στοιχείων
5. Δημιουργία γενικής διάταξης
6. Ορισμός Openings
7. Ορισμός Cross-Flooding Pipes

✓ Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών

Στον πίνακα 3.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα δεδομένα του μοντέλου που εισήχθησαν αρχικά στο υποσύστημα Reference System [REF]. Μέσω του συστήματος αυτού ορίστηκαν οι κύριες διαστάσεις του πλοίου καθώς και η θέση των σχεδιαστικών νομέων [frames].

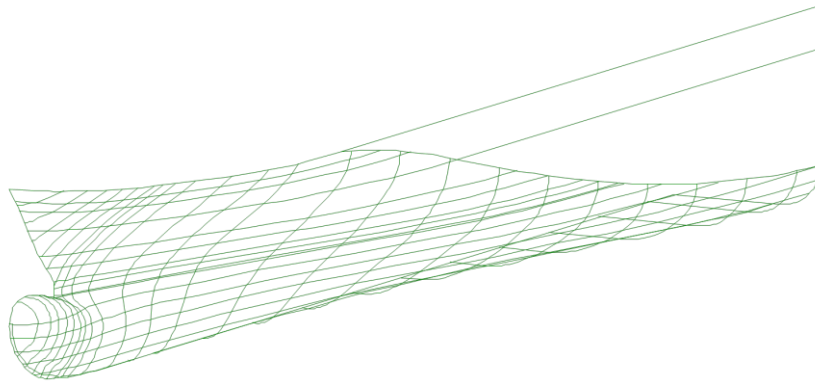
Πίνακας 3.2. Κύριες διαστάσεις του πλοίου αναφοράς.

Reference dimensions			
TDWL	5.7	design draught	
AP	0	aft perpendicular	(HULL/TDWL ->-6.424)
FP	134	fore perpendicular	(HULL/TDWL ->139.805)
LREF	134	reference length	(FP-AP ->134)
XREF	67	reference point	((FP+AP)/2 ->67)
XMID	67	largest frame	
XMIN	-6.7	aft end	(HULL ->-6.424)
XMAX	140.7	fore end	(HULL ->140.023)
LOA	147.4	length over all	(XMAX-XMIN ->147.4)
BREF	23.1	reference breadth	(HULL/TDWL ->23.1)
BMAX	23.1	maximum breadth	(HULL ->23.1)
TMAX	0	maximum draught	
HMD	0	height of main deck	
HSD	5.8959	subdivision draught	
HMAX	18.3959	total height	
SHEL	0.01	shell thickness	
KEEL	0.0125	keel	
RHO	1.025	seawater density	
FRAMES	0, 0.6, 18,0.8, 162,0.6		

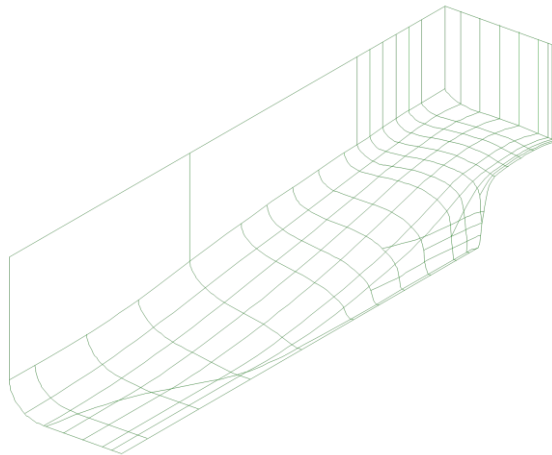
✓ Δημιουργία γραμμών

Αφού ορίστηκαν οι βασικές διαστάσεις, σχεδιάστηκαν οι γραμμές του πλοίου ξεκινώντας από τις πιο βασικές. Η σειρά και η τακτική ορισμού των καμπυλών έγινε σύμφωνα με τις προτάσεις σχεδίασης του σχεδιαστικού πακέτου Nara και με σκοπό την πιο λυτή αλλά ταυτόχρονα πλήρη περιγραφή της γάστρας. Στο στάδιο αυτό χρησιμοποιήθηκε το υποσύστημα Geometry System [GM] και συγκεκριμένα η εφαρμογή Definition [DEF] μέσω της οποίας πραγματοποιήθηκε ο ορισμός του συνόλου των σημείων και των περιορισμών που περιλαμβάνει η κάθε γραμμή.

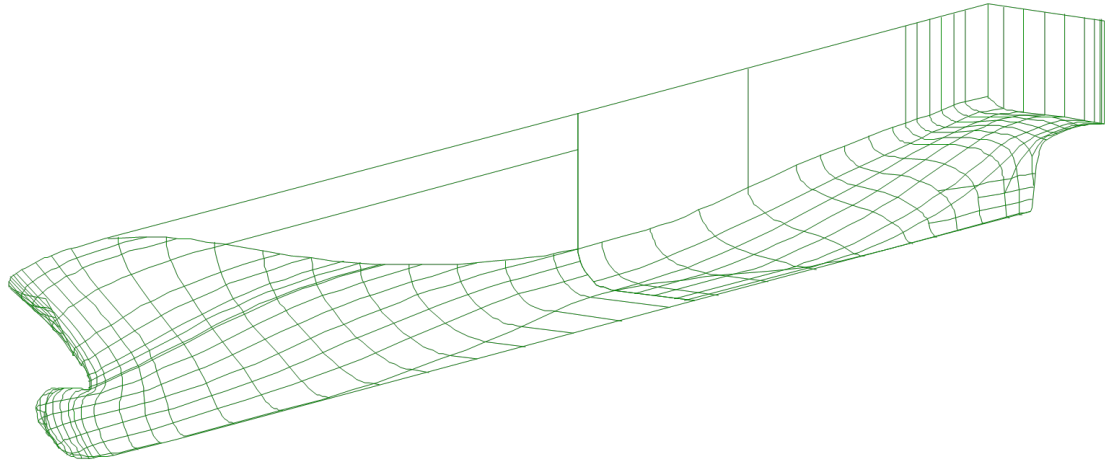
Για διευκόλυνση της διαδικασίας σχεδίασης το πλοίο χωρίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα HULLA και HULLF που συνδυαζόμενα μας δίνουν την τελική γάστρα (σχήματα 3.1-2-3). Σε πρώτη φάση σχεδιάστηκε το προφίλ του πλοίου και στη συνέχεια οι κύριες γραμμές ορισμού της γάστρας (Midship Section, Flat Of Side, Flat Of Bottom, Transom, Upper Deck). Ως δευτερεύουσες γραμμές, ορίστηκαν τα Sections και με τη βοήθεια αυτών οι Waterlines, οι οποίες έχουν πυκνότερη παρουσία στα σημεία έντονης αλλαγής της γεωμετρίας όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα. Όλες οι γραμμές είναι εξομαλυνμένες με σκοπό να επιτύχουν την ομαλότερη δυνατή επιφάνεια.



Σχήμα 3.1. Γραμμές του πλοίου αναφοράς A2. Τμήμα HULLF.



Σχήμα 3.2. Γραμμές του πλοίου αναφοράς A2. Τμήμα HULLA.



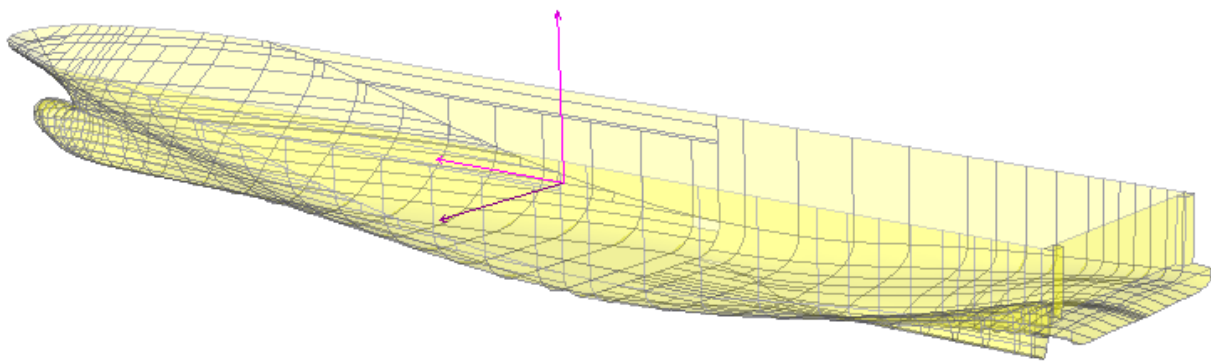
Σχήμα 3.3. Γραμμές του πλοίου αναφοράς A2 - Aft End View.

✓ **Δημιουργία γάστρας**

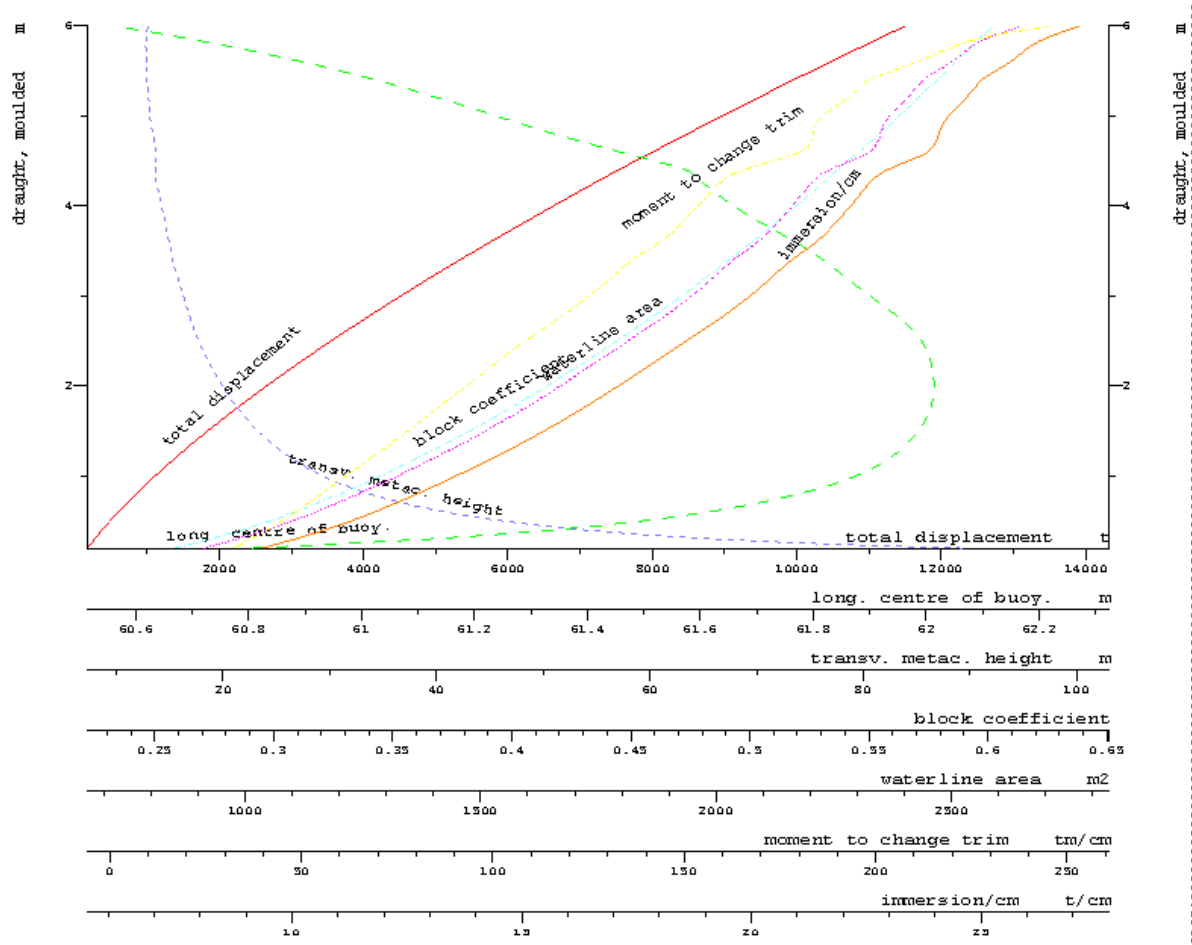
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η γάστρα HULL είναι προϊόν της ένωσης δύο τμημάτων (HULLA, HULLF) που μαζί με το συμμετρικό τους κομμάτι ως προς το προφίλ του πλοίου μας έδωσαν την τελική γάστρα. Οι διασταυρούμενες καμπύλες δημιούργησαν patches και με αυτό τον τρόπο ορίστηκε πλήρως η γεωμετρία της γάστρας. Στα σημεία έντονης αλλαγής της γεωμετρίας το πλέγμα των γραμμών έγινε σκοπίμως πιο πυκνό έτσι ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική ομαλότητα της επιφάνειας.

✓ **Υπολογισμός υδροστατικών στοιχείων**

Η γάστρα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των υδροστατικών στοιχείων διαφοροποιείται από την αρχική, στη περιοχή της πρύμνης, καθώς έχει διαμορφωθεί κατάλληλα η εσοχή λόγω του καταπέλτη (σχήμα 3.4). Στον πίνακα A.1 του παραρτήματος παρουσιάζονται τα υδροστατικά στοιχεία και στο σχήμα 3.5 το υδροστατικό διάγραμμα του πλοίου, τα οποία έγιναν με τη βοήθεια του υποσυστήματος Hydrostatics –HYD.



Σχήμα 3.4. Γάστρα του πλοίου αναφοράς, με διαμορφωμένη πρύμνη.



Σχήμα 3.5. Υδροστατικό Διάγραμμα του πλοίου αναφοράς A2.

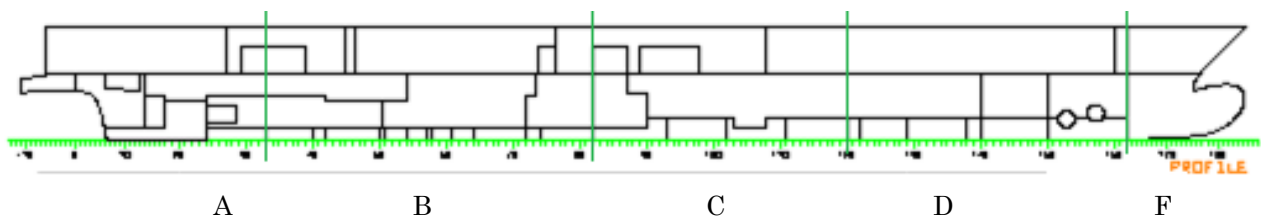
✓ Δημιουργία γενικής διάταξης

Για τον ορισμό των στεγανών διαμερισμάτων του πλοίου, χρησιμοποιήθηκαν τα υποσυστήματα Definition [DEF], και Ship Model [SM]. Πρώτα ορίστηκαν οι διαστάσεις και η θέση των διαμερισμάτων στο πλοίο και ύστερα κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά τους όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3 που ακολουθεί. Στον πίνακα 3.3 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των διαμερισμάτων σύμφωνα με τη λειτουργία που εξυπηρετούν καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά των διαμερισμάτων της εκάστοτε κατηγορίας (πυκνότητα φορτίου που εμπεριέχουν, διαχωρητικότητα διαμερίσματος κ.τ.λ.).

Προς διευκόλυνση του σχεδιασμού και της αναγνωρισιμότητας των πολυάριθμων διαμερισμάτων του επιβατηγού πλοίου, ακολουθήθηκε συγκεκριμένη τακτική ονοματολογίας. Το πλοίο χωρίστηκε σε πέντε ζώνες κατά μήκος και το πρώτο γράμμα του ονόματος της κάθε δεξαμενής αντιστοιχεί στη ζώνη που ανήκει (σχήμα 3.6). Το δεύτερο ψηφίο του ονόματος αντιπροσωπεύει τον αριθμό του καταστρώματος από το οποίο ξεκινάει. Στη συνέχεια ακολουθεί ο αριθμός του διαμερίσματος αν υπάρχει και ύστερα μια μικρή συντομογραφία της λειτουργίας του.

Πίνακας 3.3. Κατηγοριοποίηση διαμερισμάτων και χαρακτηριστικά αυτών.

PURP	PDES	CLASS	TYPE	RHO	RED	CAP	PERM
FW	WATER'	B	L	1	0	1	0.95
VOID	'VOID'	X	V	1.025	0	0.95	0.95
DO	DIESEL OIL	B	L	0.85	0	0.98	0.95
MRE	REPAIR SHOP'	E	E	1	0	1	0.6
MAP	APPARAT SPACE	E	E	1	0	1	0.85
MMA	MACHINERY SPACE'	E	E	1	0	1	0.85
CCA	CREW CABIN'	M	X	1	0	1	0.95
DST	DECK STORE'	S	G	1	0	1	0.95
CWH	'WHEELHOUSE'	N	A	1	0	1	0.95
ACC	'ACCOMONDATION'	A	A	1	0	0	0.95
BW	BALLAST WATER'	X	L	1.025	0	1	0.95
LO	LUB OIL'	B	L	0.9	0	0.98	0.95
GWT	GRAY WATER'	C	L	1	0	1	0.95
HFO	HEAVY FUEL OIL'	B	L	0.98	0	0.98	0.95
CHA	CHAIN LOCKER'	X	G	1.025	0	1	0.95
MIS	'MISCELLANEOUS'	B	L	1	0	1	0.95
SLU	'SLUDGE'	C	L	1	0	0.95	0.95
STA	'STAIRS'	P	A	1	0	1	0.95
RORO	'RO-ROSPACE'	C	A	1	0	0	0.95
TOI	Toilet	P	A	1	0	1	0.95
MST	MACHINE STORE	S	G	1	0	1	0.95
PRO	'PROVISIONS'	S	G	1	0	0	0.95
RO	Crude Oil	C	L	0.97	2	0.95	0.95



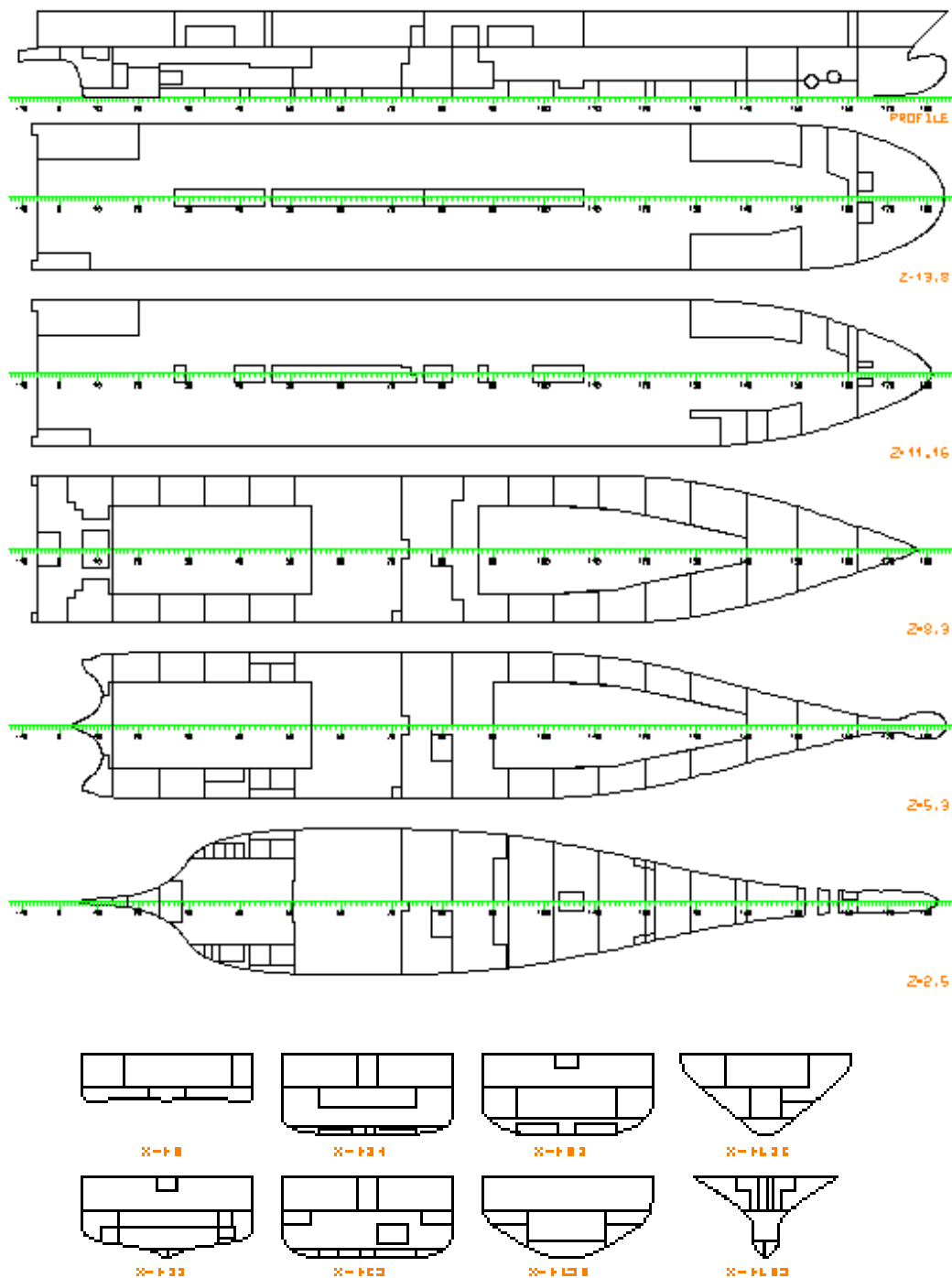
Σχήμα 3.6. Ζώνες ονοματολογίας πλοίου αναφοράς A2.

