

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΑΠΑΖΟΓΛΟΥ ΟΛΥΜΠΙΑ**

**ΕΞΑΜΗΝΟ 10<sup>0</sup>**

**‘ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΥΝΕΚΤΙΜΩΝΤΑΣ  
ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ’**



# **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

## **2. ΧΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΧΟΥΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ**

### **2.1 Εισαγωγή**

### **2.2 Τα είδη της διάβρωσης που συναντώνται στις θαλάσσιες κατασκευές**

### **2.3 Παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό διάβρωσης και κρίσιμα σημεία διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.**

#### 2.3.1 Παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό διάβρωσης

#### 2.3.2 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου

##### 2.3.2.1 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης σε tankers

##### 2.3.2.2 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης σε bulk carriers

##### 2.3.2.3 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης για όλους τους τύπους πλοίων

##### 2.3.2.4 Είδη διάβρωσης που εμφανίζονται στις κρίσιμες περιοχές

##### 2.3.2.5 Κατηγοριοποίηση των κρίσιμων σημείων για την εφαρμογή των μοντέλων διάβρωσης

### **2.4 Χρονικά εξαρτώμενα πιθανοθεωρητικά μοντέλα διάβρωσης**

#### **2.4.1 Μοντέλα για γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση**

##### 2.4.1.1 Μοντέλο των Paik & Thayamballi ( 2003)

##### 2.4.1.2 Μοντέλο των Guedes Soares & Garbatov

##### 2.4.1.3 Μοντέλο των Qin & Cui

##### 2.4.1.4 Μοντέλο του Melchers

##### 2.4.1.5 Μοντέλο των Southwell et al.

##### 2.4.1.6 Εφαρμογή των μοντέλων με χρήση δεδομένων από μετρήσεις και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

## **2.4.2 Μοντέλα για διάβρωση με βελονισμούς**

2.4.2.1 Μοντέλο του Melchers για διάβρωση με βελονισμούς

2.4.2.2 Μοντέλο των Yamamoto and Ikegami για διάβρωση με βελονισμούς

## **3.ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΧΟΥΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ**

### **3.1 Εισαγωγή**

### **3.2 Απαιτήσεις για τη συλλογή δεδομένων διάβρωσης**

### **3.3 Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης**

### **3.4 Στατιστική ανάλυση δεδομένων για την εύρεση της συσχέτισης του χρόνου και της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης.**

3.4.1 Στατιστική ανάλυση με βάση τα δεδομένα της Lloyd's register

3.4.2 Στατιστική ανάλυση με βάση τα δεδομένα του Paik και των Yamamoto and Ikegami

## **4.ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ**

### **4.1 Εισαγωγή**

### **4.2 Η ιεράρχηση των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου και η αντοχή τους**

4.2.1 Η ιεράρχηση των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου

4.2.2 Η αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου

4.2.2.1 Η αντοχή των ελασμάτων

4.2.2.1.1 Λυγισμός ελάσματος υπό μονοαξονική φόρτιση

### **4.3 Μοντέλα αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων σε λυγισμό.**

4.3.1. Μοντέλο του Faulkner για την αντοχή των ελασμάτων σε λυγισμό

4.3.2. Μοντέλο των Ivanov και Rousev για την αντοχή των ελασμάτων σε λυγισμό

4.3.2. Μοντέλο του Carlsen για την αντοχή των ελασμάτων σε λυγισμό

#### **4.4 Πιθανοθεωρητική εκτίμηση του περιθωρίου αντοχής μέσης τομής του πλοίου**

##### 4.4.1 Εφαρμογή του μοντέλου περιθωρίου αντοχή σε bulk carrier 68000 t DWT

###### 4.4.1.1 Η πιθανοθεωρητική μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo

4.4.1.2 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του ελάσματος του καταστρώματος ανά ηλικία σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους.

4.4.1.3 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός του  $SM_{DECK}$  της μέσης τομής του πλοίου ανά ηλικία σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους.

4.4.1.4 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός του περιθωρίου αντοχής  $g(t)$  του πλοίου ανά ηλικία σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους.

4.4.1.5 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του ελάσματος του καταστρώματος, του  $SM_{DECK}$  της μέσης τομής και του περιθωρίου αντοχής  $g(t)$ , σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους που προέκυψε χρησιμοποιώντας το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων.

4.4.2 Υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του καταστρώματος  $\sigma_u$ , του  $SM_{DECK}$  και του περιθωρίου αντοχής  $g(t)$ , ανά έτος σύμφωνα με τις απώλειες πάχους που προβλέπονται από την εφαρμογή μοντέλου διάβρωσης.

4.4.3 Υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του καταστρώματος  $\sigma_u$ , του  $SM_{DECK}$  και του περιθωρίου αντοχής  $g(t)$ , αφαιρώντας από όλα τα ελάσματα την προσθήκη  $t_c$  λόγω διάβρωσης.

4.4.4 Σύγκριση των τιμών των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  που υπολογίστηκαν πιθανοθεωρητικά με αυτές που υπολογίστηκαν με τη χρήση του μοντέλου διάβρωσης Qin & Cui και με αυτές που υπολογίστηκαν με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης από τα ελάσματα

4.4.5 Σύγκεντρικοί πίνακες των τιμών των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  που υπολογίστηκαν για όλα τα έτη πιθανοθεωρητικά, με τη χρήση μοντέλου διάβρωσης καθώς και με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης σύμφωνα με IACS CSR

## **5.ΕΠΙΛΟΓΟΣ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το θαλάσσιο περιβάλλον είναι εξαιρετικά διαβρωτικό για τον χάλυβα ο οποίος αποτελεί το βασικό υλικό κατασκευής των τμημάτων της γάστρας ενός πλοίου. Σύμφωνα με έρευνες το 90% των αστοχιών στα πλοία αποδίδεται στη διάβρωση περιλαμβανομένου και τη διάβρωση από μηχανική καταπόνηση. Ειδικότερα για τα tankers και τα bulk carriers ένας μεγάλος αριθμός από βυθίσεις και περιβαλλοντικές καταστροφές αποδίδεται στην κακή συντήρηση και στην εκτεταμένη διάβρωση της γάστρας [1].

Η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης αντιμετωπίζεται σαν ένα τυχαίο φαινόμενο το οποίο επηρεάζει τις διαστάσεις των ελασμάτων και ενισχυτικών του πλοίου. Ο ρυθμός όμως διάβρωσης των κατασκευαστικών αυτών στοιχείων δεν μπορεί να προβλεφθεί με κάποια θεωρητική μέθοδο διότι επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες των οποίων η επίδραση στο ρυθμό διάβρωσης δεν μπορεί να προβλεφθεί. Για τον λόγο αυτόν αναπτύχθηκαν μοντέλα τα οποία αξιοποιούν τις μετρήσεις απώλειας πάχους που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων για να προβλέψουν των απώλεια πάχους των κατασκευαστικών στοιχείων στα επόμενα χρόνια.

Εκτός από τη χρήση των μοντέλων διάβρωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πιθανοθεωρητικές μέθοδοι οι οποίες αξιοποιούν τα ίδια δεδομένα από μετρήσεις επιθεωρήσεων όπως είναι η μέθοδος Monte Carlo η οποία και χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Η εκτίμηση της απώλειας πάχους των κατασκευαστικών στοιχείων με το χρόνο είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι καθιστά δυνατή την εκτίμηση της αντοχής του πλοίου τόσο σε τοπικό όσο και σε ολικό επίπεδο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε σε πρώτη φάση η περιγραφή, εφαρμογή και σύγκριση των μοντέλων διάβρωσης που έχουν αναπτυχθεί, τόσο των εμπειρικών όσο και αυτών που αξιοποιούν δεδομένα από μετρήσεις απώλειας πάχους. Στη συνέχεια ακολούθησε στατιστική ανάλυση των δεδομένων αυτών για να διαπιστωθεί η συσχέτισή της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης με το χρόνο ώστε η εφαρμογή τους στα μοντέλα διάβρωσης να έχει νόημα. Τέλος ακολούθησε η εκτίμηση της αντοχής της μέσης τομής σε συνάρτηση με το χρόνο, ενός πλοίου bulk carrier με τρεις τρόπους: πιθανοθεωρητικά, με την αξιοποίηση μοντέλου διάβρωσης και με τον κανονισμό του IACS που υπολογίζει τις τιμές του πάχους των ελασμάτων της μέσης τομής χωρίς τις προσθήκες για τη διάβρωση.

## **2. ΧΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΧΟΥΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Τα χαρακτηριστικά της διάβρωσης στην κατασκευή ενός πλοίου επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες όπως το είδος της προστατευτικής επίστρωσης, το είδος του φορτίου, η θερμοκρασία, η υγρασία κλπ. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνονται εκτιμήσεις του βάθους της διάβρωσης για τα διάφορα κατασκευαστικά μέρη τα οποία ομαδοποιούνται ανάλογα με το είδος και τη θέση τους στους διαφορετικούς τύπους πλοίων και φορτίων.

Τα κυριότερα μέσα που χρησιμοποιούνται για προστασία από τη διάβρωση είναι τα προστατευτικά επιστρώματα και η καθοδική προστασία. Παρόλο που αυτά τα μέσα θεωρούνται επαρκή, οι διαδικασίες συντήρησης δεν είναι πάντα αποτελεσματικές, ειδικά για πλοία μεγάλης ηλικίας όπου τα μέσα προστασίας μπορεί να έχουν διαλυθεί ή να είναι αναποτελεσματικά. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί πιθανοθεωρητικά μοντέλα διάβρωσης που εκτιμούν την αξιοπιστία της κατασκευής με το χρόνο. Ένα καθαρά θεωρητικό μοντέλο για την πιθανή απώλεια υλικού που θα βασίζεται στον πραγματικό μηχανισμό της διάβρωσης, είναι εξαιρετικά δύσκολο να αναπτυχθεί, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος. Και αυτό γιατί τον ρυθμό διάβρωσης επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες μεταξύ των οποίων είναι και τα μέσα προστασίας, καθώς και διάφορες λειτουργικές παράμετροι. Επίσης ο ρυθμός διάβρωσης επηρεάζεται από τον ρυθμό οξείδωσης του μετάλλου από το οξυγόνο τον πρώτο καιρό έκθεσης της κατασκευής στο διαβρωτικό περιβάλλον, καθώς και από τον ρυθμό του μεταβολισμού των αναερόβιων βακτηρίων μετά από μακροχρόνια έκθεση της κατασκευής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες αποτελούν τυχαίες μεταβλητές με παραμέτρους που μεταβάλλονται με το χρόνο. Γι' αυτό το λόγο τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις. Εξαιτίας των διαφορών στο μέγεθος και την ποιότητα των βάσεων δεδομένων έχουν αναπτυχθεί μοντέλα διάβρωσης που διαφέρουν μεταξύ τους [2].

## 2.2 Τα είδη της διάβρωσης που συναντώνται στις θαλάσσιες κατασκευές

Τα είδη αυτά είναι η ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση (general corrosion), η διάβρωση με βελονισμούς (pitting corrosion), η βακτηριακή διάβρωση (bacterial corrosion), η διάβρωση λόγω του μετάλλου συγκόλλησης (weld metal corrosion), η διάβρωση με αυλακώσεις (grooving corrosion) και η διάβρωση από μηχανική καταπόνηση [3].

Στην ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση στην επιφάνεια του μετάλλου δημιουργείται ένα ομοιόμορφο στρώμα περίπου σταθερού πάχους που αποτελεί προϊόν διάβρωσης ή παρατηρείται ομοιόμορφη διάλυση της επιφάνειας. Η φύση του στρώματος του προϊόντος διάβρωσης υπαγορεύει και το ρυθμό διάβρωσης. Αν το στρώμα είναι συνεχές και αδιαπέραστο, δεν αποσπάται όταν το μέταλλο εφελκύεται και ξαναδημιουργείται όταν για κάποιο λόγο προκληθεί κάποιο γδάρισμα, τότε το στρώμα αυτό συμβάλλει στην προστασία κατά της διάβρωσης. Η διάρκεια του προστατευτικού στρώματος εξαρτάται άμεσα από την παρουσία του οξυγόνου στο νερό. Έλλειψη οξυγόνου οδηγεί σε διάβρωση με βελονισμούς. Η διαβρωτική ικανότητα του θαλασσινού νερού στους χάλυβες αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας, της περιεκτικότητας σε οξυγόνο, της ταχύτητας του νερού, της περιεκτικότητας σε διαβρωτικά στοιχεία και της αγωγιμότητας.

Η διάβρωση με βελονισμούς είναι ο τοπικός σχηματισμός προϊόντος διάβρωσης ή η εκλεκτική τοπική διάλυση της επιφάνειας σε βάθος. Όταν για κάποιο λόγο για παράδειγμα έλλειψη οξυγόνου, διασπασθεί η ομοιογένεια του προστατευτικού οξειδίου, οι μικρές επιφάνειες που εμφανίζονται η ανωμαλία γίνονται άνοδοι ηλεκτρολυτικού κελιού, ενώ η υπόλοιπη επιφάνεια δρα ως κάθοδος. Αποτέλεσμα της δημιουργίας του ηλεκτρολυτικού κελιού είναι η ταχεία γαλβανική διάβρωση. Είναι αρκετές οι αιτίες που μπορούν να οδηγήσουν γαλβανικά στοιχεία σε διάβρωση με βελονισμούς, όπως η διαφορά συγκέντρωσης οξυγόνου, θερμοκρασίας, ταχύτητας ροής και γενικότερα κάθε διαφορά στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η διάβρωση με βελονισμούς συχνά επιταχύνεται με την ύπαρξη στάσιμων νερών χαμηλών σε περιεκτικότητα οξυγόνου.

Η βακτηριακή διάβρωση καλείται επίσης μικροβιολογική ή αναεροβική διάβρωση και εμφανίζεται στις περιπτώσεις όπου τοπικά περιβάλλοντα και συνθήκες ευνοούν την ανάπτυξη και κυριαρχία βακτηριακής δραστηριότητας. Τέτοιες συνθήκες είναι

- Στάσιμα νερά
- Παρουσία βακτηρίων που τρέφονται με υδρογονάνθρακες οι οποίοι προέρχονται από το αργό πετρέλαιο από προστατευτικές επιστρώσεις ή μαλακές βαφές.
- Ιδανικές θερμοκρασίες για την ανάπτυξη βακτηρίων

Η βακτηριακή διάβρωση εμφανίζεται με τη μορφή βελονισμών ή ραβδώσεων και η πιθανότητα εμφάνισης της αυξάνεται για δεξαμενές έρματος γεμάτες με μολυσμένο νερό για πολύ καιρό.

Η **διάβρωση λόγω του μετάλλου συγκόλλησης** εμφανίζεται στις συγκολλήσεις ή στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες. Η πιο πιθανή αιτία της είναι η γαλβανική δράση μεταξύ του μετάλλου συγκόλλησης (άνοδος) και του βασικού μετάλλου( κάθοδος), η οποία μπορεί αρχικά να οδηγήσει σε διάβρωση με βελονισμούς.

Η **διάβρωση με αυλακώσεις** είναι μια τοπική , γραμμική διάβρωση η οποία εμφανίζεται στα σημεία σύνδεσης μεταξύ δύο εξαρτημάτων όπου το νερό ρέει ή συγκεντρώνεται. Στις θερμικά επηρεαζόμενες ζώνες εμφανίζονται αυλακώσεις και επειδή ο ρυθμός της διάβρωσης αυτού του τύπου είναι υψηλότερος δημιουργείται το φαινόμενο του 'λαιμού'.

Η **διάβρωση με μηχανική καταπόνηση** αποτελεί συνδυασμό διάβρωσης και των εναλλαγών της φόρτισης στο συγκεκριμένο τμήμα της κατασκευής. Προκύπτει συνήθως σε συνδυασμό με παραμορφώσεις και ταλαντώσεις που δημιουργούνται όταν χρησιμοποιείται στην κατασκευή χάλυβας υψηλής αντοχής ,λόγω των μειωμένων διαστάσεων του υλικού που χρησιμοποιείται στην κατασκευή( του χάλυβα).

Εκτός από την ομοιόμορφη διάβρωση όλα τα υπόλοιπα είδη ανήκουν σε μια κατηγορία διάβρωσης την **τοπική διάβρωση**. Μοντέλα διάβρωσης έχουν αναπτυχθεί για τα κυριότερα δύο είδη διάβρωσης την ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση και τη διάβρωση με βελονισμούς. Για τα υπόλοιπα είδη υπάρχουν ελάχιστα μοντέλα καθώς μπορούν για την περιγραφή τους να χρησιμοποιηθούν τα μοντέλα για τη διάβρωση με βελονισμούς. Γι αυτό το λόγο παρακάτω θα ασχοληθούμε με τα μοντέλα για γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση και διάβρωση με βελονισμούς[3].