[A (frames 11, 33) / B (frames 33, 82) / C (frames 82, 120) / D (frames 120, 162) /

F (frames 162, 139.804)]

Η διαμερισματοποίηση έγινε για όλους τους χώρους που βρίσκονται κάτω από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών (deck-3) καθώς και για τους χώρους των καταστρωμάτων deck-3 και deck-4. Οι όγκοι τους και τα κύρια χαρακτηριστικά τους αναφέρονται στον πίνακα Α.2.

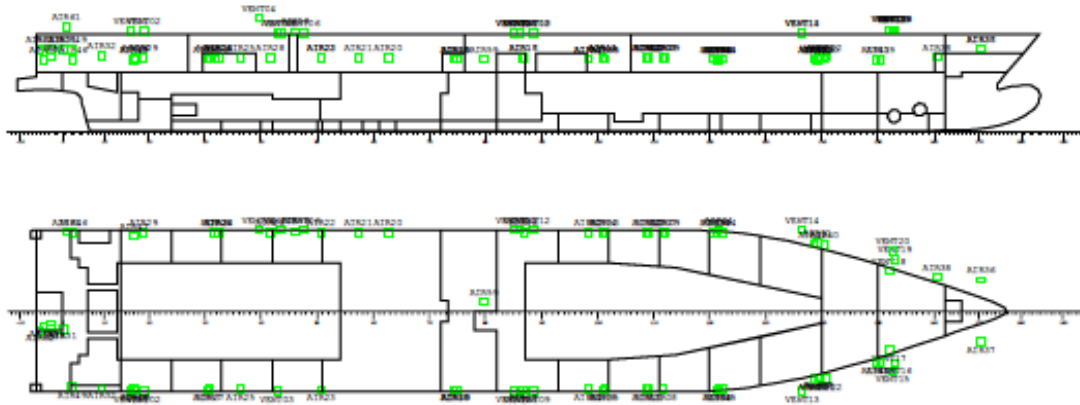
Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η γενική διάταξη του πλοίου αναφοράς. Από το προφίλ φαίνεται η θέση των δύο bow thrusters που προαναφέρθηκαν και από τις κατόψεις η διάταξη των τεσσάρων εκ των πέντε καταστρωμάτων οχημάτων.



Σχήμα 3.7. Σχέδιο Γενικής Διάταξης του πλοίου αναφοράς Α2.

✓ Ορισμός Openings

Το πλοίο αναφοράς διαθέτει δύο ειδών ανοίγματα πάνω από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών. Τα απροστάτευτα (unprotected) τα οποία είναι τελείως εκτεθειμένα στη θάλασσα και τα καιροστεγή (weather tight) που εμποδίζουν την είσοδο του νερού σε οποιαδήποτε κατάσταση θάλασσας (σχήμα 3.8). Στον πίνακα A.3 περιέχονται αναλυτικά τα στοιχεία τους σχετικά με την ακριβή θέση τους και τα διαμερίσματα που ενώνονται μέσω αυτών.



Σχήμα 3.8. Θέση των ανοιγμάτων του πλοίου.

✓ Ορισμός Cross-Flooding Pipes

Προς αποφυγή μεγάλων γωνιών εγκάρσιας κλίσης του πλοίου ύστερα από οποιαδήποτε κατάσταση βλάβης που επηρεάζει τους κενούς χώρους {No. 1/2/3/12 Void (P&S)}, το πλοίο είναι εξοπλισμένο με πέντε cross-flooding pipes. Τα ακριβή δεδομένα για τις διαστάσεις τους, τα διαμερίσματα που ενώνουν και τη θέση τους, ορίστηκαν μέσω της εφαρμογής Compartment Connections [CCONN] και η θέση των στομιών προστέθηκε στον πίνακα με τα ανοίγματα. Ως ανοίγματα θεωρήθηκαν και τα δύο ακροστόμια του κάθε cross-flooding pipe [CFP] καθώς η ροή υγρού επιτρέπεται από και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Στον πίνακα 3.4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά για τα πέντε CFP, που εισήχθησαν στο πρόγραμμα για να μπορέσει κατά την εφαρμογή του πιθανοθεωρητικού μοντέλου να υπολογίσει τους χρόνους εξισορρόπησης του πλοίου. Τα πρώτα τρία βρίσκονται στο πρωαίο τμήμα του πλοίου, ενώ τα άλλα δύο είναι τοποθετημένα στην περιοχή της πρύμνης και ενώνουν τα ίδια διαμερίσματα (σχήμα A.1). Ο τρόπος συνεισφοράς τους στην επιβίωση του πλοίου και ο τρόπος υπολογισμού του επιτευχθέντα χρόνου εξισορρόπησης του πλοίου για την εκάστοτε βλάβη και κατάσταση του πλοίου, αναλύεται εκτενώς στο πέμπτο κεφάλαιο.

Πίνακας 3.4. Διαστάσεις cross-flooding pipes.

ID	Description	Type	Frame	REFX	REFY	REFZ
PI1	PIPE#1	UNPROTECTED	138.625	107.3	2.16	2.86
PI1#2			138.625	107.3	-2.16	2.86
PI2	PIPE#2	UNPROTECTED	121	93.2	5.24	2.11
PI2#2			121	93.2	-5.24	2.11
PI3	PIPE#3	UNPROTECTED	119.375	91.9	5.46	2.07
PI3#2			119.375	91.9	-5.46	2.07
PI4	PIPE#4	UNPROTECTED	25.75	17	6.91	4.25
PI4#2			25.75	17	-6.91	4.25
PI5	PIPE#5	UNPROTECTED	26.25	17.4	6.91	4.25
PI5#2			26.25	17.4	-6.91	4.25

ID	Compartments Connected	Stage	Diam(m)	Area(m ²)	KSum	L(m)
PI1	D11VOIDS D11VOIDP	FINAL	0.432	0.147	1.545	4.32
PI1#2			0	0	0	0
PI2	D12VOIDS D12VOIDP	FINAL	0.432	0.1	1.545	10.48
PI2#2			0	0	0	0
PI3	C23VOIDS C23VOIDP	FINAL	0.432	0.146574	1.545	10.92
PI3#2			0	0	0	0
PI4	R112VOIDS R112VOIDP	FINAL	0.293	0.0674257	1.454	13.82
PI4#2			0	0	0	0
PI5	R112VOIDS R112VOIDP	FINAL	0.293	0.0674257	1.454	13.82
PI5#2			0	0	0	0

3.4 Εφαρμογή Πιθανοθεωρητικού Μοντέλου SOLAS 2009

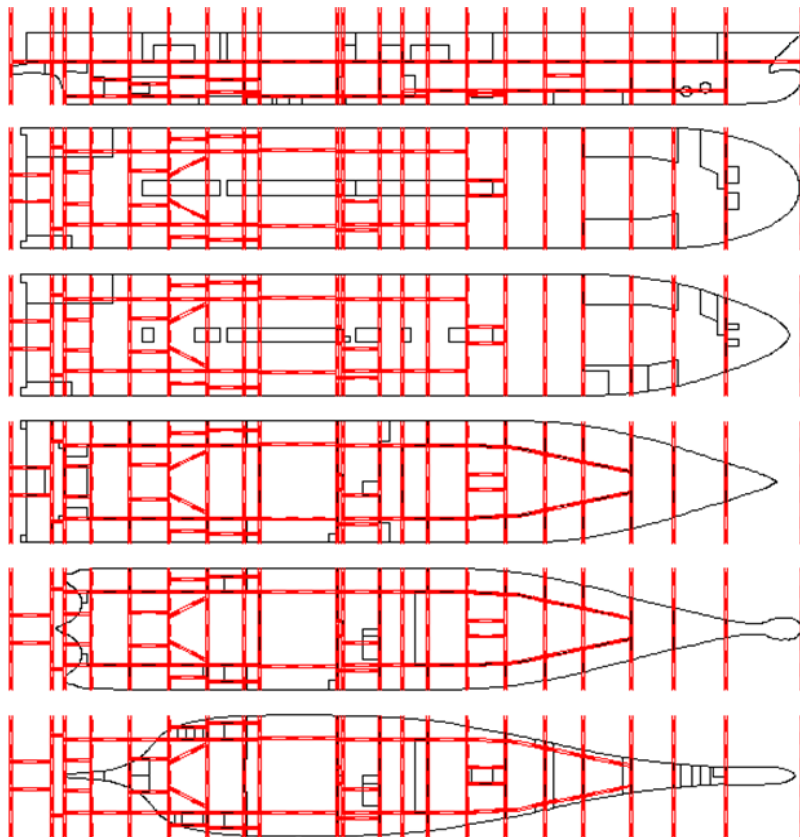
3.4.1. Στεγανή υποδιαίρεση του πλοίου

Η μεθοδολογία υπολογισμού του δείκτη υποδιαίρεσης του πλοίου σύμφωνα με το πιθανοθεωρητικό μοντέλο απαιτεί το πλοίο να είναι χωρισμένο σε ζώνες. Οι ζώνες ορίστηκαν με βάση τις εγκάρσιες φρακτές, τα καταστρώματα και τα στεγανά διαμερίσματα και χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των σεναρίων βλάβης. Στην ουσία ως όριο συμπεριλαμβάνεται οποιοδήποτε στεγανό φράγμα το οποίο αν χτυπηθεί θα οδηγήσει στην κατάκλιση τουλάχιστον ενός επιπλέον διαμερίσματος. Οι ζώνες υποδιαίρεσης, αλλιώς damage zones, ορίστηκαν μέσω του υποσυστήματος Damage Stability [DAM]. Στον πίνακα 3.5 φαίνεται αναλυτικά η διαμήκης θέση των 21 ζωνών καθώς και η εγκάρσια και καθ' ύψος υποδιαίρεση τους. Ύστερα από έλεγχο εξακριβώθηκε ότι η μελέτη βλάβης στην αριστερή πλευρά του πλοίου δίνει το χαμηλότερο δείκτη υποδιαίρεσης. Για το λόγο αυτό όλοι οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για την αριστερή πλευρά, όντας η δυσμενέστερη. Επειδή μελετήθηκε μόνο η μία πλευρά κατά την εφαρμογή του μοντέλου, το δεξή όριο (LBP) δεν έχει οριστεί. Άνω όριο όλων των ζωνών είναι το κατάστρωμα deck-3 μιας και εξ ορισμού είναι το ανώτατο κατάστρωμα των στεγανών φρακτών.

Πίνακας 3.5. Ζώνες Υποδιαίρεσης (Damage Zones) του πλοίου αναφοράς A2.

ZONE	TBA	TBF	LBP	LBS	DDN	DUP
Z1	'DAMHULL'	'#2'	"	'-2.6/2.6'	"	'DK3'
Z2	'#2'	'#6'	"	'-7.6/7.6'	"	'DK3'
Z3	'#6'	'#14'	"	'-6.9/-2.9/2.9/6.9'	'DK1.5'	'DK3'
Z4	'#14'	'#24'	"	'-6.9/6.9'	'DK1.5/DK4.6'	'DK3'
Z5	'#24'	'#33'	"	'-6.9/-3.2/3.2/6.9'	'DK1.5/3.9'	'DK3'
Z6	'#33'	'#42'	"	'-9.3/-6.9/ORIOTIX_/ORIOTIX/6.9/9.3'	'DK1.5/DK5.2'	'DK3'
Z7	'#42'	'#50.5'	"	'-9.9/-6.9/6.9/9.9'	'2.2/4.6'	'DK3'
Z8	'#50.5'	'#54'	"	'-9.9/-6.9/6.9/9.9'	'DK1.5/2.2/4.6'	'DK3'
Z9	'#54'	'#72'	"	'-7.1/7.1'	'DK1.5'	'DK3'
Z10	'#72'	'55'	"	'-8/-1.5/1.5/6.9'	'DK1.5'	'DK3'
Z11	'55'	'#82'	"	'-8/-6.9/-2.6/6.9'	'DK1.5'	'DK3'
Z12	'#82'	'#87'	"	'-6.9/6.9'	'DK1.5'	'DK3'
Z13	'#87'	'#93'	"	'-6.9/6.9'	'DK1.5/DK1'	'DK3'
Z14	'#93'	'#102'	"	'-6.9/6.9'	'DK1'	'DK3'
Z15	'#102'	'#111'	"	'OR_-1.5/1.5/OR'	'DK1.80/DK1'	'DK3'
Z16	'#111'	'#120'	"	'OR_/OR'	'DK1'	'DK3'
Z17	'#120'	'#129'	"	'OR_/OR'	'DK1/DK2'	'DK3'
Z18	'#129'	'#140'	"	'OR_/OR'	'DK1'	'DK3'
Z19	'#140'	'#150'	"	"	'DK1'	'DK3'
Z20	'#150'	'#162'	"	"	'DK1'	'DK3'
Z21	'#162'	'DAMHULL'	"	"	"	'DK3'

Η απεικόνιση των ζωνών υποδιαίρεσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.9. Με κόκκινη γραμμή ορίζονται τα όρια των ζωνών, όπως αυτά τέθηκαν στον πίνακα 3.5.



Σχήμα 3.9. Απεικόνιση των ζωνών υποδιαίρεσης του πλοίου αναφοράς A2.

3.4.2 Καταστάσεις φόρτωσης

Η πιθανοθεωρητική μέθοδος SOLAS 2009 εφαρμόζεται για τρεις καταστάσεις φόρτωσης. Η επιλογή τους είναι τέτοια ώστε θεωρητικά να καλύπτουν όλα τα πιθανά σενάρια φόρτωσης, ειδικότερα τα δυσμενέστερα. Πιο συγκεκριμένα τα κριτήρια προσδιορισμού των τριών καταστάσεων φόρτωσης για το εκάστοτε πλοίο είναι τα παρακάτω.

- (d_s - Deepest Subdivision Draught) αντιστοιχεί στη φόρτωση με μέγιστο βύθισμα.
- (d_L - Lightest Subdivision Draught) αντιστοιχεί στο ελάχιστο βύθισμα του πλοίου
- (d_p - Partial Subdivision Draught) το βύθισμα της υπολογίζεται με βάση τον τύπο :

$$d_p = d_L + 0,6 * (d_s - d_L)$$

Οι καταστάσεις Deepest Subdivision και Partial Subdivision Draught υπολογίζονται για μηδενική διαγωγή ενώ η Lightest φόρτωση για πραγματική. Επίσης στη Lightest συνυπολογίζονται στα βάρη αυτά των επιβατών και του πληρώματος.

Η κατάσταση φόρτωσης που παρουσιάζεται στον πίνακα 3.6 αντιστοιχεί στη Full Load Winter Departure με μηδενική διαγωγή. Το βύθισμα και το μετακεντρικό ύψος που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου είναι :

$$D_s=5.896 \text{ m}$$

$$G_Ms=2.29 \text{ m}$$

Πίνακας 3.6. Κατάσταση Φόρτωσης για το Deepest Subdivision Draught (ds).

LOADING CONDITION SUBD

L O A D I N G C O M P O N E N T S

Name		Max. weight	Mass	Center of gravity			Free s. moment
				cgx	cgy	cgz	

VAR							

C1	Passengers	0.0	153.5	70.33	0.00	19.06	0.00
C2	Crew	0.0	10.0	66.19	0.00	18.20	0.00
C3	Luggage	0.0	8.0	17.52	0.00	12.51	0.00
C4	Trailer	0.0	1510.0	64.54	0.00	10.20	0.00
C5	Car	0.0	251.6	57.04	0.00	11.60	0.00
C6	Provision	0.0	30.0	72.67	0.00	3.98	0.00
C7	Inventory	0.0	30.0	95.06	0.00	10.70	0.00
C8	Owner-Outfit	0.0	25.0	69.77	0.00	18.30	0.00
C9	Ballast heel.	0.0	122.5	74.33	0.00	4.37	87.00
C10	Fresh Water	0.0	151.5	91.14	0.00	5.49	393.00
C11	Gray Water	0.0	30.1	65.17	0.00	0.21	225.80
C12	Heavy Fuel O.	0.0	352.9	62.55	0.00	2.09	460.00
C13	Diesel Oil	0.0	49.7	49.76	0.00	2.22	71.00
C14	Lubricating.	0.0	44.8	40.17	0.00	1.46	35.00
C15	Miscellaneous.	0.0	30.3	30.48	0.00	0.91	166.20
C16	Ballast water	0.0	0.0	121.86	0.00	1.52	361.00
C17	LIGHT	0.0	23.3	59.16	0.00	11.06	0.00

Total of		0.0	2823.2	65.07	0.00	8.85	1799.00

Deadweight		2823.2	65.07	0.00	8.85
1799.0					
Lightweight		8398.2	59.16	0.00	11.06
Displacement (rho=1.025)		11221.4	60.65	0.00	10.51
1799.0					

F L O A T I N G P O S I T I O N

Draught moulded	5.896	m	KM	12.95	m
Trim	0.000	m	KG	10.51	m
Heel, PS=+	0.0	deg			
TA	5.896	m	GMO	2.45	m
TF	5.896	m	GMCORR	-0.16	m
Trimming moment	3	tonm	GM	2.29	m

Η κατάσταση φόρτωσης Partial (πίνακας 3.7), αντιστοιχεί στη Summer Arrival με μηδενική διαγωγή και βύθισμα που υπολογίζεται συναρτήσει των βυθισμάτων των δύο άλλων καταστάσεων φόρτωσης.

$$d_p = d_L + 0,6 * (d_S - d_L)$$

Το βύθισμα και το μετακεντρικό ύψος που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου είναι :

$$Dp=5.578 \text{ m}$$

$$GMp=1.95 \text{ m}$$

Πίνακας 3.7. Κατάσταση Φόρτωσης για το Partial Subdivision Draught (dp).

LOADING CONDITION PART

L O A D I N G C O M P O N E N T S

Name	Max. weight	Mass	Center of gravity			Free s. moment	
			cgx	cgy	cgz		

VAR							

C1	Passengers	0.0	228.0	58.29	0.00	19.77	0.00
C2	Crew	0.0	10.0	66.19	0.00	18.20	0.00
C3	Luggage	0.0	12.0	17.52	0.00	12.51	0.00
C4	Trailer	0.0	390.0	22.07	0.00	10.20	0.00
C5	Car	0.0	770.0	95.84	0.00	10.49	0.00
C6	Provision	0.0	3.0	72.67	0.00	3.98	0.00
C7	Inventory	0.0	30.0	95.06	0.00	10.70	0.00
C8	Owner-Outfit	0.0	25.0	69.77	0.00	18.30	0.00
C9	Ballast heel.	0.0	120.0	74.30	0.00	3.87	102.00
C10	Fresh Water	0.0	18.2	85.89	0.00	4.04	380.00
C11	Gray Water	0.0	112.3	65.19	0.00	0.75	226.00
C12	Heavy Fuel O.	0.0	48.0	35.20	0.00	3.22	211.00
C13	Diesel Oil	0.0	8.4	26.00	0.00	5.59	70.00
C14	Lubricating.	0.0	36.3	44.22	0.00	1.15	34.00
C15	Miscellaneous.	0.0	59.5	30.01	0.00	0.97	154.00
C16	Ballast water	0.0	101.6	103.00	0.00	1.52	361.00
C17	LIGHT	0.0	22.3	59.16	0.00	11.06	0.00

Total of		0.0	1994.6	68.32	0.00	9.53	1538.00

Deadweight			1994.6	68.32	0.00	9.53	
1538.0							
Lightweight			8398.2	59.16	0.00	11.06	
Displacement (rho=1.025)			10392.8	60.92	0.00	10.77	

F L O A T I N G P O S I T I O N

Draught moulded	5.578	m	KM	12.86	m	
Trim	0.000	m	KG	10.77	m	
Heel, PS=+	0.0	deg				
TA	5.577	m	GM0	2.09	m	
TF	5.578	m	GMCORR	-0.15	m	
Trimming moment	34	tonm	GM	1.95	m	

Η κατάσταση φόρτωσης Lightest Subdivision (πίνακας 3.8) αντιστοιχεί στη Ballast Arrival. Το βύθισμα και το μετακεντρικό ύψος που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου είναι :

Dl=5.157 m

GMI=2.34 m

Trim=-0.111m

Πίνακας 3.8. Κατάσταση Φόρτωσης για το Lightest Subdivision Draught (dL).

LOADING CONDITION LIGHT

L O A D I N G C O M P O N E N T S

Name		Max. weight	Mass	Center of gravity			Free s. moment
				cgx	cgy	cgz	

VAR							

C1	Passengers	0.0	228.0	58.29	0.00	19.06	0.00
C2	Crew	0.0	10.0	66.19	0.00	18.20	0.00
C3	Luggage	0.0	12.0	17.52	0.00	12.51	0.00
C6	Provision	0.0	3.0	72.67	0.00	3.98	0.00
C9	Ballast heel.	0.0	120.0	74.29	0.00	3.67	112.30
C10	Fresh Water	0.0	18.2	85.89	0.00	4.04	380.40
C11	Gray Water	0.0	112.3	65.19	0.00	0.75	225.80
C12	Heavy Fuel O.	0.0	48.0	35.20	0.00	3.22	210.90
C13	Diesel Oil	0.0	8.4	26.00	0.00	5.59	70.40
C14	Lubricating.	0.0	36.3	44.22	0.00	1.15	33.70
C15	Miscellaneous.	0.0	59.5	30.02	0.00	0.97	154.10
C16	Ballast water	0.0	274.8	125.06	0.00	1.43	640.00
C17	LIGHT	0.0	22.3	59.16	0.00	11.06	0.00

Total of		0.0	952.8	76.79	0.00	6.54	1827.60

Deadweight				952.8	76.79	0.00	6.54
1827.6							
Lightweight			8398.2	59.16	0.00	11.06	
Displacement (rho=1.025)			9351.0	60.96	0.00	10.60	
1827.6							

F L O A T I N G P O S I T I O N

Draught moulded	5.157	m	KM	13.14	m
Trim	-0.111	m	KG	10.60	m
Heel, PS=+	0.0	deg			
TA	5.212	m	GM0	2.54	m
TF	5.101	m	GMCORR	-0.20	m
Trimming moment	-2117	tonm	GM	2.34	m

3.4.3 Δημιουργία και εκτέλεση αλγόριθμου μακροεντολών

Προς αποφυγή οποιουδήποτε σφάλματος κατά τη διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου λόγω του όγκου των δεδομένων και την πολυπλοκότητα των υπολογισμών, δημιουργήθηκε ένας πολύ-αλγόριθμος μακροεντολών (macro) που εκτελεί αυτόματα ένα σύνολο εντολών. Στο macro είναι σαφώς ορισμένη η σειρά εκτέλεσης των εντολών καθώς και ο τρόπος συλλογής, επεξεργασίας και εξαγωγής των απαραίτητων δεδομένων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα τμήματα του macro που αφορούν τον προσδιορισμό των μεταβλητών, όπως αναφέρονται στη SOLAS 2009.

✓ Επιβάτες

```
@N1=612                @@ Number of passengers
@N2=1875               @@ Number of passengers
@Np=@N1+2*@N2         @@ Number of passengers
```

Όπου,

N1: ο αριθμός των ανθρώπων πάνω στο πλοίο, για τους οποίους παρέχονται οσοίβιες λέμβοι

N2: ο αριθμός των ανθρώπων (συμπεριλαμβανομένων των αξιωματικών και του πληρώματος) που επιτρέπονται πάνω στο πλοίο, επιπλέον του N1.

$N_p = N_1 + 2 \cdot N_2$: ο αριθμός των ανθρώπων, με βάση τον οποίο υπολογίζεται ο Απαιτούμενος Δείκτης Υποδιαίρεσης R.

$$\text{Με } R = 1 - \frac{5000}{L_s + 2.5 \cdot N_p + 15225} = 0.8097 \text{ (και } L_s, \text{ το μήκος υποδιαίρεσης)}$$

✓ Καταστάσεις φόρτωσης

```
@Ds=subd.t           @@ Subdivision draught
@Dp=part.t           @@ Partial draught
@Dl=lght.t           @@ Light service draught
@trl=lght.tr         @@ Light service draught trim

@GMs=subd.gm         @@ GM for Subdivision draught
@GMp=part.gm         @@ GM for Partial draught
@GMl=lght.gm         @@ GM for Light service draught
```

Όπου,

Ds: Deepest Subdivision Draught

Dp: Partial Subdivision Draught

Dl: Lightest Subdivision Draught

trl: διαγωγή για το Lightest Subdivision Draught

GMs: μετακεντρικό ύψος για Deepest Subdivision Draught

GMp: μετακεντρικό ύψος για Partial Subdivision Draught

GMl: μετακεντρικό ύψος για Lightest Subdivision Draught

✓ Διαχωρητότητες

Τα διαμερίσματα που έχουν χαρακτηριστεί ως Ro-Ro spaces θεωρούμε ότι δεν έχουν την ίδια διαχωρητότητα και στις τρεις καταστάσεις φόρτωσης. Για το λόγο αυτό ο ορισμός της διαχωρητότητας αυτών των χώρων για την εκάστοτε φόρτωση έγινε παραμετρικά.

```
@Ps=0.9      @@ Permeability at Ds
@Pp=0.9      @@ Permeability at Dp
@Pl=0.95     @@ Permeability at Dl
```

Όπου,

Ps: διαχωρητότητα για το Deepest Subdivision Draught

Pp: διαχωρητότητα για το Partial Subdivision Draught

Pl: διαχωρητότητα για το Lightest Subdivision Draught

✓ Επιπλέον μεταβλητές

```
@Arrv='STAB'      @@ Arrangement version
@dHULL='DAMHULL'   @@ Buoyant compartment for DA calculations
@Prof='PROF'      @@ Name of the profile curve
@Side='S'         @@ Side: 'P'=Port, 'S'=Starboard
```

Όπου,

Arrv: η ονομασία του Arrangement (Damage Control Plan), με βάση το οποίο πραγματοποιείται η μελέτη ευστάθειας κατόπιν βλάβης

dHULL: η γάστρα του πλοίου που μελετάται

Prof: το προφίλ του υπό μελέτη πλοίου

Side: η πλευρά του πλοίου που θα γίνει η μελέτη της ευστάθειας μετά από βλάβη

✓ Ροπές

Όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 2.1, ο δείκτης Smom υπολογίζεται συναρτήσει της μέγιστης εγκάρσιας ροπής που ασκείται στο πλοίο. Σύμφωνα με τον κανονισμό ως μέγιστη ροπή θεωρείται η μεγαλύτερη μεταξύ των ροπών που ασκούνται εξαιτίας μετακίνησης των επιβατών στη μια πλευρά του πλοίου, λόγω του ανέμου και λόγω των οσωτικών λέμβων.

```
mom, mPass, 'passenger moment'
cur, constant
mom, @(0.075*Np) * (0.45*ref('bref'))

mom, mWind, 'wind moment'
typ, wind
par, c=0.012237, prof=profile, tp2
```

```

mom, mSurv, 'survival craft moment'
cur, constant
mom, 175.37

mom, mHeel, 'maximum moment'
max, mPass, mWind, mSurv

```

Όπου,

mPass: η ροπή λόγω των επιβατών και του πληρώματος

mWind: η ροπή λόγω του ανέμου

mSurv: η ροπή λόγω των σωσίβιων λέμβων

mHeel: η μέγιστη ροπή

Επίσης στο macro, καθορίζονται τα arguments του υποσυστήματος DAM που ορίζουν μεταξύ άλλων, τα ανοίγματα και τα cross-flooding pipes που εμπεριέχονται στους υπολογισμούς.

```

hull      @dhull
HEEL      0 1 3 5 7 10 12 15 20 25 30 40 50
ARRV      B
OPARR     OPARR
CCONN
FORCE     auto
OPTION    PERM NOPROGR LOG CDISP CDIR
MARGIN    -
ROP       ALL
WTARR     B
SYTOL     0.001
TRLIM     80

```

Το macro συνδυάζει την υποδιαίρεση του πλοίου με την υπάρχουσα διαμερισματοποίηση και εξάγει σε πίνακα τα όρια των διαμερισμάτων (compartments limits table – CLIM) (πίνακας Α.3). Πιο συγκεκριμένα η πληροφορία που παρέχει αυτός ο πίνακας, είναι ποιο ή ποια διαμερίσματα κατακλύζονται σε περίπτωση χτυπήματος κάποιου στεγανού φράγματος.

Τέλος το macro παράγει τις καταστάσεις βλάβης για μέγιστο αριθμό κατακλυσμένων ζωνών πέντε και διαστάσεις βλάβης σύμφωνες με τον κανονισμό. Στον πίνακα 3.9 που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της συνεισφοράς στο δείκτη υποδιαίρεσης μετά από βλάβη, της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης και των καταστάσεων βλάβης ανάλογα με τον αριθμό ζωνών που εκτείνεται το ρήγμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με τη μεθοδολογία του κανονισμού η συνεισφορά της κατάστασης Lightest Subdivision είναι υποβιβασμένη σε σχέση με των άλλων δύο και για το λόγο αυτό έχει συντελεστή βαρύτητας ίσο με 0,2.

Πίνακας 3.9. A-Index (SOLAS 2009) για το πλοίο αναφοράς A2.

ATTAINED AND REQUIRED SUBDIVISION INDEX

Subdivision length	146.423 m
Breadth at the load line	23.100 m
Breadth at the bulkhead deck	23.100 m
Number of persons N1	612
Number of persons N2	1875

Required subdivision index R = 0.80972

Attained subdivision index A = 0.81510

INITDAMTAB	T	GM	SUBD	WCOEF	A-index
m	m				
DL SDS1-S	5.141	2.155	SOLAS	0.200	0.06423
DL SDSR12-S	5.141	2.155	SOLAS	0.200	0.11342
DP SDS1-S	5.577	1.949	SOLAS	0.400	0.12846
DP SDSR12-S	5.577	1.949	SOLAS	0.400	0.19838
DS SDS1-S	5.896	2.287	SOLAS	0.400	0.12822
DS SDSR12-S	5.896	2.287	SOLAS	0.400	0.18238

TOTAL					0.81510

DAMAGES	W*P*V*S

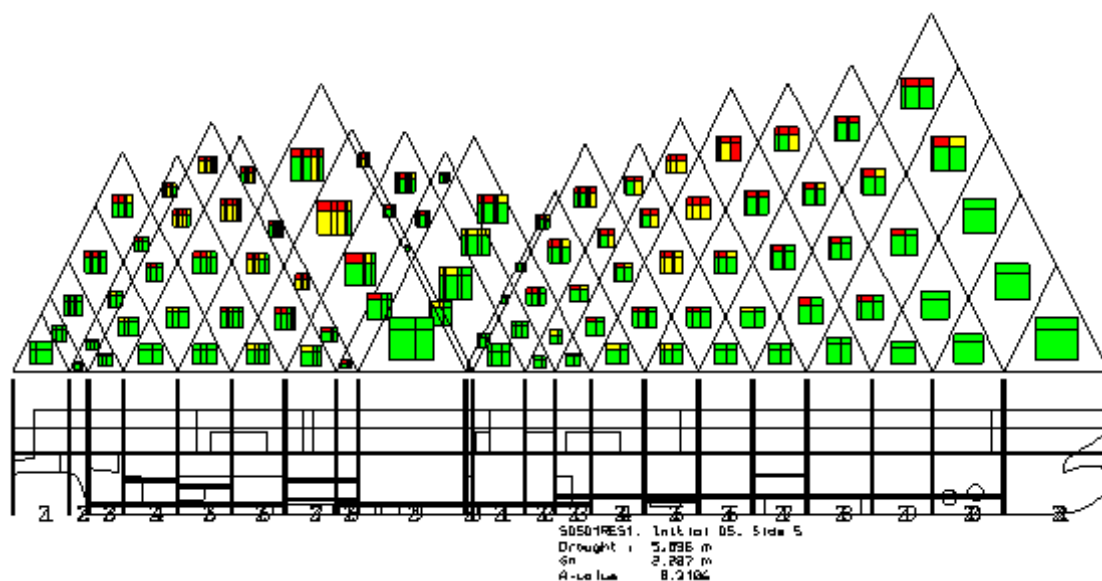
1-zone damages	0.32092
2-zone damages	0.27510
3-zone damages	0.15626
4-zone damages	0.04899
5-zone damages	0.01383

A-index Total	0.81510

Ο επιτευχθείς δείκτης υποδιαίρεσης κρίνεται ικανοποιητικός καθώς :

$$A = 0.81510 > R = 0.80972$$

Στο Σχήμα 3.10, φαίνονται οι τιμές του s_i για κάθε κατάκλυση διαμερισματος ή συνδυασμό διαμερισμάτων. Με πράσινο χρώμα συμβολίζονται τα $s_i \geq 0,99$, για το κίτρινο ισχύει ότι $0,99 > s_i > 0,05$ και για το κόκκινο ισχύει ότι $s_i < 0,05$. Στο φόντο, με λευκό χρώμα ισχύει ότι $p_i \cdot v_i \cdot s_i < 0,0001$ (or empty damage). Τα τρίγωνα πιθανοτήτων κατάκλυσης δημιουργήθηκαν μέσω έτοιμων μακροεντολών που παρέχει το σχεδιαστικό πακέτο Napa.



Σχήμα 3.10. Τρίγωνα πιθανοτήτων κατάκλυσης του A2 για SOLAS 2009.

3.5 Υπολογισμός πιθανότητας απώλειας ζωής (PLL)

Για την ολοκληρωμένη εκτίμηση της ασφάλειας των επιβατών ενός πλοίου λαμβάνεται υπ' όψιν η πιθανότητα απώλειας ζωής (Potential Loss of Life), συναρτήσεως του επιτευχθέντα δείκτη υποδιαίρεσης A. Ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας ζωής των επιβατών (PLL) εξαρτάται από τους παράγοντες που παρουσιάζονται στον πίνακα 3.10 και δίνεται από τον τύπο που παρατίθεται στη συνέχεια. Στην παρούσα μελέτη, οι παράγοντες αυτοί ορίστηκαν σύμφωνα με τις εκτιμώμενες τιμές που έχουν χρησιμοποιηθεί στο πρόγραμμα GOALDS και οι οποίες προήλθαν από στατιστική ανάλυση ατυχημάτων πλοίων Ro-Pax τα οποία δραστηριοποιούνταν σε ευρωπαϊκά ύδατα.

Πίνακας 3.10. Παράγοντες που επηρεάζουν το PLL .

Συχνότητα σύγκρουσης για πλοία Ro-Pax > 1.000 GT	P_C	$7,778 \cdot 10^{-3}$
Πιθανότητα πλοίο να χτυπηθεί	P_S	0,689655
Περιοχή λειτουργίας τη στιγμή του ατυχήματος	P_R P_1 P_t	Σε πορεία (4%) Σε περιορισμένα ύδατα (23%) Σε λιμάνι (73%)
Πιθανότητα εισροής υδάτων όταν το πλοίο πλέει ή είναι σε περιορισμένα ύδατα	P_1	0,423077
Πιθανότητα εισροής υδάτων όταν το πλοίο βρίσκεται σε λιμάνι.	P_2	0,117647
Πιθανότητα αργής/γρήγορης βύθισης	P_{sl}/P_f	0,5/0,5
Απώλειες σε περίπτωση αργής/γρήγορης βύθισης	F_s / F_f	5%/80%
Ποσοστό συνολικού αριθμού επιβατών στο πλοίο		75%
Πιθανότητα ανατροπής/βύθισης		1-A
Διάρκεια ζωής πλοίου (χρόνια)	Lt	30
Μέγιστος αριθμός επιβαιόντων στο πλοίο	N	2487

$$PLL = [P_f * (P_r * P_1 + P_l * P_1 + P_t * P_2) * P_c * P_s * (1 - A) * F_f + P_{sl} * (P_r * P_1 + P_l * P_1 + P_t * P_2)] * P_c * P_s * (1 - A) * F_s] * (N * 0,75) * Lt$$

Οι παράγοντες που διαφέρουν για το εκάστοτε πλοίο που μελετάτε είναι οι τρεις τελευταίοι του πίνακα 3.14 [P(1-A),Lt,N]. Το PLL του μοντέλου A2 υπολογίστηκε για εκτιμώμενη διάρκεια ζωής 30 χρόνια, πιθανότητα βύθισης P(1-A)= 0,1859 και μέγιστο αριθμό επιβαινόντων στο πλοίο N=2.487:

$$PLL= 4,720$$

Συνεπώς στη διάρκεια ζωής του πλοίου εκτιμάται ότι είναι πιθανό να χαθούν 4,72 ανθρώπινες ζωές επιβαινόντων.