## 2.3 Παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό διάβρωσης και κρίσιμα σημεία διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

### 2.3.1 Παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό διάβρωσης

Ανάλογα με τη λειτουργία και τη θέση ενός στοιχείου της κατασκευής του πλοίου η προδιάθεση για διάβρωση αλλά και ο ρυθμός διάβρωσης διαφέρουν. Ακόμα και σε παρόμοια κατασκευαστικά στοιχεία στο ίδιο πλοίο ή και σε διαφορετικά πλοία παρατηρούνται αυτές οι διαφορές. Αυτό συμβαίνει γιατί η διάβρωση είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών στις οποίες εμπλέκονται πολλά στοιχεία αβεβαιότητας. Οι μεταβλητές αυτές είναι:

- **Το είδος του φορτίου.** Τα φορτία διαιρούνται σε φορτία χύδην, φορτία σε μορφή τεμαχίων και υγρά φορτία. Οι δεξαμενές υγρών φορτίων εμφανίζουν τους υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται και για ερματισμό. Αυτό συμβαίνει γιατί τα υγρά φορτία περιέχουν οξέα και οξυγόνο που δημιουργούν υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης.
- **Το είδος της προστασίας που χρησιμοποιείται.** Τα συνηθέστερα είδη προστασίας από τη διάβρωση που χρησιμοποιούνται είναι τα **προστατευτικά επιστρώματα** και η **καθοδική προστασία**.  
**Τα προστατευτικά επιστρώματα** ανάλογα με το αν συντηρούνται σωστά παρέχουν και αντίστοιχη αντιδιαβρωτική προστασία. Η κατάρρευσή τους όμως μπορεί να προκαλέσει υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης. Έτσι ο ρυθμός διάβρωσης ενός κατασκευαστικού στοιχείου που φέρει προστατευτικό επίστρωμα εξαρτάται από το είδος και την ποιότητα του επιστρώματος το οποίο καθορίζει την έναρξη της διάβρωσης αλλά και αυτό με τη σειρά του έχει ρυθμούς κατάρρευσης που εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες όπως η περιοχή λειτουργίας, οι μηχανικές καταπονήσεις κτλ.  
**Η καθοδική προστασία** (θυσιαζόμενες άνοδοι) προσδίδει προστασία από τη διάβρωση στο θαλασσινό νερό γι' αυτό εφαρμόζεται μόνο σε διαμερίσματα στα οποία υπάρχουν ηλεκτρολύτες όπως οι δεξαμενές έρματος.
- **Η υγρασία.** Στο εσωτερικό ενός διαμερίσματος η αυξημένη υγρασία μπορεί να οδηγήσει σε συμπύκνωση των υδρατμών αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο τον ρυθμό της ομοιόμορφης ή γενικής διάβρωσης.
- **Η θερμοκρασία.** Γενικά η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Όπου υπάρχουν διαφορές θερμοκρασίας εμφανίζονται διαφορές δυναμικού μεταξύ της ψυχρής περιοχής, με αποτέλεσμα η ψυχρή ζώνη που είναι πιο ηλεκτροθετική να διαβρώνεται εντονότερα.

- **Οι εναλλαγές του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή των ιδιοτήτων του.**  
Συγκεκριμένα αυτό συμβαίνει όταν γίνεται εναλλασσόμενη πλήρωση δεξαμενών υγρού φορτίου με διαφορετικά είδη φορτίου ή εναλλασσόμενος ερματισμός και αφερματισμός μιας δεξαμενής προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή διαγωγή του πλοίου. Αυτές οι εναλλαγές επιταχύνουν τον ρυθμό διάβρωσης της μεταλλικής επιφάνειας.
- **Ο ερματισμός των δεξαμενών.** Όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια ερματισμού μιας δεξαμενής τόσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός διάβρωσης λόγω της έκθεσης στο θαλασσινό νερό. Επίσης όταν μια δεξαμενή είναι πλήρως ερματισμένη, η απουσία του αέρα μειώνει το ρυθμό διάβρωσης.
- **Η πλήση των δεξαμενών( αφορά μόνο τα δεξαμενόπλοια).** Όλες οι μέθοδοι πλυσίματος προκαλούν ζημιές στα προστατευτικά επιστρώματα και απομακρύνουν από τις επιφάνειες της κατασκευής τα στρώματα αργού πετρελαίου που παρέχουν αντιδιαβρωτική προστασία.
- **Οι περιοχές ναυσιπλοΐας.** Επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης λόγω της θερμοκρασίας και της διάρκειας του ταξιδιού. Συγκεκριμένα λόγω της πορείας που ακολουθείται προκαλείται επιλεκτική αύξηση της θερμοκρασίας στη μια πλευρά του πλοίου, λόγω ηλιακής ακτινοβολίας[3].

Για τις παραπάνω μεταβλητές οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, δεν υπάρχει ακριβής γνώση της επίδρασής τους στο ρυθμό διάβρωσης ούτε έχουν αναπτυχθεί θεωρητικά μαθηματικά μοντέλα που να περιγράφουν τη σχέση τους με το ρυθμό διάβρωσης. Επίσης οι μεταβλητές αυτές αλλάζουν διαρκώς με το χρόνο και παρουσιάζουν μεγάλη πολυμορφία.

Για τους παραπάνω λόγους και επειδή οι παραπάνω μεταβλητές αποτελούν τυχαίες μεταβλητές, τα μοντέλα διάβρωσης που θα αναπτυχθούν παρακάτω χρησιμοποιούν πραγματικά δεδομένα τα οποία έχουν ληφθεί από μετρήσεις κατά τη διάρκεια επιθεωρήσεων και ποσοτικοποιούν την έκταση της διάβρωσης. Τα δεδομένα αυτά έμμεσα περιλαμβάνουν τις συνθήκες λειτουργίας των τμημάτων της κατασκευής στα οποία εμφανίζεται διάβρωση, καθώς και τη συνεισφορά όλων των παραγόντων( μεταβλητών) και την αλληλεπίδραση τους.

Για την εφαρμογή των μοντέλων διάβρωσης, από όλα τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι τα διάφορα τμήματα της κατασκευής του πλοίου θα πρέπει να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη λειτουργία τους, την περιοχή του πλοίου στην οποία βρίσκονται, τη θέση τους και τις συνθήκες του περιβάλλοντός τους και της λειτουργίας τους. Για καθεμία από αυτές τις κατηγορίες έχουν ληφθεί πραγματικές μετρήσεις και το μοντέλο διάβρωσης αναπτύσσεται ξεχωριστά για κάθε κατηγορία.

Επίσης θα πρέπει να γίνεται γνωστό σε ποιες περιοχές εμφανίζεται ομοιόμορφη διάβρωση και σε ποιες διάβρωση με βελονισμούς για να χρησιμοποιηθούν τα αντίστοιχα μοντέλα.

Για την ανάπτυξη των μοντέλων τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται δεν λαμβάνονται από όλες τις περιοχές της κατασκευής του πλοίου αλλά μόνο από τις κρίσιμες περιοχές οι οποίες αναφέρονται παρακάτω [4].

### 2.3.2 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου

Γενικά η διάβρωση των στοιχείων της κατασκευής του πλοίου εμφανίζεται όπου υπάρχει επαφή με θαλασσινό νερό όπως στις δεξαμενές έρματος στις οποίες εμφανίζεται ο υψηλότερος ρυθμός διάβρωσης. Επειδή όμως η διάβρωση όπως είδαμε επηρεάζεται και από πολλούς άλλους παράγοντες εμφανίζεται και σε περιοχές που δεν είναι άμεσα εκτεθειμένες στο θαλασσινό νερό, όπως οι χώροι φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα οριζόντια στοιχεία της κατασκευής του πλοίου υπόκεινται περισσότερο στη διαδικασία της διάβρωσης, λόγω του ότι παγιδεύουν νερό και έτσι διευκολύνουν την ανάπτυξη βελονισμών.

Παρακάτω θα αναφερθούν οι κρίσιμες περιοχές διάβρωσης για δύο τύπους πλοίων δηλ για tankers και bulk carriers και το είδος της διάβρωσης που εμφανίζεται στις περιοχές αυτές. Παρακάτω τα μοντέλα διάβρωσης που θα αναπτυχθούν χρησιμοποιούν δεδομένα μόνο από τους δύο αυτούς τύπους πλοίων[3].

#### 2.3.2.1 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης σε tankers [3]

Σε αυτόν τον τύπο πλοίου οι μεγαλύτεροι ρυθμοί διάβρωσης εμφανίζονται στις Wing Ballast Tanks εξαιτίας της έκθεσης στο θαλασσινό νερό, της υψηλής θερμοκρασίας λόγω της έκθεσης καταστρώματος και πλευρών στον ήλιο και της υγρής ατμόσφαιρας όταν είναι άδειες. Επίσης υψηλούς ρυθμούς διάβρωσης εμφανίζει και ο πυθμένας στους χώρους φορτίου εξαιτίας του όξινου νερού από το πετρέλαιο.

Οι κρίσιμες περιοχές διάβρωσης στα tankers είναι

- Η άνω περιοχή εγκάρσιων και διαμήκων φρακτών
- Η άνω περιοχή εγκάρσιων νομέων καταστρώματος
- Τα διαμήκη ενισχυτικά καταστρώματος
- Η άνω επιφάνεια οριζόντιων ενισχυτικών και μπρακέτων
- Οι εγκοπές και οπές μείωσης βάρους σε οριζόντιες σταθμίδες
- Η άνω επιφάνεια οριζόντιων σταθμίδων
- Η επιφάνεια πελμάτων διαμήκων ενισχυτικών πυθμένα

### 2.3.2.2 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης σε bulk carriers [3]

Σε αυτόν τον τύπο πλοίου το ανώτερο κατάστρωμα και τα πλευρικά ελάσματα εμφανίζουν υψηλότερο ρυθμό διάβρωσης από τα ελάσματα του πυθμένα και των φρακτών. Επίσης οι νομείς και τα διαμήκη ενισχυτικά στα αμπάρια που εφάπτονται στο πρυμναίο τμήμα του καταστρώματος και στα ελάσματα των πλευρών εμφανίζουν σημαντικά υψηλό ρυθμό διάβρωσης.