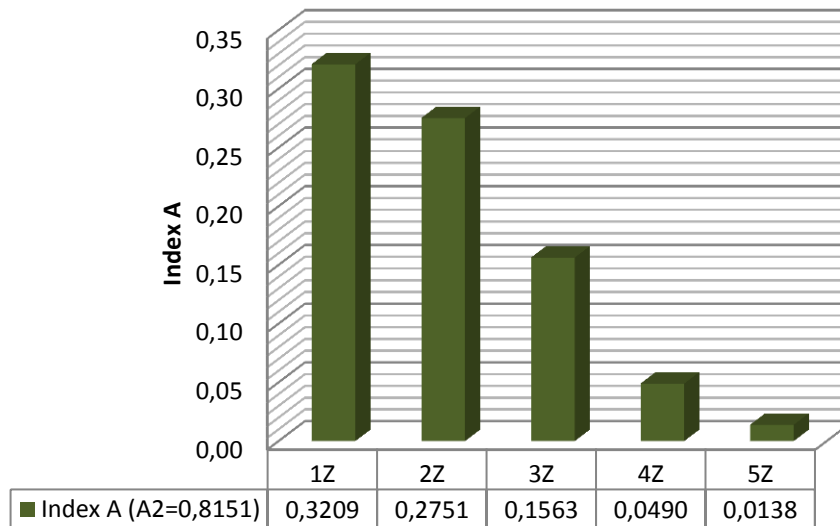
3.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και σχολιασμός

Στον πίνακα 3.11 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του πιθανοθεωρητικού μοντέλου SOLAS 2009 στο μοντέλο A2 καθώς και των δύο εναλλακτικών προτάσεων (SLF 55 και GOALDS). Οι δύο εναλλακτικές μέθοδοι παρουσιάζουν μικρή σχετικά απόκλιση από τη SOLAS 2009 με μέγιστη απόκλιση αυτή της μεθόδου SLF 55 (δA=-0,00743) που οδηγεί σε δείκτη A μικρότερο του απαιτούμενου δείκτη υποδιαίρεσης R (A=0,8077<R=0,8097).

Μελετώντας εκτενέστερα τα αποτελέσματα της μεθόδου SOLAS 2009 βλέπουμε ότι όπως είναι αναμενόμενο, τα σενάρια βλάβης που εκτείνονται σε μια ζώνη υποδιαίρεσης του πλοίου επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στο συνολικό δείκτη υποδιαίρεσης A του πλοίου (A1z=0,3209) (σχήμα 3.11). Ενώ αντίθετα τα σενάρια βλάβης πέντε συνεχόμενων ζωνών υποδιαίρεσης του πλοίου επιτυγχάνουν το μικρότερο συνολικό δείκτη υποδιαίρεσης A (A=0,0138).

Πίνακας 3.11. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μοντέλου A2.

ΜΟΝΤΕΛΟ A2 [Beam: 23,1m Deck3: 8,4m]			
Χαρακτηριστικά πλοίου	Light Ship (t)	GMs (m)	Power (kW)
	8.398,2	2,287	22.928,3
	A	PLL	A-R
SOLAS 2009	0,81510	4,720	0,00540
SLF 55	0,80767	4,910	-0,00203
GOALDS	0,81757	4,658	0,00787



Σχήμα 3.11. Δείκτης A για σενάρια βλάβης 1-5 ζώνες του A2 για SOLAS 2009.

Στον πίνακα 3.11, παρουσιάζονται και οι δείκτες PLL που υπολογίστηκαν συναρτήσει του A για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους. Ο δείκτης PLL του μοντέλου μας δεν είναι εφικτό να χαρακτηριστεί ως ικανοποιητικός ή μη καθώς δεν υπάρχει καθορισμένο ανώτατο όριο της τιμής του. Ανεξαρτήτως όμως των ορίων είναι θεμιτό ο δείκτης PLL να παίρνει όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές. Ο μείωση του δείκτη αυτού μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με μείωση του παράγοντα $(1-A)$ καθώς η διάρκεια ζωής του πλοίου και οι επιβαίνοντες δεν αλλάζουν.

Το κατά πόσο μπορεί να αυξηθεί ο δείκτης A και με ποιον τρόπο, αποτελεί αντικείμενο μελέτης του επόμενου κεφαλαίου σε συνδυασμό με την εκτίμηση της οικονομικής επιβάρυνσης που χρειάζεται για να επιτευχθεί η μείωση της πιθανότητας να χαθούν ανθρώπινες ζωές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΝ

4.1 Risk Control Options

Στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίστηκαν όλα τα στοιχεία που αφορούν στον επιτευχθέντα δείκτη υποδιαίρεσης A και το PLL του πλοίου αναφοράς. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εναλλακτικές σχεδιάσεις που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό τη βελτιστοποίηση του αρχικού σχεδιασμού ως προς την ευστάθεια ύστερα από βλάβη και είναι αποτέλεσμα μιας σειράς μετατροπών (Risk Control Options (RCO)) στο αρχικό πλοίο. Στον πίνακα 4.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν με RCO τη μεταβολή του πλάτους και του ύψους του καταστρώματος στεγανών φρακτών, δB και δD αντίστοιχα.

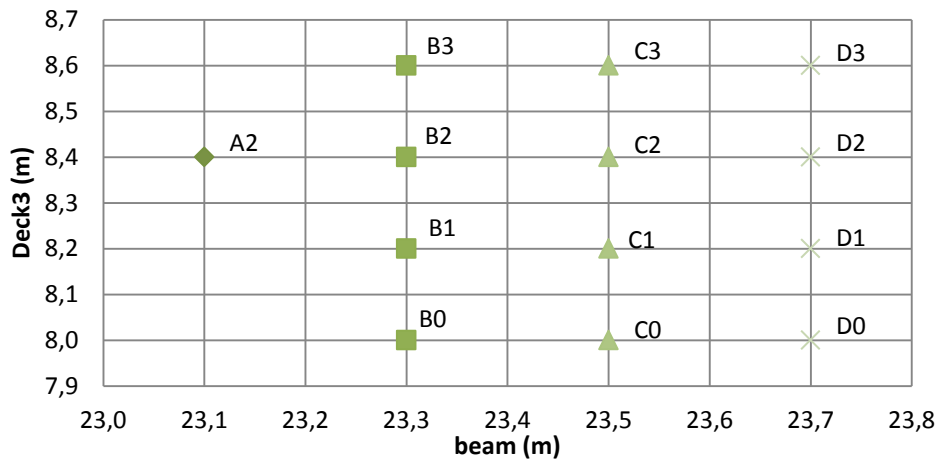
Πίνακας 4.1. Risk Control Options (RCO).

RCO	δB (m)	δD (m)
A2	0.0	0.0
B0	+0.2	-0.4
B1	+0.2	-0.2
B2	+0.2	0.0
B3	+0.2	+0.2
C0	+0.4	-0.4
C1	+0.4	-0.2
C2	+0.4	0.0
C3	+0.4	+0.2
D0	+0.6	-0.4
D1	+0.6	-0.2
D2	+0.6	0.0
D3	+0.6	+0.2

Η μεταβολή πλάτους εφαρμόστηκε καθ' όλο το κοίλο έως και το Deck5 και κυμάνθηκε από +0,2 έως +0,6m. Οι υπερκατασκευές του πλοίου που βρίσκονται άνωθεν του Deck5 δεν μεταβλήθηκαν και ως εκ τούτου θεωρήθηκε ότι η χωρητικότητα των υπερκατασκευών όπως και η συνεισφορά τους στο Light Ship του πλοίου είναι αμετάβλητη. Όσο αφορά στην οικονομική εκμετάλλευση του πλοίου, η μεταβολή του πλάτους θεωρήθηκε ότι δεν επιφέρει κάποια αύξηση στη μεταφορική ικανότητα. Αντίθετα με τη μεταβολή του πλάτους, η μεταβολή του ύψους πήρε και αρνητικές τιμές και κυμάνθηκε από -0,4 έως +0,2m. Στα μοντέλα όπου πραγματοποιήθηκε μεταβολή του ύψους στεγανών φρακτών έγινε όμοια μεταβολή στο ύψος των ανώτερων καταστρώματων έως και το Deck5. Κατά τη μελέτη των εναλλακτικών σχεδιάσεων συνυπολογίστηκαν στους διάφορους υπολογισμούς οι επιπτώσεις των RCO στο Light Ship, στις καταστάσεις φόρτωσης, την ισχύ πρόωσης, το κόστος κατασκευής, το λειτουργικό κόστος, το δείκτη υποδιαίρεσης A και το PLL.

4.2 Εναλλακτικές Σχεδιάσεις

Συνολικά δημιουργήθηκαν 12 μοντέλα με διαφορετικές κύριες διαστάσεις οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 4.1. Οι γάστρες των νέων μοντέλων έγιναν με Transformation των αρχικών γραμμών και κατά τη μεταβολή των διαστάσεων διασφαλίστηκε ότι δεν υπάρχει επιρροή στη λειτουργικότητα των χώρων. Λόγω του ότι η δημιουργία των μοντέλων έγινε με Transformation δεν χρειάστηκε να επαναληφθεί κανένα από τα 7 βήματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα [3.3] για τις εναλλακτικές σχεδιάσεις.



Σχήμα 4.1. Διαστάσεις των εναλλακτικών σχεδιάσεων.

4.3 Εφαρμογή Πιθανοθεωρητικού Μοντέλου (SOLAS 2009)

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή του πιθανοθεωρητικού μοντέλου στις εναλλακτικές σχεδιάσεις είναι ίδια με αυτή που ακολουθήθηκε για το πλοίο αναφοράς.

✓ Ορισμός στεγανής υποδιαίρεσης

Για κάθε εναλλακτική σχεδίαση τροποποιήθηκαν κατάλληλα τα όρια των ζωνών υποδιαίρεσης με βάση τις τιμές των RCO.

✓ Καταστάσεις Φόρτωσης

Για τον υπολογισμό των καταστάσεων φόρτωσης απαιτείται να είναι πλήρως ορισμένο το Light Ship (L.S.) του πλοίου. Τα δώδεκα νέα μοντέλα έχουν διαφορετικό L.S. από το πλοίο αναφοράς. Αμετάβλητα θεωρήθηκαν μονάχα το διάμηκες κέντρο του L.S. λόγω του σταθερού μήκους του πλοίου και το DWT. Το LSi του εκάστοτε μοντέλου εκτιμήθηκε ότι αυξάνεται συναρτησίως της διαφοράς του όγκου του μοντέλου μέχρι το Deck5 σε σχέση με το πλοίο αναφοράς. Ο συγκεκριμένος όγκος του κάθε μοντέλου υπολογίστηκε αυτόματα από το Napa. Όσο αφορά την καθ' ύψος θέση του κέντρου βάρους του L.S. των νέων σχεδιάσεων υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση ισορροπίας των ροπών. Στα μοντέλα όμως όπου υπήρξε αλλαγή και του ύψους καταστρώματος στεγανών φρακτών, η καθ' ύψος θέση του κέντρου βάρους του L.S. αυξήθηκε κατά 0,5m για κάθε 1m μετατόπισης του καταστρώματος.

Σύμβολο	Επεξήγηση
LS _i	Light Ship
LCGLS _i	Διάμηκες κέντρο βάρους Light Ship
VCG'LS _i	Καθ' ύψος θέση του κέντρου βάρους του L.S. χωρίς αύξηση του ύψους Deck3
VCGLS _i	Τελική καθ' ύψος θέση του κέντρου βάρους του Light Ship
VHULL _i	Όγκος πλοίου έως το Deck5
VCGHULL _i	Καθ' ύψος θέση του όγκου εκτοπίσματος
DWT _i	Χωρητικότητα εκτοπίσματος
ΔLS	Διαφορά Light Ship μοντέλων ($\Delta LS = LS_0 - LS_i$)
Deck3 _i	Ύψος καταστρώματος στεγανών διαφραγμάτων

$$LS_i = LS_0 + 0.1 \cdot (V_{HULL_i} - V_{HULL_0})$$

$$LCG_{LS_i} = LCG_{LS_0}, \quad DWT_i = DWT_0$$

$$VCG'_{LS1} = \frac{(LS_0 * VCG_{LS_0}) + (\Delta LS * VCG_{HULL_i})}{LS_i}$$

$$VSG_{LS_i} = VCG'_{LS_i} + 0.5 * (Deck3_i - Deck3_0)$$

Πέραν του L.S. στα μοντέλα που υπήρξε τροποποίηση του ύψους του κοίλου και του καταστρώματος Deck3, υπολογίστηκαν οι νέες καθ' ύψος συντεταγμένες των κέντρων βαρών, των ομάδων βαρών που προστίθενται στις φορτώσεις. Οι καταστάσεις φόρτωσης για κάθε πλοίο, περιέχονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β, ενώ στους πίνακες 4.2 I&II που ακολουθούν περιέχονται τα βασικά στοιχεία των τριών καταστάσεων φόρτωσης που αφορούν τα 12 μοντέλα. Τα αποτελέσματα όλων των μοντέλων είναι τα αναμενόμενα καθώς παρατηρείται αύξηση του Light Ship σε περιπτώσεις όπου το νέο μοντέλο έχει μεγαλύτερο πλάτος και μεγαλύτερο κοίλο. Όσο αφορά το μετακεντρικό ύψος, συγκρίνοντας μοντέλα ίδιου πλάτους παρατηρούμε ότι εκείνα με το μεγαλύτερο κοίλο έχουν μικρότερο GM, ενώ μεταξύ μοντέλων με ίδιο κοίλο εκείνα με το μεγαλύτερο πλάτος έχουν και το μεγαλύτερο GM. Αυτή η συμπεριφορά του GM οφείλεται στην αύξηση του KG στις περιπτώσεις όπου το κοίλο αυξάνεται και στην αύξηση του BM.

Πίνακας 4.2. I&II Βασικά στοιχεία των τριών καταστάσεων φόρτωσης των μοντέλων.

(I)

RCO	Beam(m)	Deck3(m)	Light Ship(t)	Disp.Subd.(t)	Disp.Part.(t)	Disp.Light.(t)
A2	23,1	8,4	8398,2	11221,4	10392,8	9350,97
B0	23,3	8	8299,3	11122,5	10293,9	9252,14
B1	23,3	8,2	8363,6	11186,8	10358,2	9316,41
B2	23,3	8,4	8428,1	11251,3	10422,7	9380,89
B3	23,3	8,6	8493,1	11316,3	10487,8	9445,90
C0	23,5	8	8328,3	11151,5	10322,8	9281,05
C1	23,5	8,2	8393,1	11216,3	10387,7	9345,88
C2	23,5	8,4	8458,1	11281,3	10452,7	9410,91
C3	23,5	8,6	8523,2	11346,4	10517,8	9475,95
D0	23,7	8	8357,5	11180,9	10352,3	9310,50
D1	23,7	8,2	8422,5	11245,7	10417,1	9375,33
D2	23,7	8,4	8488,1	11311,3	10482,7	9440,92
D3	23,7	8,6	8554,2	11377,4	10548,8	9507,03

(II)

RCO	Beam(m)	Deck3(m)	Ds(m)	Dp(m)	DI(m)	GMs(m)	GMp(m)	GMI(m)	TrimL(m)
A2	23,1	8,4	5,896	5,577	5,141	2,287	1,949	2,155	-0,366
B0	23,3	8	5,823	5,504	5,068	2,596	2,361	2,561	-0,377
B1	23,3	8,2	5,847	5,529	5,094	2,529	2,253	2,450	-0,375
B2	23,3	8,4	5,871	5,554	5,120	2,451	2,143	2,338	-0,373
B3	23,3	8,6	5,895	5,579	5,146	2,366	2,031	2,278	-0,369
C0	23,5	8	5,797	5,481	5,048	2,730	2,559	2,781	-0,384
C1	23,5	8,2	5,822	5,506	5,074	2,678	2,451	2,669	-0,382
C2	23,5	8,4	5,846	5,531	5,100	2,610	2,340	2,555	-0,380
C3	23,5	8,6	5,870	5,557	5,126	2,530	2,227	2,437	-0,376
D0	23,7	8	5,773	5,459	5,028	2,758	2,757	3,003	-0,390
D1	23,7	8,2	5,797	5,483	5,053	2,813	2,651	2,890	-0,388
D2	23,7	8,4	5,822	5,509	5,079	2,758	2,541	2,775	-0,386
D3	23,7	8,6	5,846	5,534	5,106	2,692	2,427	2,656	-0,382

✓ Δημιουργία και εκτέλεση αλγορίθμου μακροεντολών

Για όλα τα μοντέλα εκτελέστηκε ο ίδιος αλγόριθμος. Οι μεταβλητές του αλγορίθμου που διαφέρουν μεταξύ των μοντέλων είναι :

- οι καταστάσεις φόρτωσης
- ροπή ανέμου
- τα όρια των διαμερισμάτων (Limit Table)

Στον Παράρτημα Β, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της συνεισφοράς στον δείκτη υποδιαίρεσης μετά από βλάβη, της εκάστοτε κατάστασης φόρτωσης και των καταστάσεων βλάβης ανάλογα με τον αριθμό ζωνών που εκτείνεται το ρήγμα. Στον πίνακα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του δείκτη υποδιαίρεσης A για όλα τα μοντέλα.

Πίνακας 4.3. Δείκτης υποδιαίρεσης A SOLAS 2009 εναλλακτικών σχεδιάσεων.

RCO	BEAM	DECK3	A SOLAS 2009
A2	23,1	8,4	0,81510
B0	23,3	8	0,82830
B1	23,3	8,2	0,83425
B2	23,3	8,4	0,84118
B3	23,3	8,6	0,84294
C0	23,5	8	0,84534
C1	23,5	8,2	0,85963
C2	23,5	8,4	0,86249
C3	23,5	8,6	0,86569
D0	23,7	8	0,85692
D1	23,7	8,2	0,87537
D2	23,7	8,4	0,88618
D3	23,7	8,6	0,88562

4.4 Οικονομική ανάλυση εναλλακτικών σχεδιάσεων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί θα μελετηθούν τα οικονομικά στοιχεία των εναλλακτικών σχεδιάσεων έτσι ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα του κατά πόσο μπορούμε να αυξήσουμε το όριο του απαιτούμενου δείκτη υποδιαίρεσης R. Βασικότερο κριτήριο όλων είναι η σύγκριση του κόστους επένδυσης το οποίο απαιτείται για την εφαρμογή της κάθε υποψήφιας λύσης, σε σχέση με το βαθμό μείωσης της διακινδύνευσης που επιφέρει. Ο υπολογισμός της δαπάνης αυτής, γίνεται μέσω του δείκτη GCAF (gross cost of averting a fatality – μεικτό κόστος για την αποφυγή μοναδιαίας απώλειας), που λαμβάνεται σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές του IMO FSA (MSC 83/INF.2, 2007) και ορίζεται ως ο λόγος της πρόσθετης δαπάνης προς το κέρδος σε διακινδύνευση:

$$GCAF = \frac{\Delta C}{\Delta R}$$

Στη ναυτιλία χρησιμοποιείται ως αποδεκτό GCAF τα \$3 εκατομμύρια. Μπορούν δηλαδή να εφαρμοστούν λύσεις που η πρόσθετη δαπάνη που απαιτούν δεν υπερβαίνει τα \$3 εκατομμύρια και επιφέρει μείωση της πιθανότητας απώλειας κατά μια ανθρώπινη ζωή. Παράλληλα με το GCAF υπολογίζεται και ο καθαρός δείκτης αποφυγής μοναδιαίας απώλειας NCAF, όπου από το κόστος αφαιρείται το προσδοκώμενο παράπλευρο οικονομικό όφελος που θα προκύψει από την εφαρμογή της εξεταζόμενης λύσης.

$$NCAF = GCAF - \frac{\text{οικονομικά οφέλη}}{\Delta R}$$

Όπου, $\Delta R = \Delta PLL$ και PLL είναι η πιθανότητα απώλειας ζωής

Ο καθορισμός των τιμών αυτών των μεγεθών, έχει προκύψει από μελέτη των κοινωνικών προτύπων της δεκαετίας του 90' και για το λόγο αυτό οι ισχύοντες κανονισμοί αναφέρουν ότι πρέπει να αναθεωρούνται τακτικά. Στην παρούσα διπλωματική, το ανώτερο όριο του αποδεκτού GCAF οριστικό ίδιο με αυτό που προτείνεται από τη μέθοδο GOALDS και είναι ίσο με \$7.45 εκατομμύρια.