Οι κρίσιμες περιοχές διάβρωσης στα bulk carriers είναι

- Τα ενισχυτικά κεκλιμένου ελάσματος άνω πλευρικής δεξαμενής
- Ο κορμός νομέων στις άνω πλευρικές δεξαμενές
- Τα διαμήκη ενισχυτικά καταστρώματος
- Οι οπές αποστράγγισης και οι εγκοπές στους νομείς
- Οι συγκολλήσεις κατά συμβολή σε κορμούς νομέων
- Η ένωση σταυρωτών συνδέσμων με νομείς
- Το έλασμα φρακτής στα άνω άκρα διπυθμένων
- Οι νομείς, ιδιαίτερα στο κατώτερο και ανώτερο μέρος και στην απόληξη της βάσης του μπρακέτου στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη
- Το 40% του ύψους των αμπαριών και των φρακτών γιατί αποτελεί το σύνηθες ύψος του φορτίου.

### 2.3.2.3 Κρίσιμες περιοχές διάβρωσης για όλους τους τύπους πλοίων

- Στους εγκάρσιους νομείς επικεντρωνόμαστε στα ακόλουθα σημεία
  - Στα άκρα και τις οριζόντιες επιφάνειες των μπρακέτων
  - Στα σημεία σύνδεσης των τμημάτων της κατασκευής
  - Στη σύνδεση των διαμήκων ενισχυτικών

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται στα όρια μεταξύ των δεξαμενών έρματος και των δεξαμενών φορτίου επειδή το θαλάσσιο έρμα σε συνδυασμό με τις υψηλές φορτίσεις που αναπτύσσονται σε αυτήν την περιοχή οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης.

- Στον πυθμένα οι περισσότερο κρίσιμες περιοχές είναι
  - Στα πέλατα των μπρακέτων κατά μήκος του δοκαριού της κεντρικής γραμμής(center line girder)
  - Στα ελάσματα του πυθμένα όπου η διάβρωση με βελονισμούς αποτελεί σοβαρό πρόβλημα
  - Στις συγκολλήσεις των πρωραίων άκρων των δεξαμενών όπου η διάβρωση με αυλακώσεις αποτελεί σοβαρό πρόβλημα

- Στα ελάσματα του πυθμένα που βρίσκονται κάτω από τα σημεία αναρρόφησης όταν γίνεται η εκφόρτωση , τα οποία εκτίθενται σε διάβρωση με βελονισμό και σε διάβρωση με αυλακώσεις
- Στις εγκάρσιες φρακτές επικεντρωνόμαστε σε
  - Στις συνδέσεις με το κατάστρωμα όπου το γενικά λεπτό έλασμα της φρακτής είναι εκτεθειμένο στη διάβρωση
  - Στα άκρα μεταξύ των συνδέσεων των μπρακέτων και των stringers
  - Στα ανοίγματα των stringers όπου η διάβρωση με αυλακώσεις είναι συνηθισμένο πρόβλημα
- Στις διαμήκεις φρακτές επικεντρωνόμαστε σε
  - Στα διαμήκη ενισχυτικά στη διάβρωση με την εμφάνιση του φαινομένου του λαιμού
- Στην Fore peak δεξαμενή οι κρίσιμες περιοχές είναι
  - Το άνω τμήμα τις δεξαμενής και οι οριζόντιες επιφάνειες γενικά
  - Οι εγκάρσιοι νομείς
  - Η πρωραία φρακτή σύγκρουσης και συγκεκριμένα τα άνω τμηματά της και τα stringers
- Στην After peak δεξαμενή επικεντρωνόμαστε σε
  - Στην πυρμναία φρακτή λόγω της θερμότητας του υγρού στις δεξαμενές καυσίμων
- Οι κρίσιμες περιοχές στις πλευρές του πλοίου είναι
  - Στα διαμήκη ενισχυτικά στις συνδέσεις μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών του πλευρικού ελάσματος και των εγκάρσιων φρακτών
  - Στις διαμήκεις συνδέσεις μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών του πλευρικού ελάσματος και των εγκάρσιων νομέων [5]

#### 2.3.2.4 Είδη διάβρωσης που εμφανίζονται στις κρίσιμες περιοχές

Οι κρίσιμες περιοχές στις οποίες αναφερθήκαμε παραπάνω εμφανίζουν διάφορα είδη διάβρωσης ανάλογα με την περιοχή του πλοίου στην οποία βρίσκονται, τη λειτουργία τους, τη θέση τους στο χώρο και τις συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθενται. Έτσι

- Η διάβρωση με βελονισμούς είναι τοπική και εμφανίζεται στα ελάσματα του πυθμένα στις δεξαμενές έρματος και στις δεξαμενές φορτίου ,σε οριζόντιες επιφάνειες όπως τα πέλματα των διαμήκων ενισχυτικών του πυθμένα και σε στοιχεία της κατασκευής που παγιδεύουν νερό όπως το πρυμναίο μέρος του πυθμένα των δεξαμενών. Επίσης εμφανίζεται στις προστατευμένες δεξαμενές έρματος όπου προκαλεί βαθιές και μικρές σε διάμετρο οπές, στους κορμούς των νομέων όπου εμφανίζονται βελονισμοί μεγάλου βάθους ειδικότερα εάν τα πέλματα των ενισχυτικών επεκτείνονται πέρα των κορμών. Ο τύπος αυτός διάβρωσης παρουσιάζεται σε όλα τα τμήματα των νομέων που είναι σε επαφή με μπρακέτα ή με το πλευρικό περίβλημα.
- Η ομοιόμορφη ή γενική διάβρωση εμφανίζεται στις μη προστατευμένες εσωτερικές επιφάνειες των δεξαμενών ειδικά σε περιοχές που υπάρχουν ανοίγματα, σε κορμούς νομέων και σε διαμήκη ενισχυτικά του πυθμένα. Το πρόβλημα είναι εντονότερο στις ανώτερες περιοχές των δεξαμενών. Ιδιαίτερα εκτιθέμενα στοιχεία σε αυτόν τον τύπο διάβρωσης είναι τα οριζόντια ενισχυτικά οι δοκοί και οι γωνίες, οι διαμήκεις φρακτές, τα ανώτερα τμήματα του κορμού του νομέα κοντά σε διαμήκεις φρακτές , οι οριζόντιες αντηρίδες στήριξης των ενισχυμένων νομέων, τα ελάσματα εγκαρσίων φρακτών και τα ελάσματα του ανώτατου καταστρώματος [6].

Τα δύο αυτά είδη διάβρωσης εμφανίζονται κυρίως στις κρίσιμες περιοχές και γι ' αυτό το λόγο τα μοντέλα που θα αναπτυχθούν παρακάτω αναφέρονται μόνο σε αυτές.

### 2.3.2.5 Κατηγοριοποίηση των κρίσιμων περιοχών για την εφαρμογή των μοντέλων διάβρωσης

Όπως είδαμε , σε προηγούμενη ενότητα τα διάφορα τμήματα της κατασκευής του πλοίου ομαδοποιούνται ανάλογα με τη λειτουργία τους, την περιοχή του πλοίου στην οποία βρίσκονται , τη θέση τους στο χώρο και τις συνθήκες του περιβάλλοντός τους και της λειτουργίας τους. Και αυτό γιατί τόσο οι ρυθμοί διάβρωσης όσο και ο τύπος της διάβρωσης που θα εμφανιστεί εξαρτώνται από αυτούς τους παράγοντες τη μεταβολή τους και τον τρόπο αλληλεπίδρασης τους. Αυτή η ομαδοποίηση γίνεται ώστε να λαμβάνονται μετρήσεις από περιοχές που παρουσιάζουν παρόμοια διαβρωτική συμπεριφορά ώστε οι μετρήσεις αυτές να χρησιμοποιούνται σε μοντέλα διάβρωσης και με αυτόν τον τρόπο να προβλέπεται η εξέλιξη της διάβρωσης για κάθε ομάδα.

Σε αυτές τις ομάδες χρησιμοποιούνται συμβολισμοί που αντιπροσωπεύουν το διαβρωτικό περιβάλλον στο οποίο εκτίθενται, τη θέση τους στο χώρο και τη λειτουργία τους. Έτσι έχουμε

**A = air ( αέρας)**

**B= ballast water( έρμα)**

**COT= cargo oil tank (δεξαμενή πετρελαίου)**

**F= flange ( φλάντζα)**

**H= horizontal member( οριζόντιο τμήμα)**

**O= oil( πετρέλαιο)**

**S= seawater( θαλασσινό νερό)**

**V = vertical member(κάθετο τμήμα)**

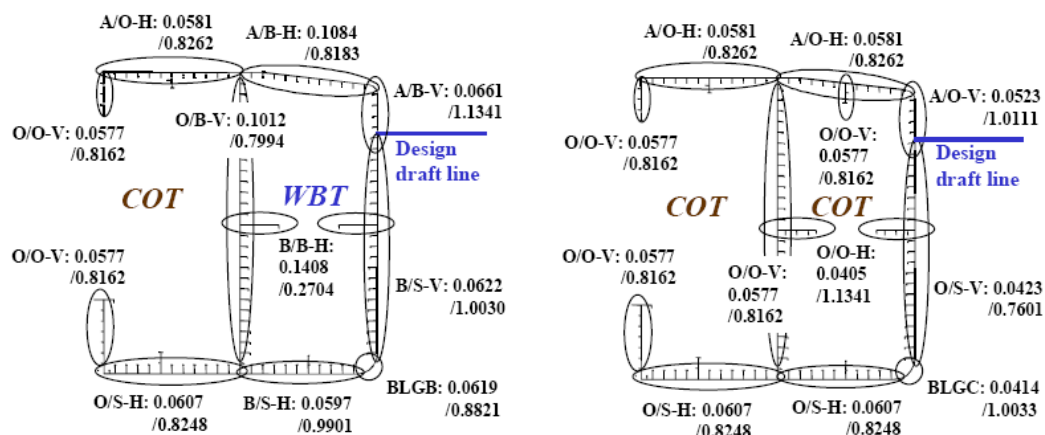
**W= web (νομέας)**

**WBT= water ballast tank ( δεξαμενή έρματος) [4]**

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο τύπος και ο συμβολισμός κάθε ομάδας για ένα tanker μονού τοιχώματος

ID	Member type
B/S-H	Bottom Shell Plating (Segregated Ballast Tank)
A/B-H	Deck Plating (Segregated Ballast Tank)
A/B-V	Side Shell Plating above draft line (Segregated Ballast Tank)
B/S-V	Side Shell Plating below draft line (Segregated Ballast Tank)
BLGB	Bilge Plating (Segregated Ballast Tank)
O/B-V	Longitudinal Bulkhead Plating (Segregated Ballast Tank)
B/B-H	Stringer Plating (Segregated Ballast Tank)
O/S-H	Bottom Shell Plating (Cargo Oil Tank)
A/O-H	Deck Plating (Cargo Oil Tank)
A/O-V	Side Shell Plating above draft line (Cargo Oil Tank)
O/S-V	Side Shell Plating below draft line (Cargo Oil Tank)
BLGC	Bilge Plating (Cargo Oil Tank)
O/O-V	Longitudinal Bulkhead Plating (Cargo Oil Tank)
O/O-H	Stringer Plating (Cargo Oil Tank)

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τέτοιες ομάδες στοιχείων της κατασκευής ενός tanker μονού τοιχώματος. Δίπλα στον συμβολισμό κάθε ομάδας αναγράφεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του ρυθμού διάβρωσης.



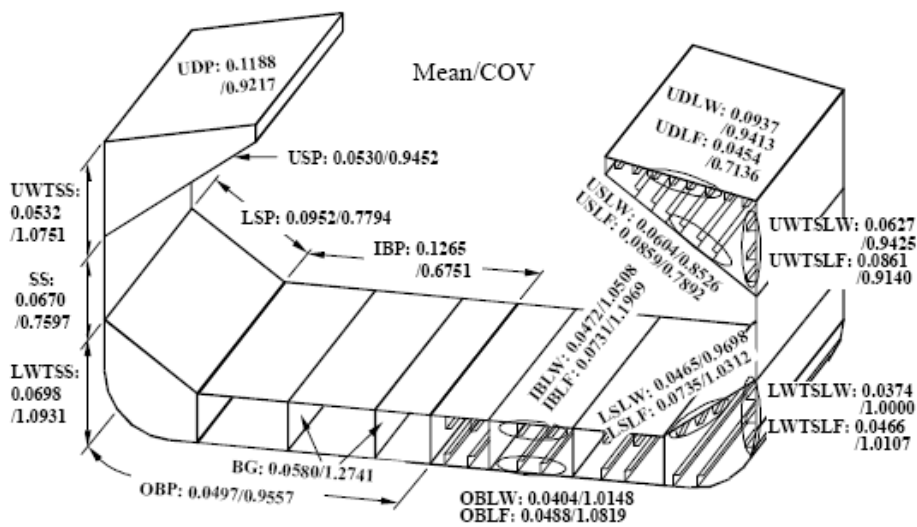




Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο τύπος και ο συμβολισμός κάθε ομάδας για ένα bulk carrier

ID	Member type
OBP	Outer bottom plates
IBP	Inner bottom plates
LSP	Lower sloping plates
LWTSS	Lower wing tank side shells
SS	Side shells
UWTSS	Upper wing tank side shells
USP	Upper sloping plates
UDP	Upper deck plates
BG	Bilge girders
OBLW	Outer bottom longitudinals – web
OBLF	Outer bottom longitudinals – flange
IBLW	Inner bottom longitudinals – web
IBLF	Inner bottom longitudinals – flange
UWTSLW	Upper wing tank side longitudinals – web
UWTSLF	Upper wing tank side longitudinals – flange
USLW	Upper sloping longitudinals – web
USLF	Upper sloping longitudinals – flange
UDLW	Upper deck longitudinals – web
UDLF	Upper deck longitudinals – flange
LWTSLW	Lower wing tank side longitudinals – web
LWTSLF	Lower wing tank side longitudinals – flange
LSLW	Lower sloping longitudinals – web
LSLF	Lower sloping longitudinals – flange

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τέτοιες ομάδες στοιχείων της κατασκευής ενός bulk carrier. Τα κατασκευαστικά στοιχεία του bulk carrier έχουν ομαδοποιηθεί σε 23 ομάδες από τις οποίες ελήφθησαν δεδομένα( πραγματικές μετρήσεις). Δίπλα στον συμβολισμό κάθε ομάδας αναγράφεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του ρυθμού διάβρωσης.



Σημειώνεται ότι η κατηγοριοποίηση και οι συμβολισμοί των διαφόρων ομάδων αναπτύχθηκαν από τον ABS σε συνεργασία με το Pusan National University στα πλαίσια έρευνας που πραγματοποίησαν πάνω στο θέμα της αξιοπιστίας σε σχέση με το χρόνο, των θαλάσσιων κατασκευών[4].

#### 2.4 Χρονικά εξαρτώμενα πιθανοθεωρητικά μοντέλα διάβρωσης

Όπως είδαμε παραπάνω τα μοντέλα που θα αναπτυχθούν αφορούν δύο τύπους διάβρωσης: την ομοιόμορφη διάβρωση και τη διάβρωση με βελονισμούς.

Όταν ένα κατασκευαστικό στοιχείο υφίσταται ομοιόμορφη διάβρωση η διάρκεια ζωής του ορίζεται ως ο χρόνος προτού το πάχος του λάβει μια ελάχιστη κρίσιμη τιμή. Γι' αυτό το λόγο για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής του, η γνώση του μέσου ρυθμού διάβρωσης ανά έτος είναι επαρκής, επομένως τα μοντέλα για ομοιόμορφη διάβρωση αφορούν την εκτίμηση της μέσης απώλειας πάχους σε σχέση με το χρόνο. Εάν για την εκτίμηση αυτή χρησιμοποιούνται πραγματικά δεδομένα από μετρήσεις απώλειας πάχους, για τον προσδιορισμό του μέσου ρυθμού διάβρωσης καθώς και για άλλες παραμέτρους που εμφανίζονται σε κάθε μοντέλο, χρησιμοποιείται η κατανομή των δεδομένων.

Από την άλλη μεριά, για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής ενός κατασκευαστικού στοιχείου που υφίσταται διάβρωση με βελονισμούς, η προσέγγιση των ακραίων τιμών του μέγιστου βάθους των κοιλοτήτων που σχηματίζονται και του ελάχιστου χρόνου έναρξης της δημιουργίας κοιλοτήτων είναι αρκετά για την περιγραφή των αντίστοιχων μοντέλων. Και αυτό γιατί η διάρκεια ζωής του κατασκευαστικού στοιχείου θεωρείται ότι τελειώνει όταν η ταχύτερα εξελισσόμενες κοιλοότητες προκαλούν την πρώτη διάτρηση. Για τους παραπάνω λόγους, για την περιγραφή των μοντέλων διάβρωσης με βελονισμούς χρησιμοποιείται η κατανομή των ακραίων τιμών των πραγματικών δεδομένων από μετρήσεις[4].