Στον υπολογισμό του GCAF υπεισέρχονται πολλές μεταβλητές που σχετίζονται με την οικονομική εκμετάλλευση του πλοίου, καθιστώντας τον αρκετά απαιτητικό. Για το λόγο αυτό οι υπολογισμοί διεξήχθησαν μέσω της χρήσης μακροεντολών, που προσδιορίζουν τα καινούργια τεχνικά και οικονομικά στοιχεία του πλοίου, όπως είναι η ισχύς της κύριας μηχανής και η κατανάλωση καυσίμων. Στον Πίνακα 4.4, που ακολουθεί, παρατίθενται αναλυτικά η πρόσθετη δαπάνη που απαιτείται για την κατασκευή και λειτουργία του εκάστοτε μοντέλου (ΔC), η πιθανότητα απώλειας ζωής (PLL), καθώς και το GCAF που προκύπτει από τα δύο προηγούμενα στοιχεία.

Πίνακας 4.4. Οικονομικά στοιχεία εναλλακτικών σχεδιάσεων (SOLAS 2009).

RCO	A	ΔC m\$	PLL	GCAF m\$
A2	0,8151	-	4,720	-
B0	0,8283	4,97	4,383	14,75
B1	0,8343	6,57	4,231	13,42
B2	0,8412	7,99	4,054	11,99
B3	0,8429	9,8	3,653	9,18
C0	0,8453	6,18	3,948	8,00
C1	0,8596	7,85	3,583	6,90
C2	0,8625	9,46	3,510	7,82
C3	0,8657	11,1	3,428	8,59
D0	0,8569	7,44	3,653	6,97
D1	0,8754	9,09	3,181	5,91
D2	0,8862	10,76	2,905	5,93
D3	0,8856	12,42	2,920	6,90

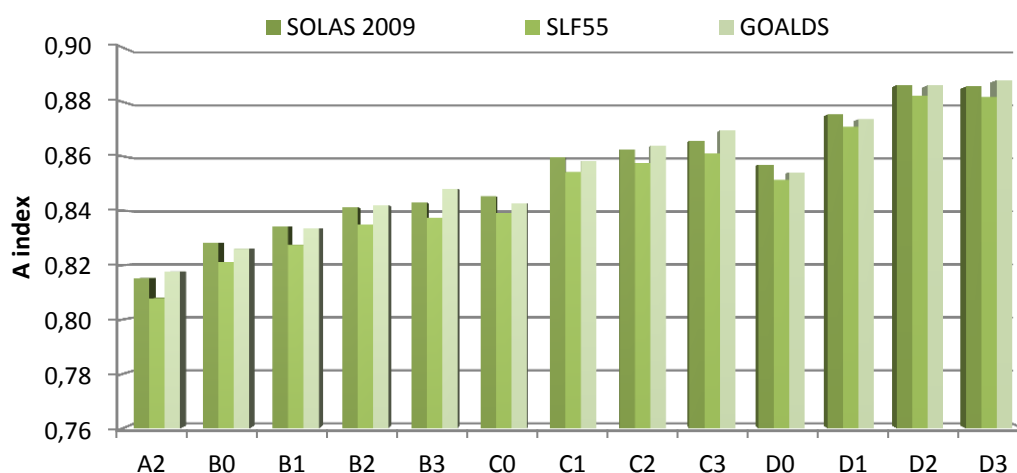
4.5 Σχολιασμός συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων

Τα συνολικά αποτελέσματα της εφαρμογής των τριών εναλλακτικών μεθόδων (SOLAS 2009, SLF 55, GOALDS) για το σύνολο των σχεδιάσεων συνοψίζονται στον πίνακα 4.5 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εναλλακτικών σχεδιάσεων.

RCO	ΔC m\$	SOLAS 2009			SLF 55 formulation			GOALDS formulation		
		A	PLL	GCAF m\$	A	PLL	GCAF m\$	A	PLL	GCAF m\$
A2	-	0,81510	4,720	-	0,80767	4,910	-	0,81757	4,658	-
B0	4,97	0,82830	4,383	14,75	0,82108	4,568	14,52	0,82595	4,443	23,15
B1	6,57	0,83425	4,231	13,42	0,82737	4,407	13,06	0,83343	4,252	16,20
B2	7,99	0,84118	4,054	11,99	0,83498	4,213	11,46	0,84192	4,036	12,84
B3	9,80	0,84294	3,653	9,18	0,83730	4,153	12,96	0,84802	3,880	12,59
C0	6,18	0,84534	3,948	8,00	0,83913	4,107	7,69	0,84273	4,015	9,61
C1	7,85	0,85963	3,583	6,90	0,85419	3,722	6,61	0,85822	3,619	7,56
C2	9,46	0,86249	3,510	7,82	0,85758	3,636	7,42	0,86387	3,475	8,00
C3	11,10	0,86569	3,428	8,59	0,86114	3,546	8,14	0,86953	3,331	8,36
D0	7,44	0,85692	3,653	6,97	0,85133	3,796	6,68	0,85407	3,725	7,98
D1	9,09	0,87537	3,181	5,91	0,87077	3,298	5,64	0,87361	3,227	6,35
D2	10,76	0,88618	2,905	5,93	0,88221	3,007	5,66	0,88606	2,909	6,15
D3	12,42	0,88562	2,920	6,90	0,88172	3,020	6,57	0,88798	2,860	6,91

Εξετάζοντας τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των νέων σχεδιάσεων παρατηρούμε ότι επιτεύχθηκε ο αρχικός στόχος της δημιουργίας μοντέλων με μεγαλύτερο δείκτη υποδιαίρεσης A (σχήμα 4.2). Οι αιτίες της αύξησης του δείκτη καθώς και η διακύμανση της τιμής του μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων, μελετώνται και αναλύονται στη συνέχεια. Ενώ στο τέλος της ενότητας πραγματοποιείται η αξιολόγηση των οικονομικών στοιχείων των μοντέλων και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.



Σχήμα 4.2. Σύγκριση δεικτών A των τριών μεθόδων για τις νέες σχεδιάσεις.

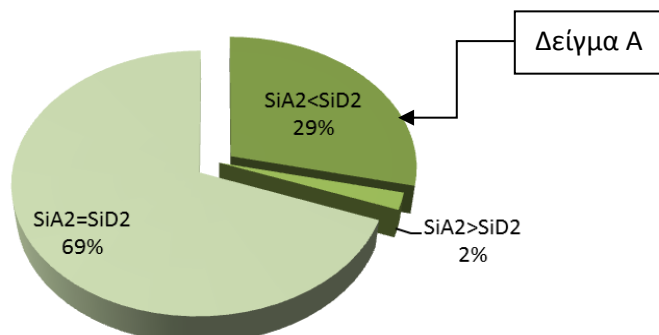
- Μελέτη συμπεριφοράς δείκτη A των νέων σχεδιάσεων
- ✓ Αιτίες σημαντικής αύξησης του δείκτη A

Η επίδραση των RCO στην ευστάθεια του πλοίου ύστερα από βλάβη παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά στις τρεις εναλλακτικές μεθόδους (SOLAS 2009, SLF 55, GOALDS). Για το λόγο αυτό στη συνέχεια εξετάζεται μονάχα ο δείκτης A που αφορά την μέθοδο SOLAS 2009.

Όλες οι εναλλακτικές σχεδιάσεις επιτυγχάνουν δείκτη υποδιαίρεσης A μεγαλύτερο του αρχικού μοντέλου. Η μεγαλύτερη μάλιστα αύξηση του δείκτη φτάνει την τιμή $\delta A=0,07108$ και αντιστοιχεί στη σχεδίαση D2 όπου $A=0,88562$. Για να εξηγηθεί η συμπεριφορά αυτή του δείκτη A, στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των σεναρίων βλάβης των δύο αυτών μοντέλων [A2 & D2] που διαφέρουν μόνο ως προς το πλάτος.

Σύμφωνα με τη μέθοδο SOLAS 2009 ο τελικός δείκτης A ενός πλοίου είναι αποτέλεσμα του αθροίσματος $A_i=w_i \cdot r_i \cdot v_i \cdot s_i$ (ενότητα 2.2). Στην περίπτωση των δύο σχεδιάσεων που συγκρίνουμε, οι παράγοντες w_i και v_i για την εκάστοτε βλάβη είναι ίδιοι καθώς είναι ανεξάρτητοι της μεταβολής του πλάτους. Ο παράγοντας r_i διαφέρει ελάχιστα μεταξύ των σχεδιάσεων και εξαιτίας αυτού θεωρείται ασήμαντη η επιρροή του στο τελικό υπολογισμό του A. Ο παράγοντας που παίζει καθοριστικό ρόλο στην τελική τιμή του A_i , με τον οποίο συνεισφέρει η κάθε κατάσταση βλάβης, είναι το s_i . Το s_i όπως έχει ήδη αναφερθεί αντιστοιχεί στην πιθανότητα μη βύθισης ή ανατροπής του πλοίου ύστερα από συγκεκριμένη κατάκλυση. Οι δύο σχεδιάσεις που συγκρίνονται έχουν τα ίδια ακριβώς σενάρια βλάβης (2474) εκ των οποίων τα 760 παρουσιάζουν διαφορετικό

si. Η πλειοψηφία αυτών των περιπτώσεων (708 στις 760) αφορά βλάβες όπου ο δείκτης si του μοντέλου D2 είναι μεγαλύτερος αυτού του A2. Ο μέσος όρος αύξησης του δείκτη στις 708 αυτές περιπτώσεις είναι ίσος με $\delta si = +0,329$ που αποτελεί σπουδαία αύξηση για έναν παράγοντα που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 1. Στο σχήμα 4.3 που ακολουθεί φαίνεται η σύγκριση του δείκτη Si των δύο μοντέλων, στο σύνολο των βλαβών.



Σχήμα 4.3. Σύγκριση δείκτη si του συνόλου των βλαβών (2474=100%) μεταξύ των μοντέλων A2 & D2.

Όπως έχει ήδη περιγραφεί στην ενότητα 2.2, ο δείκτης si της εκάστοτε βλάβης δύνεται από την παρακάτω σχέση: $si = \text{minimum}\{S_{intermediate,i} \text{ or } S_{final,i} * S_{mom,i}\}$

Οι περιπτώσεις που θα εξετάσουμε στη συνέχεια αφορούν τις καταστάσεις βλάβης όπου ο δείκτης si αυξήθηκε (**Δείγμα A με 708 βλάβες**). Στο σύνολο των περιπτώσεων αυτών το si είναι ίσο με το γινόμενο ($S_{final} * S_{mom}$), όπου S_{final} είναι η πιθανότητα επιβίωσης στο τελικό στάδιο και S_{mom} η πιθανότητα επιβίωσης υπό εγκάρσια κλίση. Συνεπώς η συμπεριφορά του δείκτη A του μοντέλου D2 εξαρτάται από τη συμπεριφορά των παραγόντων $S_{final,i}$ και $S_{mom,i}$.

ο **Συμπεριφορά $S_{mom,i}$ στο δείγμα A**

Ο παράγοντας S_{mom} παρουσίασε σημαντική αύξηση σε όλο το δείγμα των σεναρίων βλάβης καθώς είχε μέσο όρο μεταβολής $\delta S_{mom,i} = 0,2741$. Η θετική μεταβολή του δείκτη στο μοντέλο μεγαλύτερου πλάτους οφείλεται στην αύξηση δύο εκ των τριών παραγόντων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του (GZ_{max} , Displacement).

$$S_{mom,i} = \frac{(GZ_{max} - 0,04) * Displacement}{M_{heel}}$$

- Σταθερός παράγοντας

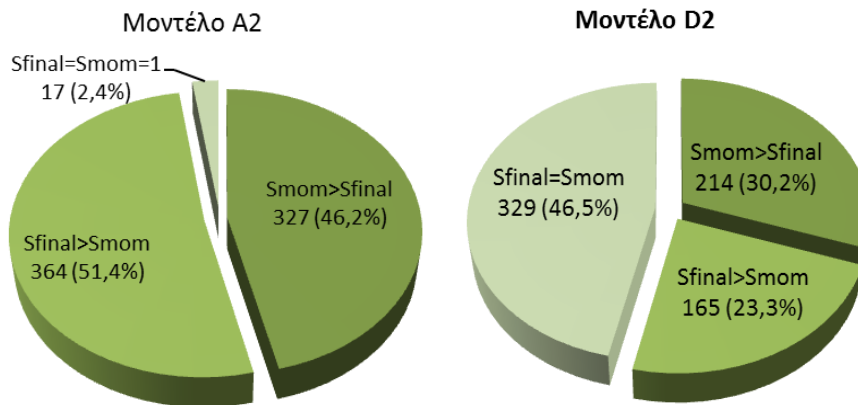
M_{heel} : είναι ίδιος στα δύο μοντέλα διότι δεν άλλαξε η επιφάνεια προβολής του πλοίου που εκτίθεται στη ροπή του ανέμου.

- Παράγοντες που παρουσίασαν αύξηση

Displacement: αυξήθηκε εξαιτίας της αύξησης του Light Ship κατά 89,9tons που ισοδυναμεί σε ποσοστιαία μεταβολή του displacement του A2 $\delta Displ. = +0,8\%$.

GZ_{max} : Αυξήθηκε στο σύνολο του δείγματος με μέσο όρο $\delta GZ_{max} = +0,2046$.

Η θετική μεταβολή του S_{mom} απεικονίζεται στο σχήμα 4.4 όπου συγκρίνονται μεταξύ τους οι δείκτες S_{final} και S_{mom} και παρατηρείται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις βλάβης του μοντέλου D2, σε αντίθεση με το μοντέλο A2, ο παράγοντας S_{mom} του γινομένου $S_{final} \cdot S_{mom}$ είναι ίσος ή μεγαλύτερος του παράγοντα S_{final} . Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των 708 περιπτώσεων του Δείγματος A, ο δείκτης S_{final} υπερβαίνει το δείκτη S_{mom} μόνο σε 165 περιπτώσεις στο μοντέλο D2, ενώ ο αντίστοιχος αριθμός για το μοντέλο A2 είναι 364. Επίσης παρατηρείται ότι στο μοντέλο D2 το S_{mom} είναι ίσο με το S_{final} και ίσο με τη μονάδα σε 329 περιπτώσεις, ενώ στο A2 μόνο σε 17. Συνεπώς, τουλάχιστον σε 312 περιπτώσεις όπου το μοντέλο A2 είχε $S_{mom} < 1$, το μοντέλο D2 επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή $S_{mom} = 1$.



Σχήμα 4.4. Σύγκριση δεικτών S_{final} και S_{mom} στα μοντέλα A2 & D2 στις 708 περιπτώσεις του Δείγματος A.

ο **Συμπεριφορά $S_{final,i}$ στο δείγμα A**

Όμοια συμπεριφορά με το $S_{mom,i}$ παρουσίασε και ο παράγοντας $S_{final,i}$, ο οποίος μεταβλήθηκε θετικά σε 648 περιπτώσεις του δείγματος με μέση αύξηση που φτάνει την τιμή $\delta S_{final,i} = +0,2379$. Η αιτία της μεγάλης αύξησης του δείκτη αυτού μελετάται αναλυτικά στη συνέχεια όπου εξετάζονται οι τρεις παράγοντες που συμμετέχουν στον υπολογισμό του $S_{final,i}$ (συντελεστής K , GZ_{max} , $Range$).

$$S_{final} = K \cdot \left[\frac{GZ_{max}}{0,12} \cdot \frac{Range}{16} \right]^{1/4},$$

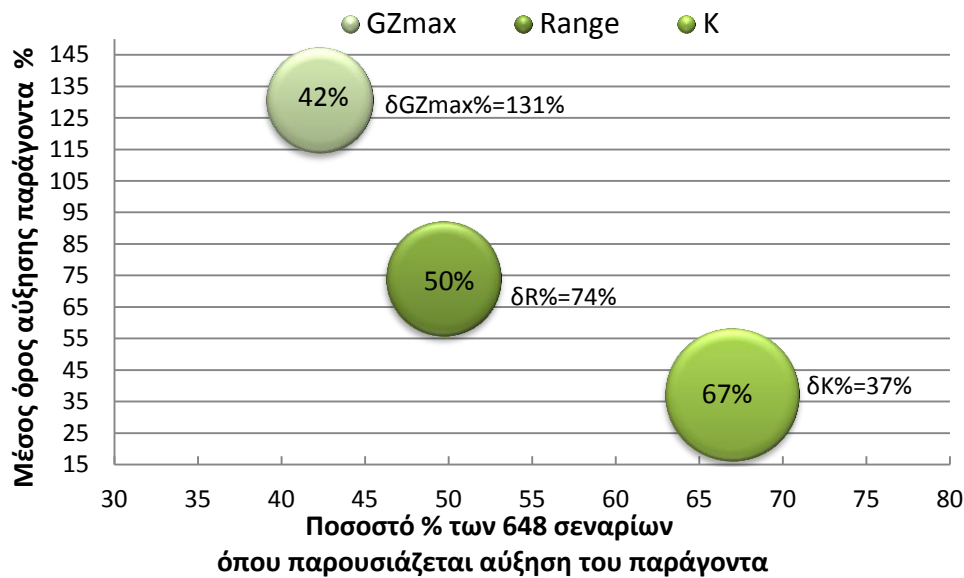
Όπου, $K = 1$, αν $\theta_e \leq 7$, $K = \left[\frac{15 - \theta_e}{8} \right]^{1/2}$, αν $7 < \theta_e < 15$, $K = 0$, αν $\theta_e \geq 15$

- Συμπεριφορά παραγόντων

Το πλοίο αναφοράς έχει συντελεστή K μικρότερο της μονάδας σε 434 περιπτώσεις βλάβης. Το μοντέλο D2 επιτυγχάνει συντελεστή $K=1$ στις αντίστοιχες καταστάσεις καθώς η γωνία εγκάρσιας κλίσης θ_e δεν ξεπερνάει σε καμία από αυτές τις 7 μοίρες. Όσο αφορά το εύρος ευστάθειας ($Range$) και το μέγιστο μοχλοβραχίονα επαναφοράς (GZ_{max}) παρουσιάζουν και οι δύο σημαντική αύξηση όπως είναι αναμενόμενο στο μοντέλο μεγαλύτερου πλάτους (D2). Στον πίνακα 4.6 και το σχήμα 4.5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα και των τριών παραγόντων των δύο μοντέλων που συγκρίνονται για τα σενάρια βλάβης του δείγματος A (648).

Πίνακας 4.6. Στατιστικά αποτελέσματα της μεταβολής των παραγόντων (K, Range, GZmax) στις 648 περιπτώσεις του δείγματος.

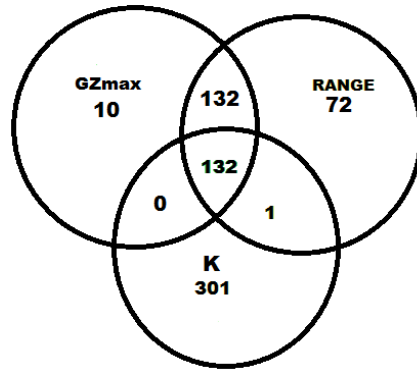
Παράγ.	Σενάρια βλάβης όπου παρουσιάζεται αύξηση	Σενάρια βλάβης όπου παρουσιάζεται αύξηση %	(Μοντέλο A2) Μέσος όρος	(Μοντέλο D2) Μέσος όρος	Μέσος όρος αύξησης παράγοντα %
Range	322	49,69	8,407	14,627	73,98
K	434	66,98	0,698	0,958	37,22
GZ	274	42,28	0,048	0,110	130,75



Σχήμα 4.5. Μέσος όρος αύξησης του εκάστοτε παράγοντα συναρτήσει του ποσοστού % των 648 σεναρίων που παρουσιάζεται αύξηση των παραγόντων (K, Range, GZmax).

Από την ανάλυση που προηγήθηκε φαίνεται ξεχωριστά ο κάθε παράγοντας σε πόσες περιπτώσεις βλάβης μεταβάλλεται και κατά πόσο. Στο σχήμα 4.6 που παρουσιάζεται παρακάτω εξετάζεται στο σύνολο των περιπτώσεων του δείγματος πότε αυξάνεται ένας, δύο ή και τρεις παράγοντες μαζί. Οι τρεις κύκλοι αντιστοιχούν στους τρεις παράγοντες και οι τομές των κύκλων στις περιπτώσεις όπου παρατηρείται αύξηση παραπάνω του ενός παράγοντα.

Επίσης στον πίνακα 4.7 παρουσιάζεται συνοπτικά ο μέσος όρος αύξησης του δείκτη S_{final} στις περιπτώσεις όπου μεταβάλλεται μόνο ένας εκ των τριών παραγόντων. Αξίζει να σημειωθεί ότι, εξαιτίας του τύπου υπολογισμού του S_{final} , η μεταβολή του είναι ανάλογη της μεταβολής του συντελεστή K και ανάλογη της μεταβολής της τάς ($\sqrt[4]{GZmax}$) και ($\sqrt[4]{Range}$) αντίστοιχα. Συνέπεια αυτού, είναι ότι ο μέσος όρος αύξησης του δείκτη S_{final} στις περιπτώσεις όπου μεταβάλλεται μόνο ο συντελεστής K αγγίζει το 16,6%, που είναι 5 φορές μεγαλύτερος της αντίστοιχης τιμής στις περιπτώσεις αύξησης του $GZmax$ ή του $Range$.



Σχήμα 4.6. Αριθμός σεναρίων βλάβης όπου παρουσιάζεται αύξηση ενός, δύο ή και τριών εκ των παραγόντων (K, Range, GZmax) (σύνολο σεναρίων 648).

Πίνακας 4.7. Μέσος όρος αύξησης του δείκτη Sfinal στις περιπτώσεις όπου μόνο ένας εκ των τριών παραγόντων αυξάνεται.

Παράγοντας που αυξάνεται	(Μοντέλο A2) Μέσος όρος Sfinal	(Μοντέλο D2) Μέσος όρος Sfinal	Μέσος όρος αύξησης Sfinal %
Range (72 περιπτώσεις)	0,9708	0,9985	2,9
K (301 περιπτώσεις)	0,8158	0,9515	16,6
GZ (10 περιπτώσεις)	0,9706	1,0000	3,0

Για την πιο ολοκληρωμένη μελέτη της συμπεριφοράς του δείκτη s_i , επιπλέον της ανάλυσης των αποτελεσμάτων των αλγόριθμων πραγματοποιήθηκε εξαγωγή διαγραμμάτων που οπτικοποιούν την κατάσταση του πλοίου ύστερα από την κατάκλυση. Τα διαγράμματα παρήχθησαν με τη βοήθεια εντολών του προγράμματος Nara και υλοποιήθηκαν για επιλεγμένες περιπτώσεις βλάβης.

Μια εξ αυτών των περιπτώσεων παρουσιάζεται στη συνέχεια και αφορά περίπτωση βλάβης με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς κατακλύζονται τα δύο κατώτερα καταστρώματα οχημάτων του πλοίου (σχήματα 4.7 [I&II]). Η συγκεκριμένη κατάσταση βλάβης παρουσιάζει σημαντική άνοδο του δείκτη s_i στο μοντέλο D2 ($\delta s_i = +0,967$), η οποία οφείλεται στην αύξηση όλων των παραγόντων που εμπεριέχονται στον υπολογισμό του (πίνακας 4.8). Χαρακτηριστική είναι η θετική μεταβολή του Range και του GZmax στο μοντέλο D2. Οι μεταβολές αυτές είναι εύκολα αντιληπτές κατά τη σύγκριση των καμπυλών ευστάθειας των δύο μοντέλων (σχήμα 4.8 [I & II]).

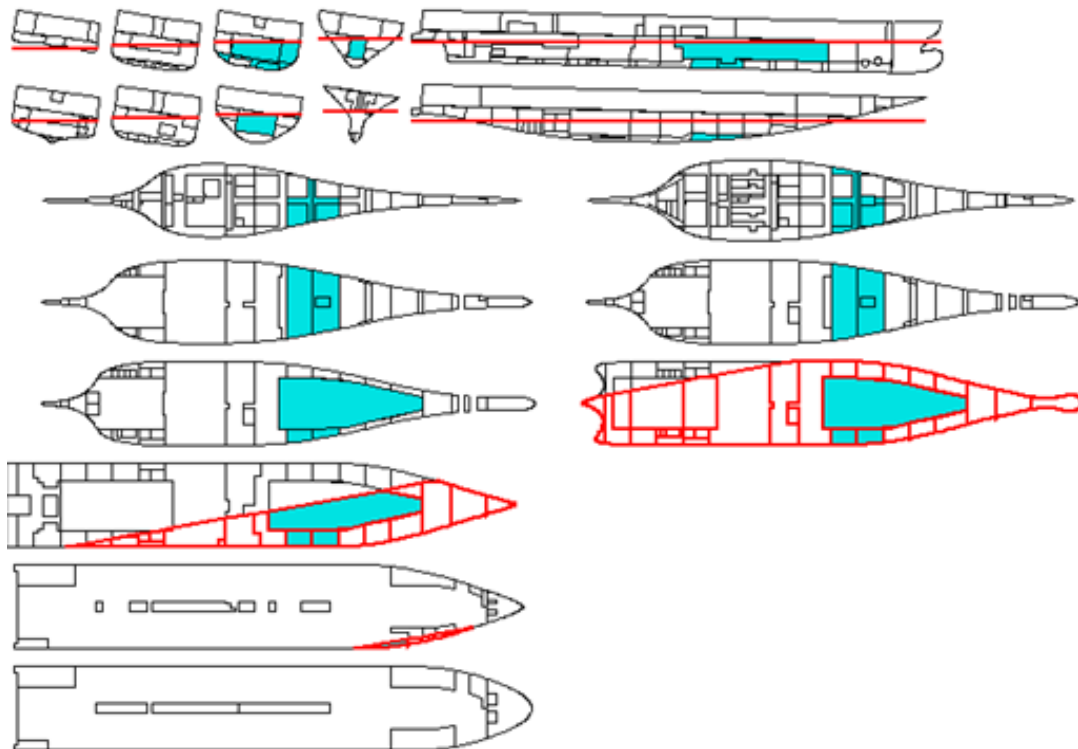
Κατάσταση βλάβης: **DP/SDSS14-15.2.0**

Κατάσταση φόρτωσης: Partial

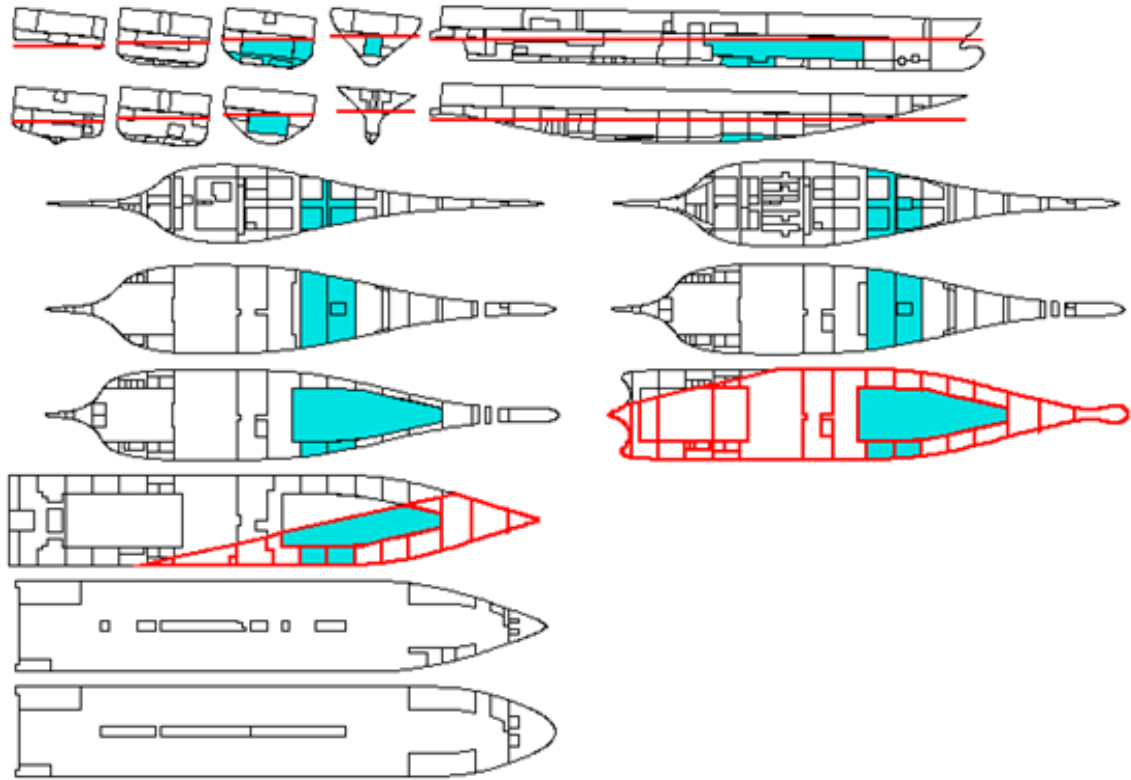
Αριθμός ζωνών κατάκλυσης: 2 [ζώνη 14&15]

Πίνακας 4.8. Στοιχεία υπολογισμού δείκτη s_i της βλάβης (DP/SDSS14-15.2.0) για τα μοντέλα A2 και D2.

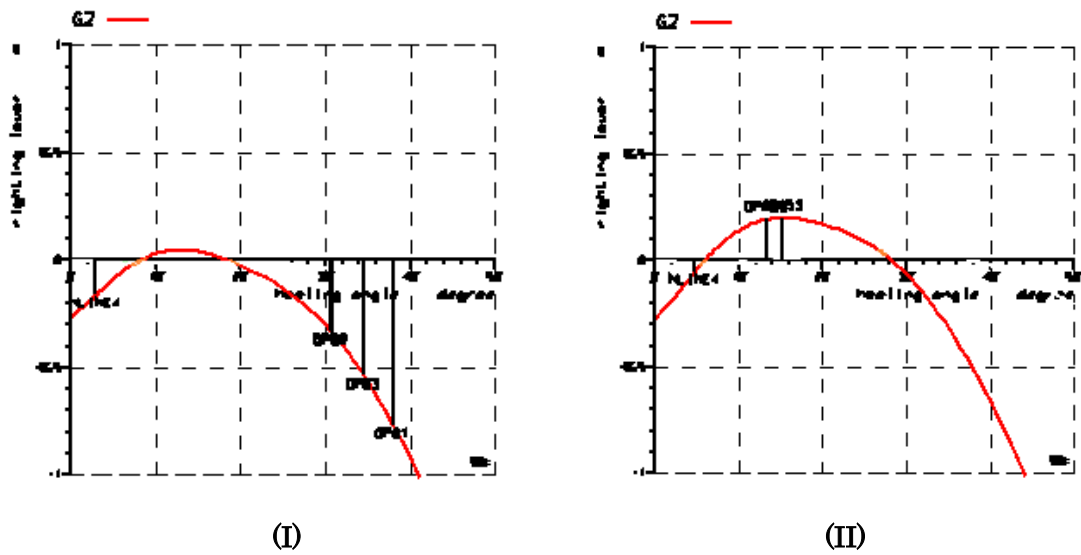
Μοντέλο	θ_e (deg.)	K	GZ _{max} (m)	Range (deg.)	S _{mom}	S _{final}	S _i (S _{mom} *S _{final})
A2	8,02	0,934	0,047	10,48	0,054	0,666	0,033
D2	5,84	1,000	0,201	16,00	1,000	1,000	1,000
Διαφορά	-2,18	0,066	0,154	5,52	0,946	0,334	0,967



Σχήμα 4.7. (I) Κατάσταση βλάβης DP/SDSS14-15.2.0 για το A2.



Σχήμα 4.7.(II) Κατάσταση βλάβης DP/SDSS14-15.2.0 για το D2.



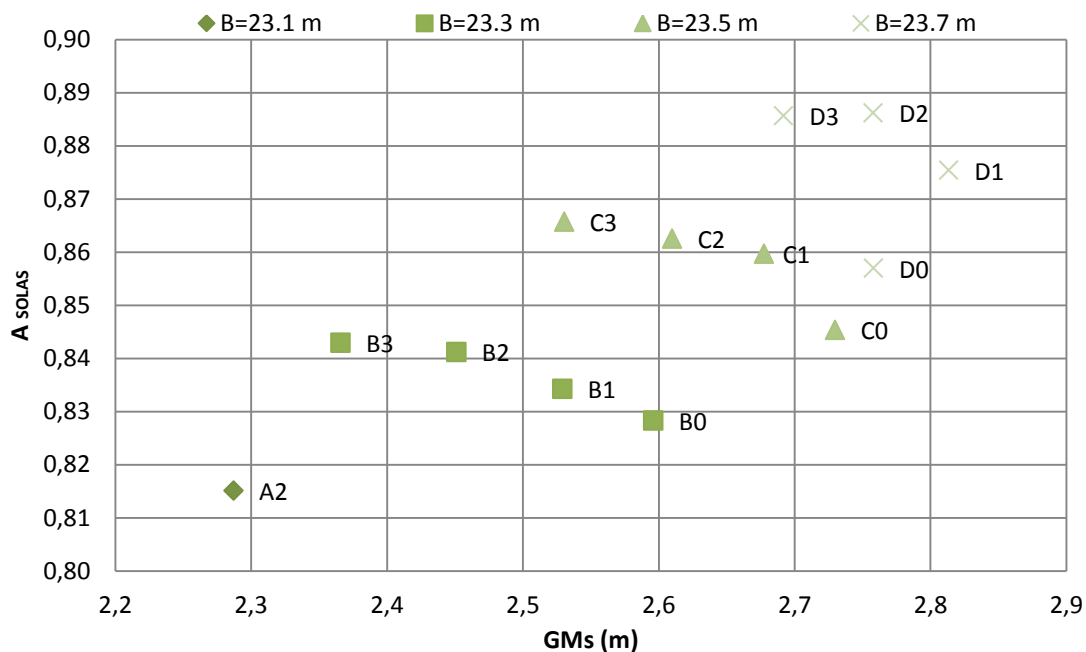
Σχήμα 4.8. Καμπύλη ευστάθειας GZ της βλάβης DP/SDSS14-15.2.0 για το A2 & D2.

✓ Επιρροή διαστάσεων [B & D]

Η διακύμανση του δείκτη A μεταξύ των μοντέλων διαφορετικού πλάτους και κοίλου, μας παρέχει αρκετά στοιχεία ώστε να καταλάβουμε το πώς οι δύο αυτές μεταβλητές επηρεάζουν την πιθανότητα επιβίωσης του πλοίου. Στη συνέχεια εξετάζεται ξεχωριστά η επιρροή του πλάτους και του κοίλου στο δείκτη A των σχεδιάσεων καθώς και στο μετακεντρικό ύψος GM.

Συγκρίνοντας μεταξύ τους τα μοντέλα [B2,C2,D2] και με το A2 όπου έχουν το ίδιο κοίλο παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνουμε το **πλάτος** αυξάνεται σημαντικά το GMs και το A αντίστοιχα (σχήμα 4.9). Πιο συγκεκριμένα, η πολύ μικρή αύξηση του πλάτους του αρχικού μοντέλου A2 κατά 0,2 m ($\delta B=0,9\%$) που υλοποιήθηκε στο μοντέλο B2 επιτυγχάνει αύξηση του δείκτη A ίση με $\delta A=0,026$ ($\delta A=3\%$). Η μεγαλύτερη αύξηση του δείκτη A επιτυγχάνεται στο μοντέλο D2 το οποίο έχει και το μεγαλύτερο πλάτος $B=23.7m$, όπου $\delta B=0,6$ ($\delta B=2,6\%$) και $\delta A=0,071$ ($\delta A=8,7\%$). Από τα αποτελέσματα αυτά συμπεραίνουμε ότι η αύξηση του πλάτους είναι ευνοϊκή για το δείκτη A και πως με μικρή σχετικά μεταβολή του πρώτου παράγοντα μπορούμε να επιτύχουμε κανοποιητική αύξηση του δεύτερου.

Η επιρροή της μεταβολής του **κοίλου** του πλοίου παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του πλάτους όσο αφορά το δείκτη A. Συγκρίνοντας μεταξύ τους τα μοντέλα [B0,B1,B2,B3] που διαφέρουν μόνο ως προς το κοίλο, είναι εμφανές ότι το μοντέλο με το μεγαλύτερο κοίλο επιτυγχάνει και το μέγιστο A ($A=0,84294$). Το μετακεντρικό ύψος αντίθετα καθώς το κοίλο και το κατάστρωμα στεγανών φρακτών ανεβαίνουν, όπως είναι αναμενόμενο μειώνεται. Η αύξηση του ύψους της θέσης των καταστρωμάτων που βρίσκονται πάνω από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών, επιφέρει σημαντική αύξηση του κέντρου βάρους του πλοίου με συνέπεια να μειώνεται το GMs.