Τα παραπάνω δίνονται συνοπτικά στον πίνακα:

Τύπος διάβρωσης	Παράγοντας καθορισμού της διάρκειας ζωής		Τύπος κατανομής δεδομένων
Ομοιόμορφη(γενική) διάβρωση	Μέσος ρυθμός διάβρωσης	Μέση τιμή	Κατανομή του συνόλου των τιμών των δεδομένων
Διάβρωση με βελονισμούς	Ελάχιστος χρόνος έναρξης δημιουργίας βελονισμών	Ακραία τιμή	Κατανομή των ακραίων τιμών

Για να γίνουν κατανοητά τα παραπάνω υποθέτουμε, για παράδειγμα ότι έχουμε έναν πίνακα στον οποίο είναι καταγεγραμμένα οι ηλικίες πλοίων και οι μετρούμενες απώλειες πάχους που αντιστοιχούν σε κάθε ηλικία καθώς και η συχνότητα εμφάνισης ανά ηλικία, της κάθε μετρούμενης απώλειας πάχους. Για την χρήση των μετρούμενων απωλειών πάχους σε κάποιο μοντέλο διάβρωσης με σκοπό τον υπολογισμό κάποιων παραμέτρων του, στην περίπτωση που έχουμε ομοιόμορφη διάβρωση χρησιμοποιούνται στη στατιστική ανάλυση που πραγματοποιείται(μέση τιμή, τυπική απόκλιση κατανομής) όλες οι μετρήσεις απώλειας πάχους που αντιστοιχούν σε κάθε ηλικία μαζί με τις συχνότητες εμφάνισής τους. Στην περίπτωση όμως που έχουμε διάβρωση με βελονισμούς, σε αντίστοιχο πίνακα που αναφέρεται σε μετρήσεις βάθους βελονισμών, για την πραγματοποίηση της στατιστικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται οι ακραίες τιμές με τις αντίστοιχες κατανομές τους. Οι ακραίες αυτές τιμές πρέπει να αποτελούν ένα συγκεκριμένο ποσοστό μεταξύ του συνόλου των τιμών των μετρήσεων ανά ηλικία.

Για παράδειγμα για κάθε ηλικία από το σύνολο όλων των μετρήσεων να λαμβάνεται το 5% των μετρήσεων το οποίο να αντιστοιχεί στις ακραίες τιμές ανά ηλικία.

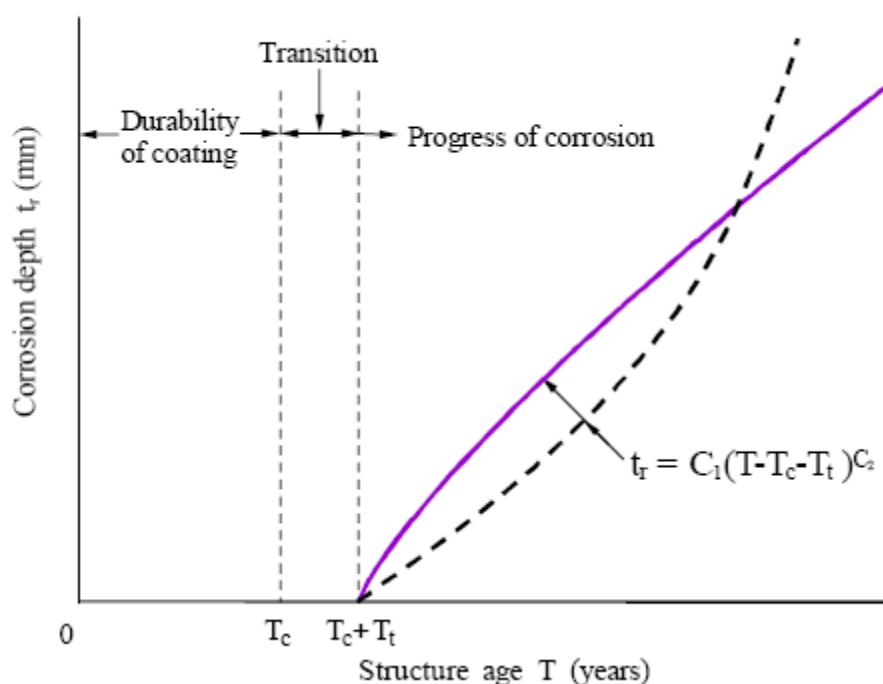
## 2.4.1 Μοντέλα για γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση

### 2.4.1.1 Μοντέλο των Paik & Thayamballi ( 2003)

Το μοντέλο αυτό αφορά μια περιοχή της μεταλλικής κατασκευής που φέρει προστατευτικό επιστρώμα. Η διαβρωτική συμπεριφορά σε αυτό το μοντέλο κατηγοριοποιείται σε τρεις φάσεις που αφορούν

- Τη διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος
- Τη μετάβαση στην ορατή διάβρωση
- Την εξέλιξη της διάβρωσης

Παρακάτω φαίνεται σχηματικά το προτεινόμενο μοντέλο διάβρωσης για τις θαλάσσιες κατασκευές όπου δίνεται η αύξηση του βάθους της διάβρωσης δηλ η απώλεια πάχους σε σχέση με το χρόνο.



Όπου  $t_r = C_1(T - T_c - T_t)^{C_2}$

Όπου  $t_r$  το βάθος της διάβρωσης

$T_c$  η διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος

$T_t$  η μεταβατική περίοδος μεταξύ της διάρκειας ζωής του προστατευτικού επιστρώματος και της έναρξης της διάβρωσης.

Τ η ηλικία της κατασκευής

$C_1, C_2$  συντελεστές που λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της εξέλιξης της διάβρωσης και οι τιμές τους λαμβάνονται από στατιστικά στοιχεία μετρήσεων από βάσεις δεδομένων.

Στο σχήμα βλέπουμε ότι η καμπύλη εξέλιξης της διάβρωσης είναι κυρτή αλλά σε μερικές περιπτώσεις είναι κοίλη (διακεκομμένη γραμμή). Η κυρτή καμπύλη δείχνει ότι ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται αρχικά αλλά μετά μειώνεται όσο εξελίσσεται η διάβρωση. Αυτός ο τύπος διάβρωσης είναι συνηθισμένος σε στατικές συνθήκες στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτό συμβαίνει γιατί το διαβρωμένο υλικό μένει στην επιφάνεια του μετάλλου προστατεύοντάς το από επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον και έτσι η διαδικασία της διάβρωσης σταματάει. Από την άλλη μεριά η κοίλη καμπύλη αντιπροσωπεύει την περίπτωση όπου ο ρυθμός διάβρωσης αυξάνεται όσο εξελίσσεται η διάβρωση. Αυτός ο τύπος διάβρωσης προκύπτει σε μεταβαλλόμενες καταστάσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον όπως η δυναμική φόρτιση στις θαλάσσιες κατασκευές. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατασκευαστική ευκαμψία λόγω της δυναμικής φόρτισης εκθέτει συνεχόμενα την καινούρια επιφάνεια του μετάλλου μετά την αφαίρεση του διαβρωμένου υλικού, στο διαβρωτικό περιβάλλον[4],[2].

Η διάρκεια ζωής  $T_c$  του προστατευτικού επιστρώματος εξαρτάται από το είδος του επιστρώματος, τις λεπτομέρειες της εφαρμογής του (προετοιμασία επιφάνειας, πάχος της επίστρωσης, έλεγχος της υγρασία κατά τη διάρκεια εφαρμογής του κτλ) καθώς και τη σχετική συντήρηση. Παρόλο που αποτελεί τυχαία μεταβλητή στην πραγματικότητα αντιμετωπίζεται σαν μια σταθερή παράμετρος. Η μεταβατική περίοδος μεταξύ διάρκειας ζωής επιστρώματος και έναρξης διάβρωσης αποτελεί μια αντιπροσωπευτικά κατανεμημένη τυχαία μεταβλητή. Όταν όμως τη θεωρήσουμε μηδενική η διάβρωση ξεκινάει αμέσως μετά τη διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος.

### Διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου διάβρωσης

Με βάση τα όσα είδαμε πιο πάνω η διαβρωτική συμπεριφορά του μετάλλου της κατασκευής μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση του χρόνου όπως φαίνεται παρακάτω

$$t_r = C_1 T_e^{C_2}$$

$$r_r = C_1 C_2 T_e^{C_2-1}$$

όπου  $t_r$  η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης σε mm,  $r_r$  ο ετήσιος ρυθμός διάβρωσης,  $T_e$  ο χρόνος έκθεσης υπό το διαβρωτικό περιβάλλον όπου λαμβάνεται ως  $T_e = T - T_c - T_t$  όπου  $T$  είναι η ηλικία του πλοίου,  $T_c$  είναι η διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος και  $T_t$  η διάρκεια της μεταβατικής περιόδου. Ο συντελεστής  $C_2$  εκφράζει την τάση εξέλιξης της διάβρωσης ενώ ο συντελεστής  $C_1$  είναι ενδεικτικός του ετήσιου ρυθμού διάβρωσης  $r_r$ . Οι τιμές και των δύο αυτών συντελεστών λαμβάνονται από στατιστικά στοιχεία μετρήσεων διάβρωσης από βάσεις δεδομένων.