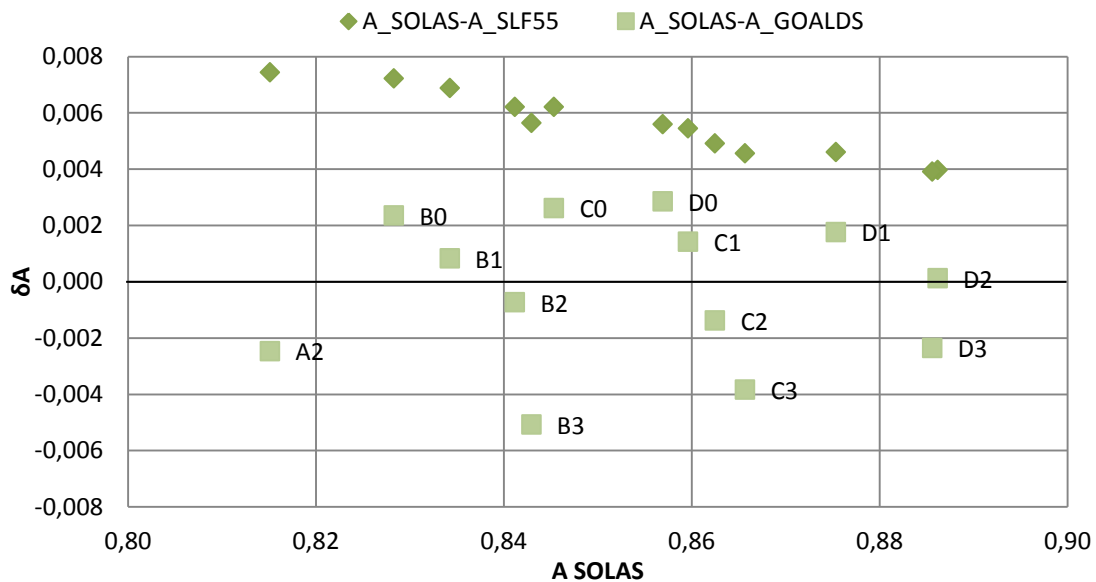


Σχήμα 4.9. Δείκτης A SOLAS συναρτήσεσι του μετακεντρικού ύψους GMs (at subdivision draught).

- ✓ Σύγκριση συμπεριφοράς δείκτη A μεταξύ των μεθόδων (SOLAS 2009, SLF 55, GOALDS)

Οι διαφορές μεταξύ των δεικτών υποδιαίρεσης A που υπολογίστηκαν με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους είναι σχετικά μικρές. Στο σχήμα 4.9 που ακολουθεί απεικονίζονται οι διαφορές $A_{SOLAS}-A_{SLF55}$ και $A_{SOLAS}-A_{GOALDS}$ για όλες τις εναλλακτικές σχεδιάσεις. Από το σχήμα είναι ξεκάθαρο ότι η μέθοδος SLF55 είναι η πιο αυστηρή από τις τρεις μεθόδους καθώς σε όλες τις εναλλακτικές σχεδιάσεις ο χαμηλότερος δείκτης A αντιστοιχεί σε αυτή τη μέθοδο. Επίσης εμφανίζει μεγαλύτερη απόκλιση από την μέθοδο SOLAS σε σύγκριση με τη GOALDS και ειδικότερα στις σχεδιάσεις όπου το A είναι μικρό, με μέγιστη απόκλιση $A_{SOLAS}-A_{SLF55}=0,0743$ στο μοντέλο A2.

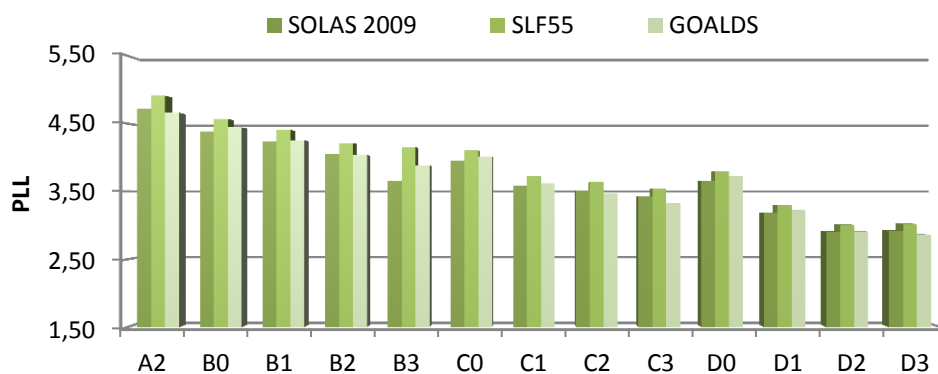
Αντίθετα από τη μέθοδο SLF55 η οποία σε όλες τις περιπτώσεις έχει δείκτη A μικρότερο του Asolas, η μέθοδος GOALDS σε κάποιες περιπτώσεις είναι αυστηρότερη της SOLAS και σε κάποιες ευνοϊκότερη με διακύμανση διαφοράς $A_{SOLAS}-A_{GOALDS}$ από $-0,00508$ έως $+0,00285$. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι συγκρίνοντας σε μοντέλα ίδιου πλάτους την απόκλιση της μεθόδου GOALDS από τη SOLAS, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η GOALDS είναι ευνοϊκότερη στα μοντέλα που έχουν ψηλότερο κατάστρωμα στεγανών φρακτών και κοίλο. Το παραπάνω γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 4.10 όπου τα μοντέλα με το μεγαλύτερο κοίλο [B3,C3,D3] εμφανίζουν τις μεγαλύτερες αρνητικές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων ενώ το αντίθετο συμβαίνει στα μοντέλα που έχουν χαμηλότερο κοίλο του πλοίου αναφοράς [B0,C0,D0].



Σχήμα 4.10. Διαφορές δεικτών A των δύο εναλλακτικών μεθόδων από το δείκτη Asolas.

➤ Μελέτη συμπεριφοράς δείκτη PLL των νέων σχεδιάσεων

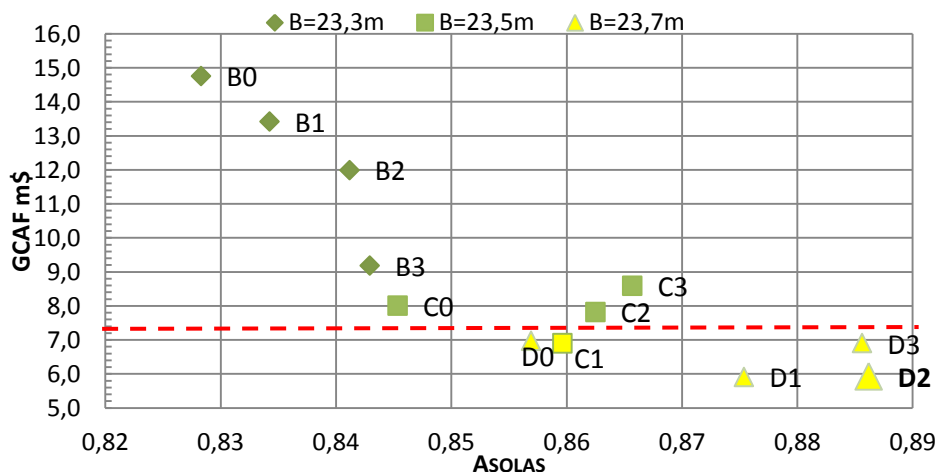
Ο τρόπος υπολογισμού του δείκτη PLL για τις νέες σχεδιάσεις είναι ίδιος με αυτόν που αναλύθηκε στην ενότητα 3.5 που προηγήθηκε. Ως εκ τούτου ο δείκτης PLL των νέων σχεδιάσεων είναι άμεσα συσχετισμένος με τη συμπεριφορά του δείκτη A και πιο συγκεκριμένα είναι ανάλογος της ποσότητας (1-A). Παρατηρούμε λοιπόν με τη βοήθεια του σχήματος 4.11 ότι συγκρίνοντας σχεδιάσεις ίδιου πλάτους, χαμηλότερο δείκτη PLL επιτυγχάνουν εκείνες με το υψηλότερο κοίλο. Παρόμοια συμπεριφορά με την αύξηση του κοίλου, παρουσιάζει και η αύξηση του πλάτους του πλοίου καθώς τα μοντέλα με το μεγαλύτερο πλάτος [D0,D1,D2,D3] επιτυγχάνουν τους χαμηλότερους δείκτες PLL σε σύγκριση με τα μοντέλα όμοιου ύψους κοίλου.



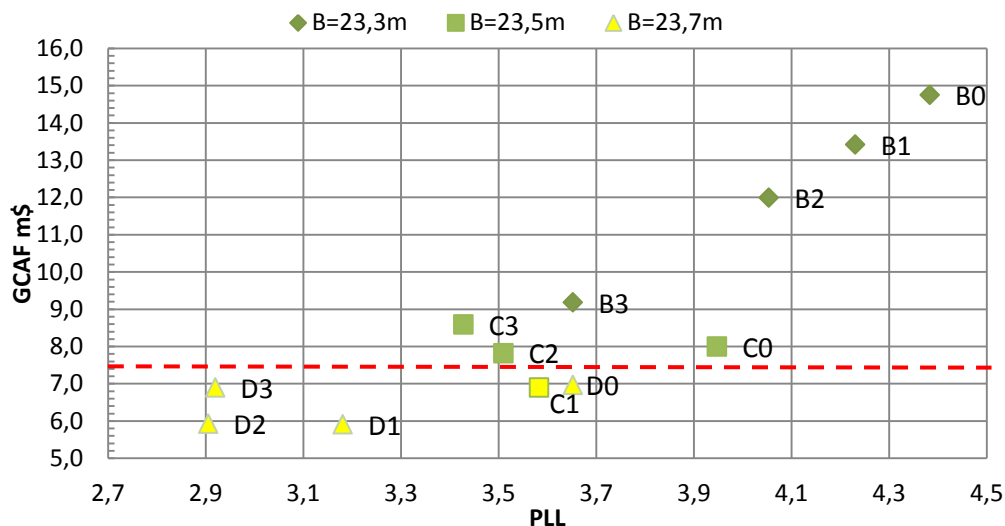
Σχήμα 4.11. Σύγκριση δεικτών PLL των τριών μεθόδων για τις νέες σχεδιάσεις.

➤ Μελέτη οικονομικών στοιχείων των νέων σχεδιάσεων

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.12 από το σύνολο των 12 εναλλακτικών σχεδιάσεων του πλοίου αναφοράς, πέντε ικανοποιούν το όριο του $GCAF < 7,45m\$$ ενώ τρεις βρίσκονται οριακά πάνω από την ορισμένη τιμή [C3,C2,C0]. Τα μοντέλα που είναι εντός των αποδεκτών ορίων είναι τα [C1,D0,D1,D2,D3] τα οποία έχουν όλα αυξημένο πλάτος σε σύγκριση με το αρχικό μοντέλο. Μεταξύ των σχεδιάσεων που ικανοποιούν το όριο του GCAF, η τροποποιημένη σχεδίαση D2 επιτυγχάνει τον μεγαλύτερο δείκτη A. Τα μοντέλα [B0,B1,B2,B3] που κρίνονται μη ικανοποιητικά με βάση το κριτήριο του GCAF έχουν χαμηλό σχετικά κόστος, αλλά η βελτίωση της ευστάθειας τους σε σχέση με το αρχικό μοντέλο δεν είναι σημαντική.



Σχήμα 4.12. Σύγκριση GCAF συναρτήσει ASOLAS για τις νέες σχεδιάσεις.

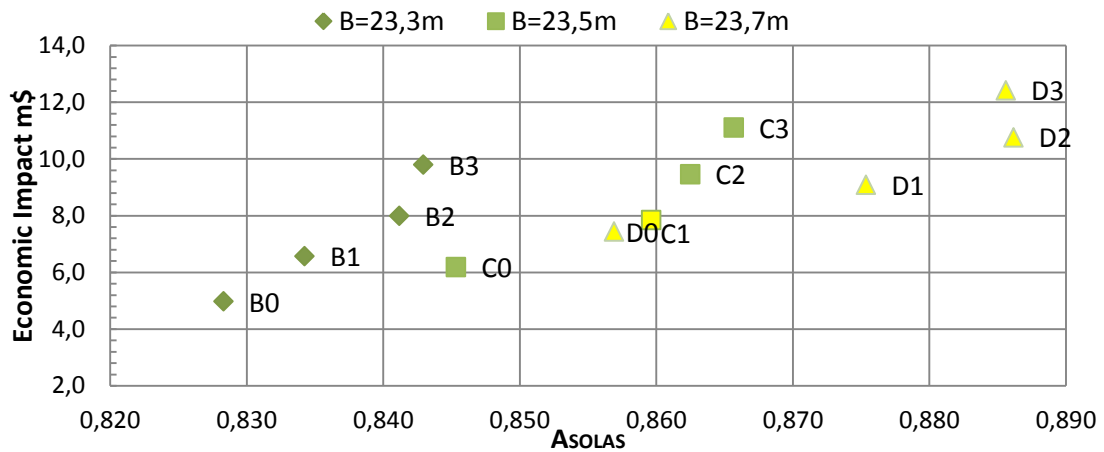


Σχήμα 4.13. Σύγκριση GCAF συναρτήσει PLL για τις νέες σχεδιάσεις.

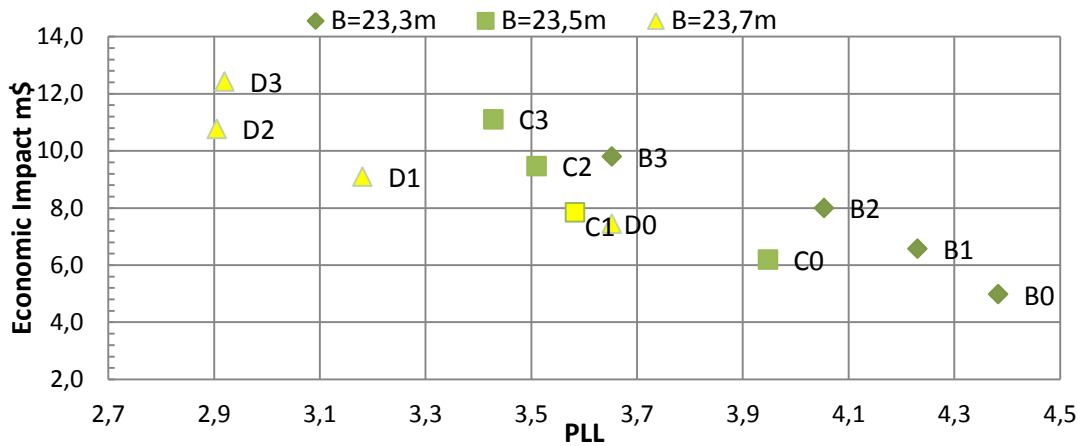
Εξετάζοντας συνολικά τα μοντέλα, παρατηρούμε ότι καθώς το πλάτος αυξάνεται οδηγούμαστε σε χαμηλότερους δείκτες GCAF και PLL (σχήμα 4.13). Αντίθετα το Economic Impact αυξάνεται κατά τη θετική μεταβολή είτε του πλάτους είτε του ύψους (σχήμα 4.14). Τα μοντέλα που έχουν μικρή διαφορά πλάτους σε σχέση με το πλοίο αναφοράς και ως εκ τούτου μικρό ΔPLL δίνουν μεγάλο GCAF, παρά το γεγονός ότι η αύξηση στο κόστος κατασκευής ή/και λειτουργίας τους είναι μικρή. Καθώς όμως αυξάνεται το πλάτος των μοντέλων, παρατηρείται αύξηση του Economic Impact αρκετά μικρότερη της αύξησης του ΔPLL. Επί παραδειγματι, το μοντέλο D2 που επιτυγχάνει τον δεύτερο μικρότερο δείκτη GCAF=5,93 έχει προσαυξημένο Economic Impact παραπάνω από 200% σε σχέση με το μοντέλο B0, ενώ το ΔPLL του αυξάνεται πάνω από 500%. Αποτέλεσμα αυτού είναι η τελική μείωση του GCAF από 14,749m\$ για το B0 να μειώνεται σε 5,929m\$ για το D2.

Σημαντικό επίσης είναι να αναφερθεί ότι το μοντέλο D2 που έχει θεαματικά υψηλό δείκτη υποδιαίρεσης μετά από βλάβη, έχει το τρίτο μεγαλύτερο Economic Impact και όχι το πρώτο. Σε σύγκριση μάλιστα με το D3 που διαφέρουν μόνο κατά 0.2 μέτρα καθ' ύψος, παρουσιάζει καλύτερη ευστάθεια ενώ ταυτόχρονα η κατασκευή του κοστίζει \$1 εκατομμύριο λιγότερο. Σε περίπτωση λοιπόν που θα επιλέγαμε να κατασκευάσουμε το μοντέλο D2 για να μειώσουμε την πιθανότητα απώλειας ζωής σε 2,9 ανθρώπους και να εξασφαλίσουμε δείκτη $A=0,88618$, θα έπρεπε να ξοδέψουμε 10,76m\$.

Στα σχήματα 4.14 και 4.15, έχουν τονιστεί με κίτρινο τα μοντέλα που ικανοποιούν το κριτήριο του GCAF. Από το πρώτο σχήμα, γίνεται ξεκάθαρο πως η αύξηση του δείκτη A, τείνει προς ακριβότερες σχεδιάσεις.

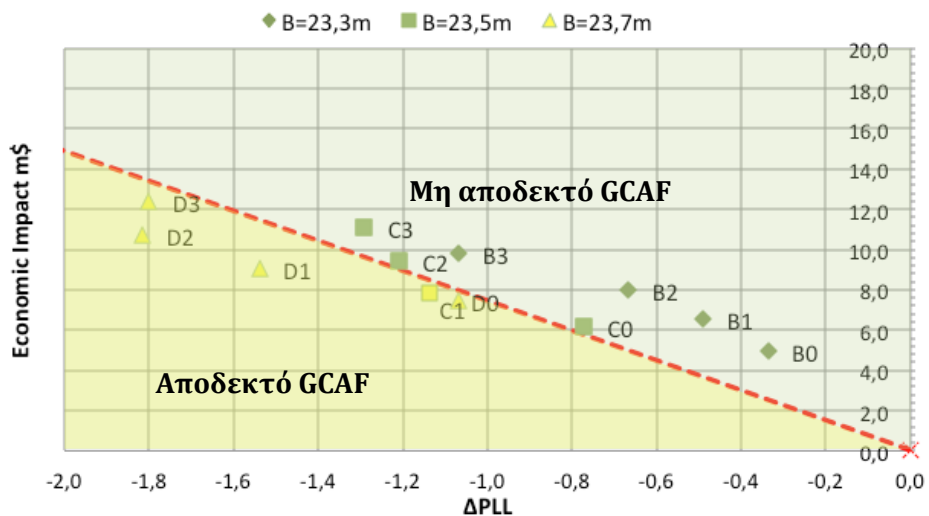


Σχήμα 4.14. Σύγκριση Economic Impact συναρτήσει του ASOLAS για τις νέες σχεδιάσεις.



Σχήμα 4.15. Σύγκριση Economic Impact συναρτήσει του PLL για τις νέες σχεδιάσεις.

Στο σχήμα 4.16 που ακολουθεί είναι εμφανής η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή που αντιστοιχεί στο όριο $GCAF = Econ.IM. / \Delta PLL = 7,45m\$$ και χωρίζει το πεδίο των λύσεων σε αποδεκτές (αριστερά) και μη αποδεκτές (δεξιά).