Για λόγους απλοποίησης του μοντέλου και ευκολίας ανάπτυξης του θεωρούμε ότι ο χρόνος μετάβασης  $T_t = 0$  δηλ η διάβρωση ξεκινάει αμέσως αφότου χάνεται η αποτελεσματικότητα του προστατευτικού επιστρώματος και η διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος  $T_c$  παρόλο που αποτελεί τυχαία μεταβλητή λαμβάνεται σαν σταθερή παράμετρος. Οι τιμές του συντελεστή  $C_2$  κυμαίνονται από 0.3 έως 1.5. Εάν λαμβάνει τιμές μικρότερες του 1 αυτές αντιστοιχούν σε ρυθμό διάβρωσης που αυξάνεται αρχικά αλλά μετά μειώνεται όσο εξελίσσεται η διάβρωση δηλ σε τύπο διάβρωσης που είναι συνηθισμένος σε στατικές συνθήκες στο θαλάσσιο περιβάλλον. Εάν λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες του 1 αυτές αντιστοιχούν σε ρυθμό διάβρωσης που αυξάνεται όσο εξελίσσεται η διάβρωση δηλαδή σε τύπο διάβρωσης που προκύπτει σε μεταβαλλόμενες καταστάσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον όπως η δυναμική φόρτιση στις θαλάσσιες κατασκευές. Στο μοντέλο αυτό θεωρούμε την τιμή του  $C_2$  σταθερή και ίση με 1 ώστε οι τιμή αυτή να είναι αντιπροσωπευτική και για τις δύο περιπτώσεις διάβρωσης που αναφέραμε. Με αυτές τις παραδοχές οι παραπάνω εξισώσεις απλοποιούνται και γίνονται

$$t_r = C_1 (T - T_c)$$

$$r_r = C_1$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις λαμβάνεται η σχέση που μας δίνει την τιμή του συντελεστή  $C_1$

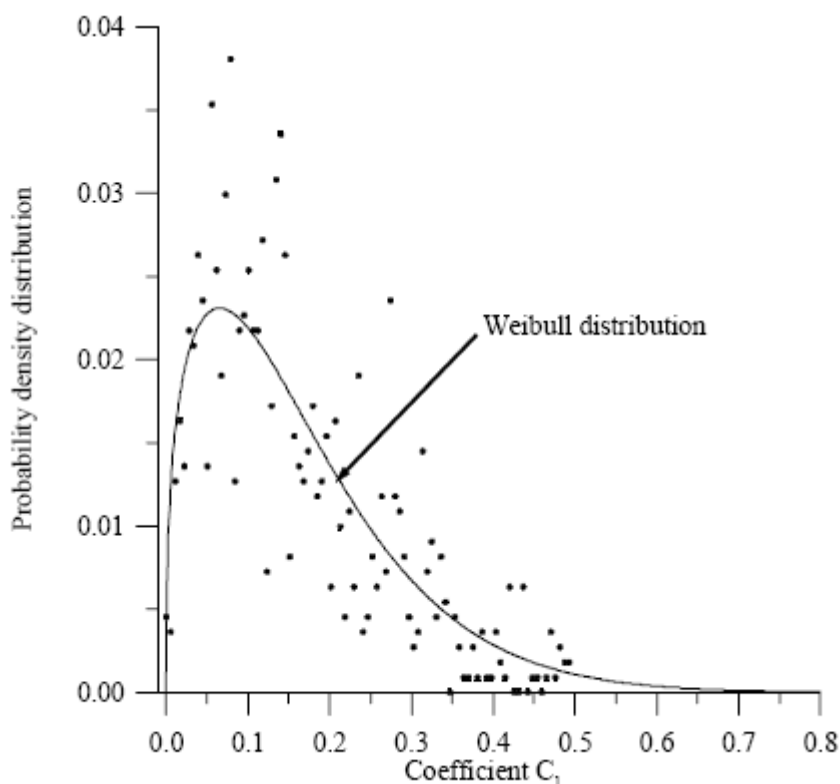
$$C_1 = \frac{t_r}{(T - T_c)}$$

Η τιμή του  $t_r$  που είναι η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης, λαμβάνεται από βάσεις δεδομένων πραγματικών μετρήσεων σε πλοία διαφόρων ηλικιών.  $T$  είναι η ηλικία του πλοίου από το οποίο πάρθηκε η μέτρηση. Έτσι γνωρίζοντας την απώλεια του πάχους και την ηλικία του κάθε πλοίου εκτιμάμε την τιμή του συντελεστή  $C_1$  για την κάθε μέτρηση. Όπως είδαμε όμως σε προηγούμενη ενότητα οι κρίσιμες περιοχές διάβρωσης που εξετάζουμε ομαδοποιούνται και για κάθε μέτρηση κάθε ομάδας η οποία αντιστοιχεί σε διαφορετικά πλοία διαφόρων ηλικιών, υπολογίζεται μια τιμή του  $C_1$ . Έτσι από στατιστική ανάλυση των μετρήσεων κάθε ομάδας λαμβάνεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του συντελεστή  $C_1$  για κάθε ομάδα.

Σημειώνεται ότι η στατιστική ανάλυση του  $C_1$  για κάθε ομάδα γίνεται για 3 διαφορετικές τιμές της διάρκειας ζωής του προστατευτικού επιστρώματος  $T_c$  δηλαδή για  $T_c = 5, 7.5$  και  $10$  χρόνια. Τα 5 χρόνια ζωής αποτελούν μη επιθυμητή διάρκεια ζωής ενώ τα 10 χρόνια είναι μια αρκετά επιθυμητή διάρκεια. Η ανάλυση όμως μπορεί να γίνει και για μόνο μια τιμή του  $T_c$  τα 7.5 χρόνια που θεωρείται αντιπροσωπευτική [7],[2].

Οι τιμές του συντελεστή  $C_1$  ακολουθούν την κατανομή Weibull γι' αυτό τα στατιστικά χαρακτηριστικά του συντελεστή  $C_1$  δηλαδή η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση καθορίζονται θεωρώντας μια συνάρτηση του Weibull.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα έχουμε στο παρακάτω διάγραμμα που δείχνει την κατανομή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας τύπου Weibull και χρησιμοποιεί δεδομένα από μετρήσεις διάβρωσης στον εξωτερικό πυθμένα bulk carriers.



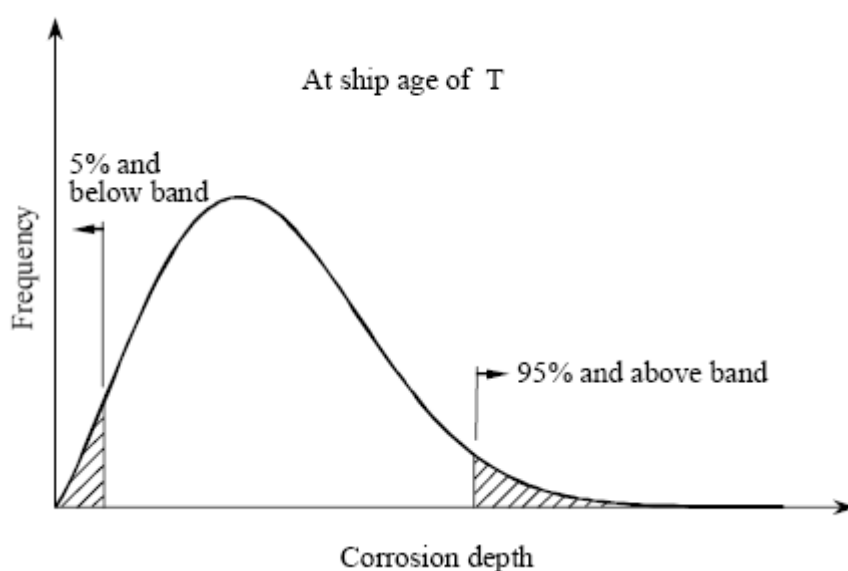


Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του συντελεστή  $C_1$  σύμφωνα με την κατανομή Weibull είναι

$$f_{C1}(x) = \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\lambda-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\lambda\right]$$

όπου  $\alpha$  και  $\lambda$  είναι παράμετροι κλίμακας και μορφής.

Επειδή τα στατιστικά δεδομένα διάβρωσης συνήθως παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά εξαιτίας πολλών μη ελεγχόμενων και μερικές φορές αγνώστων παραγόντων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να διερευνηθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ανώτερου ορίου του συντελεστή  $C_1$  δηλ χαρακτηριστικά που βασίζονται σε δεδομένα που βρίσκονται πάνω από το 95%της κατανομής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Οι τιμές του συντελεστή  $C_1$  στο ανώτερο όριο ( 95% and above band) είναι πιθανότερο να ακολουθούν την κανονική κατανομή[7],[4].