Σχήμα 4.16. Σύγκριση Economic Impact συναρτήσει του ΔPLL για τις νέες σχεδιάσεις.

4.6 Τελικά συμπεράσματα

Βασιζόμενοι στη μελέτη που προηγήθηκε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια καταλήγουμε στα συμπεράσματα που συνοψίζονται στη συνέχεια.

Οι δύο εναλλακτικές μέθοδοι υπολογισμού του δείκτη υποδιαίρεσης A (SLF 55 και GOALDS) παρατηρήθηκε ότι οδηγούν σε αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της SOLAS 2009. Η SLF55 είναι η αυστηρότερη εκ των τριών μεθόδων, ειδικά σε περιπτώσεις χαμηλού δείκτη A, με μέγιστη απόκλιση από τη SOLAS 2009 $\delta A = -0,00743$. Η μέθοδος GOALDS παρουσίασε ακόμη μικρότερη απόκλιση από τη SOLAS σε σύγκριση με την SLF55, με μέγιστη διαφορά $\delta A = -0,0050$. Επίσης, η GOALDS φαίνεται πως ευνοεί τα πλοία με υψηλό κοίλο.

Όσο αφορά το δείκτη υποδιαίρεσης A σε συνάρτηση με το κόστος κατασκευής και λειτουργίας ενός πλοίου, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το αυξημένο κόστος δεν συνεπάγεται και καλύτερη ευστάθεια και το αντίστροφο. Είναι δυνατόν συνεπώς να δημιουργήσουμε σχεδιάσεις σημαντικά πιο ασφαλείς και οικονομικά βιώσιμες ταυτόχρονα.

Σύμφωνα λοιπόν με τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, η απάντηση στο ερώτημα που τέθηκε στην αρχή της παρούσας διπλωματικής, για το εάν είναι δυνατό να οριστεί αυστηρότερο πλαίσιο κανονισμών από το υπάρχων για τα επιβατηγά πλοία, είναι θετική. Είναι θεμιτό αλλά και δυνατό, στο μέλλον να σχεδιάσουμε επιβατηγά πλοία με πολύ μικρή πιθανότητα να βυθιστούν ή να ανατραπούν.

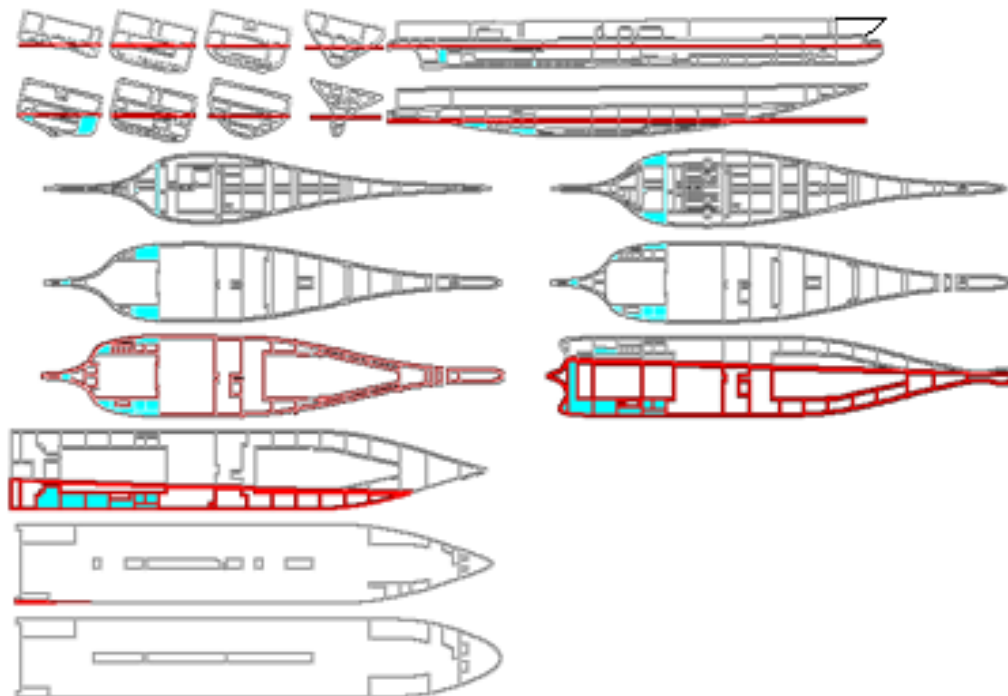
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΩΝ CROSS FLOODING PIPES ΣΤΟ ΔΕΙΚΤΗ A-INDEX ΤΗΣ SOLAS 2009

5.1 Περιγραφή λειτουργίας cross-flooding pipe

Ορισμένες πιθανές βλάβες που μπορεί να υποστεί ένα πλοίο Ro-Pax κατακλύζουν διαμερίσματα που βρίσκονται μόνο από τη μια μεριά του πλοίου (port/starboard). Εξαιτίας της ασύμμετρης κατάκλυσης, το πλοίο παίρνει μεγάλες εγκάρσιες κλίση και κινδυνεύει η επιβίωση του παρά το γεγονός ότι ο όγκος που έχει κατακλυστεί είναι μικρός.

Προς αποφυγή των μεγάλων γωνιών εγκάρσιας κλίσης του πλοίου ύστερα από βλάβες τέτοιου είδους, τοποθετούνται cross-flooding pipes (CFP) τα οποία συνδέουν συμμετρικά ως προς τη center line διαμερίσματα. Η σύνδεση των διαμερισμάτων μέσω των CFP επιτρέπει την κατάκλυση των διαμερισμάτων που βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά από το ρήγμα με απώτερο σκοπό τη μείωση της εγκάρσιας κλίσης του πλοίου εξαιτίας της κατάκλυσης και την αποτροπή της ανατροπής του.

Η διαδικασία της κατάκλυσης των διαμερισμάτων μέχρι την τελική εξισορρόπηση του πλοίου χωρίζεται σε ενδιάμεσα στάδια. Ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η διαδικασία υπολογίζεται αυτόματα για την εκάστοτε βλάβη από το σχεδιαστικό πακέτο NAPA. Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα υπολογισμού του χρόνου εξισορρόπησης ύστερα από τη βλάβη DP/SDSS3-7.2.1-5 όπου ενεργούν ταυτόχρονα δύο CFP (#4 & #5) και στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η γενική διάταξη του στο τελικό στάδιο.



Σχήμα 5.1. Κατάσταση βλάβης DP/SDSS3-7.2.1-5 για το A2 (stage cross).

EQUALIZATION TIME OF CASE DP/SDSS3-7.2.1-5

Calculation of the equalization time acc. to the Res. MSC.245(83)
of the damage case SDSS3-7.2.1-5 in the initial condition DP (GM=1.949 m).

Time through arrangement PI5

The compartments A212VOIDS and A212VOIDP are connected by the cross-flooding arrangement PI5 having the following characteristics:

Inlet in the room	A212VOIDS	at x=17.4, y=-6.91, z=4.25
Outlet in the room	A212VOIDP	at x=17.4, y=6.91, z=4.25
Diameter of the pipe	0.293 m	
Cross-section area (S)	0.067 m ²	
Length of the pipe	13.82 m	
Pipe friction 0.02*1/D	0.94	
Sum of other k's	1.45	
Reduction factor (F)	0.65	

The underlying items are calculated for the complete cross-flooding.

	Before equalization	After equalization
	-----	-----
Pressure at head 1 (kPa)	35.0	34.5
Pressure at head 2 (kPa)	0.0	1.4
Floodwater in A212VOIDS (m ³)	158.2	156.8
Floodwater in A212VOIDP (m ³)	0.0	21.7
Heeling angle (deg)	-14.5	-13.8
Trim (m)	-1.01	-1.06
Draught (m)	5.49	5.52
Freeboard to margin line (m)	-0.80	-0.68

Volume of water entering in the equalizing compartments	W = 21.7 m ³
Head of water in the beginning of the considered period	H = 0.02 m
Final head of water after cross-flooding	hf= 0 m
Cross-flooding time	T = 1826 s

Time through arrangement PI4

The compartments A212VOIDS and A212VOIDP are connected by the cross-flooding arrangement PI4 having the following characteristics:

Inlet in the room	A212VOIDS	at x=17, y=-6.91, z=4.25
Outlet in the room	A212VOIDP	at x=17, y=6.91, z=4.25
Diameter of the pipe	0.293 m	
Cross-section area (S)	0.067 m ²	
Length of the pipe	13.82 m	
Pipe friction 0.02*1/D	0.94	
Sum of other k's	1.45	
Reduction factor (F)	0.65	

The underlying items are calculated for the complete cross-flooding.

	Before equalization	After equalization
	-----	-----
Pressure at head 1 (kPa)	35.0	34.5
Pressure at head 2 (kPa)	0.0	1.5
Floodwater in A212VOIDS (m ³)	158.2	156.8
Floodwater in A212VOIDP (m ³)	0.0	21.7
Heeling angle (deg)	-14.5	-13.8

Trim (m)	-1.01	-1.06
Draught (m)	5.49	5.52
Freeboard to margin line (m)	-0.80	-0.68

Volume of water entering in the equalizing compartments	W = 21.7 m ³
Head of water in the beginning of the considered period	H = 0.02 m
Final head of water after cross-flooding	hf= 0 m
Cross-flooding time	T = 1667 s

Total cross-flooding time from A212VOIDS to A212VOIDP through 2 arrangements

PI5 and PI4:

$$TIME = 1/(1/1826s+1/1667s) = 871 \text{ s}$$

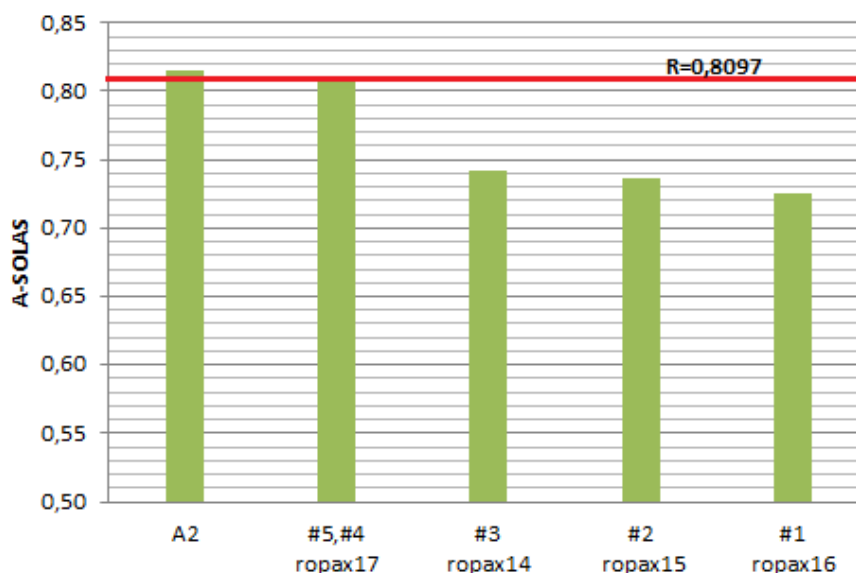
5.2 Εφαρμογή πιθανοθεωρητικού μοντέλου SOLAS 2009 και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το πλοίο αναφοράς είναι εξοπλισμένο με πέντε CFPs, η θέση και οι διαστάσεις των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.4 και στο σχήμα Α.1 του παραστήματος. Εκ των 2.472 καταστάσεων βλάβης, οι 1.165 =(47%) συσχετίζονται με έστω ένα CFP, γεγονός που τονίζει την αξία της ύπαρξης τους στο πλοίο αναφοράς. Για να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο συνεισφέρουν στην επιβιωσιμότητα του πλοίου ύστερα από βλάβη, σχεδιάστηκαν 7 επιπλέον μοντέλα ίδιων κυρίων διαστάσεων με το πλοίο αναφοράς αλλά με διαφορετικό αριθμό CFPs. Σε όλα τα μοντέλα εφαρμόστηκε η μέθοδος SOLAS 2009 με μόνη διαφορά από το πλοίο αναφοράς, τον πίνακα ορισμού των ανοιγμάτων του πλοίου μέσω του οποίου ορίζονται και τα μη υδατοστεγή ανοιγμάτα που συνδέουν διαμερίσματα μεταξύ τους. Στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου στο σύνολο των μοντέλων.

Πίνακας 5.1. Δείκτης υποδιαίρεσης Α SOLAS 2009 μοντέλων με διαφορετικό αριθμό CFP's.

RCO	Without CFP	A SOLAS 2009	ΔΑ [A _{A2} -A _{ropaxi}]	ΔΑ% [(A _{A2} -A _{ropaxi})*100/A _{A2}]
A2	-	0,8151	-	
ropax14	#3	0,7419	-0,0732	-9
ropax15	#2	0,7361	-0,0791	-9,7
ropax16	#1	0,7259	-0,0892	-10,9
ropax17	#5,#4	0,8094	-0,0057	-0,7
ropax18	#5,#4,#3	0,7362	-0,0789	-9,7
ropax19	#5,#4,#3,#2	0,6964	-0,1187	-14,6
ropax20	no CFPs	0,6482	-0,1669	-20,5

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 5.1 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι σε περίπτωση αφαίρεσης οποιουδήποτε CFP από το πλοίο αναφοράς ο δείκτης A μειώνεται αισθητά. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση αφαίρεσης έστω ενός CFP, το πλοίο δεν επιτυγχάνει δείκτη A μεγαλύτερο του απαιτούμενου δείκτη R (σχήμα 5.2).



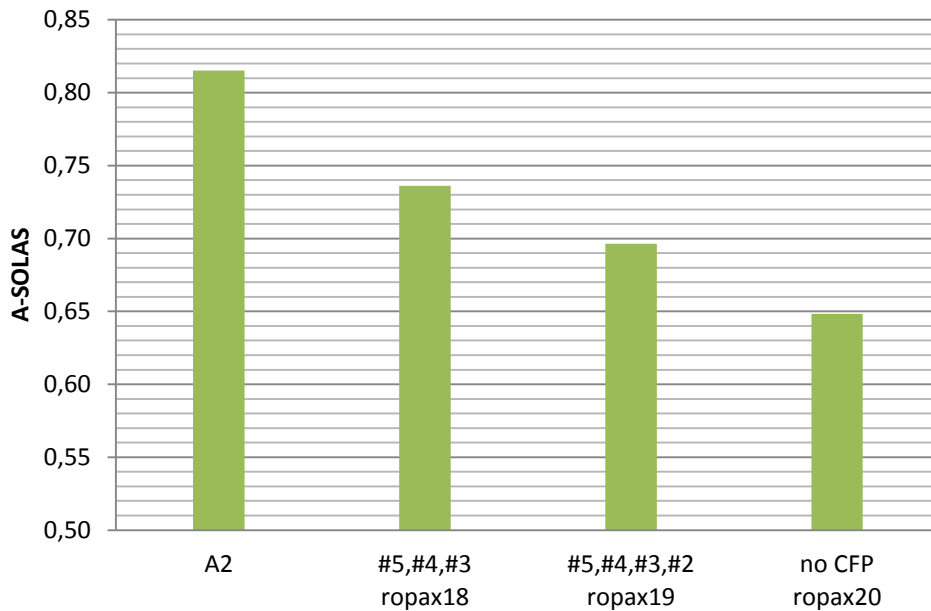
Σχήμα 5.2. Δείκτης ASOLAS μοντέλων τέσσερα CFP.

Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνοντας μεταξύ τους τα μοντέλα τα οποία έχουν ένα λιγότερο CFP από το A2 (ropax14,15,16,17) παρουσιάζουν όλα μείωση του δείκτη A με μέγιστη εκείνη του μοντέλου ropax16 $\delta A = -0,0892$. Η συνεισφορά μάλιστα του CFP 1 αντιστοιχεί στο 11% του δείκτη A. Το ropax17 έχει συμπεριληφθεί στην παραπάνω σύγκριση επειδή τα CFP #4 και #5 συνδέουν τα ίδια διαμερίσματα και τα θεωρούμε ως ένα CFP. Όσο αφορά όμως το μοντέλο ropax17 εμφανίζει πολύ μικρή διαφορά σε σχέση με το A2 $\delta A = -0,0057$. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από τα στοιχεία του πίνακα 5.2 και ειδικότερα από τη διαφορά στην τιμή του μέσου όρου της διαφοράς των S, καθώς παρουσιάζει έντονη διαφορά μεταξύ του ropax17 και των υπολοίπων.

Πίνακας 5.2. Σύγκριση του πλοίου αναφοράς A2 με τα μοντέλα που έχουν λιγότερα των CFP.

	A2ξ ropax17	A2ξ ropax14	A2ξ ropax15	A2ξ ropax16
Without CFP	4&5	3	2	1
Zone	Z5	Z16	Z17	Z18
Αριθμός βλαβών εξαρτώμενες από το αντίστοιχο CFP	529	468	450	391
Αριθμός βλαβών με διαφορετικό s	253	277	271	193
Μέσος όρος της διαφοράς δs	0,152	0,881	0,901	0,928
Αριθμός βλαβών όπου ($S_{A2} > 0$ & $S_{ropaxi} = 0$)	10	277	271	192
$\delta A [A_{A2} - A_{ropaxi}]$	0,006	0,073	0,079	0,089
$\delta A\% [(A_{A2} - A_{ropaxi}) * 100 / A_{A2}]$	0,7	9	9,7	10,9

Σημαντική μείωση του δείκτη A παρατηρείται όπως είναι αναμενόμενο και στα μοντέλα όπου έχουν αφαιρεθεί περισσότερα του ενός CFP (σχήμα 5.2). Όσο περισσότερα CFPs αφαιρούνται από τον εξοπλισμό του πλοίου τόσο μικρότερος είναι και ο επιτευχθείς δείκτης υποδιαίρεσης A. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου ropax20 που δεν έχει καθόλου CFP, βλέπουμε ότι η συνολική συνεισφορά των πέντε CFPs στο δείκτη A αντιστοιχεί στο πολύ υψηλό ποσοστό 20,5%.



Σχήμα 5.2. Δείκτης ASOLAS μοντέλων με λιγότερα των τεσσάρων CFPs.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Κωνσταντίνου Σπύρου (Οκτώβριος 2010), “Σχεδίαση πλοίων για ασφάλεια και περιβαλλοντική προστασία”, Σημειώσεις Μαθήματος.
- [2] Wendel, K. (1960), “Die Wahrscheinlichkeit des Ueberstehens von Verletzungen”, (The probability of surviving damages), Schiffstechnik, Vol. 7, No 36, pp. 47-61.
- [3] (IMO Resolutions A.265), ‘Regulation on subdivision and stability of passenger ships as an equivalent to part B of chapter II of the 1960 SOLAS Convention’, IMO. The publication contains IMO Resolutions A.265 (VIII), A.266 (VIII) and explanatory notes
- [4] HARDER (1999-2003), "Harmonization of Rules and Design Rationale", Project funded by the European Community, Contract No G3RD-CT-1999-00028.
- [5] SLF47/3/3 IMO (2004), “Sample ship recalculation results”, Report of the Intersessional Corresponding Group (Part 2B) submitted by Sweden and the United States.
- [6] Lloyd’s Register- Fairplay, (1999-2010). World casualty statistics. London, U.K. Lloyd’s Register -Fairplay Ltd.
- [7] GOALDS, “Goal-based Damage Stability”, Project funded by the European Commission, FP7-DG Research, Grant Agreement 233876, (2009-2012).