### Παράδειγμα εφαρμογής του μοντέλου διάβρωσης

Το μοντέλο εφαρμόστηκε από τους Paik και Thayamballi με βάση πραγματικά δεδομένα από μετρήσεις σε δεξαμενές έρματος πλοίων διαφόρων ηλικιών. Σημειώνεται ότι θεωρούμε τις δεξαμενές έρματος μια από τις ομάδες στις οποίες έχουμε χωρίσει την κατασκευή του πλοίου και για καθεμία από αυτές εφαρμόζεται ξεχωριστά το μοντέλο διάβρωσης.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μοντέλου, δηλαδή για τον υπολογισμό του συντελεστή  $C_1$  που αντιπροσωπεύει τον ετήσιο ρυθμό διάβρωσης. Τα δεδομένα αυτά είναι η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης σε mm για πλοία διαφόρων ηλικιών [7].

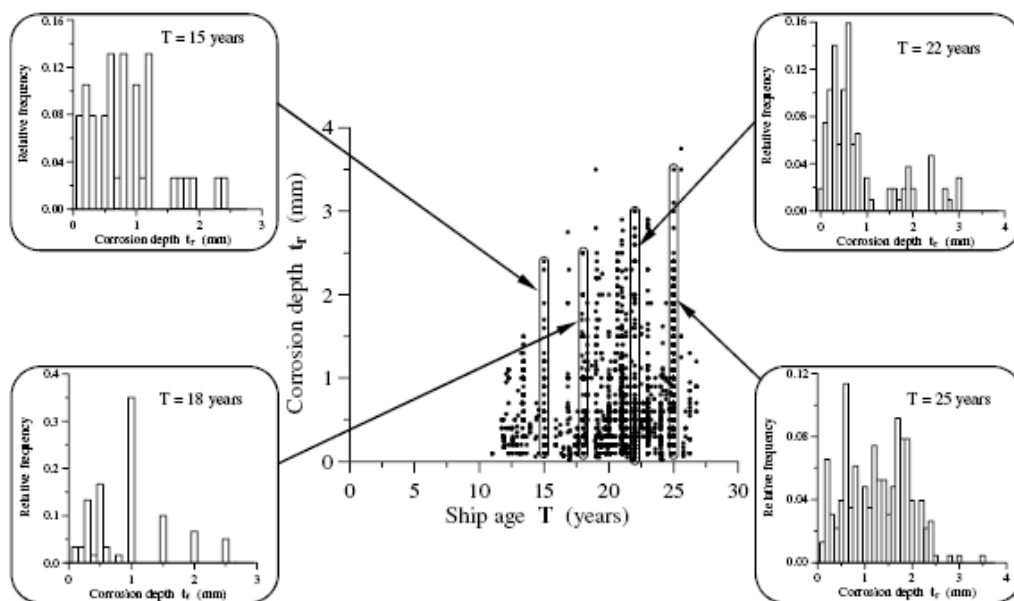
**Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις ελασμάτων σε δεξαμενές έρματος[7]**

Ηλικία (years)	Βάθος διάβρωσης(mm)							
	0~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2.0~2.5	2.5~3	3~3.5	3.5~4
11~11.5	2	0	0	0	0	0	0	0
11.5~12	18	5	0	0	0	0	0	0
12~12.5	6	3	9	0	0	0	0	0
12.5~13	23	2	0	0	0	0	0	0
13~13.5	16	28	30	2	0	0	0	0
13.5~14	9	0	0	0	0	0	0	0
14~14.5	3	3	0	0	0	0	0	0
14.5~15	1	2	0	0	0	0	0	0
15~15.5	22	13	10	3	2	0	0	0
15.5~16	9	1	0	0	0	0	0	0
16~16.5	5	0	0	0	0	0	0	0
16.5~17	12	8	5	2	1	1	0	0
17~17.5	19	1	0	0	0	0	0	0
17.5~18	84	1	2	4	0	0	0	0
18~18.5	34	26	37	9	4	3	0	0
18.5~19	1	0	2	0	0	0	0	0
19~19.5	53	11	11	8	7	2	0	1
19.5~20	84	9	1	0	2	0	0	0
20~20.5	169	48	11	3	1	0	0	0
20.5~21	10	14	11	10	16	2	0	0
21~21.5	105	115	27	24	5	6	0	0
21.5~22	9	1	1	2	2	0	0	0

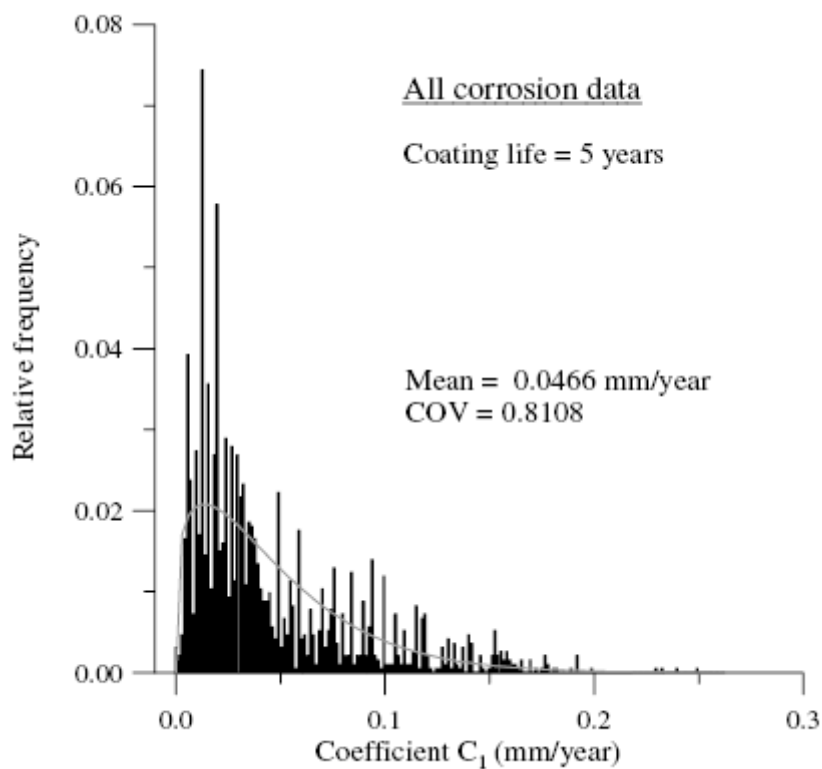
22~22.5	44	39	4	9	7	5	3	0
22.5~23	8	18	1	3	0	0	0	0
23~23.5	67	46	11	5	3	5	0	0
23.5~24	8	3	1	0	0	0	0	0
24~24.5	41	27	8	2	0	0	0	0
24.5~25	18	15	2	0	0	0	0	0
25~25.5	30	49	48	57	40	2	2	1
25.5~26	10	1	1	2	0	0	0	2
26~26.5	8	8	1	0	0	0	0	0
26.5~27	0	7	1	0	0	0	0	0

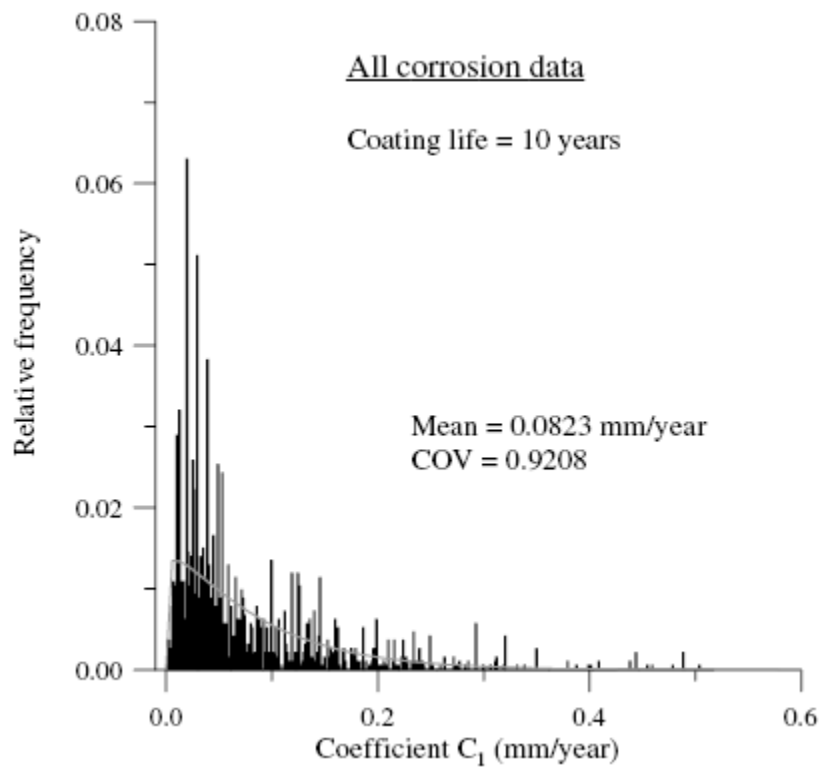
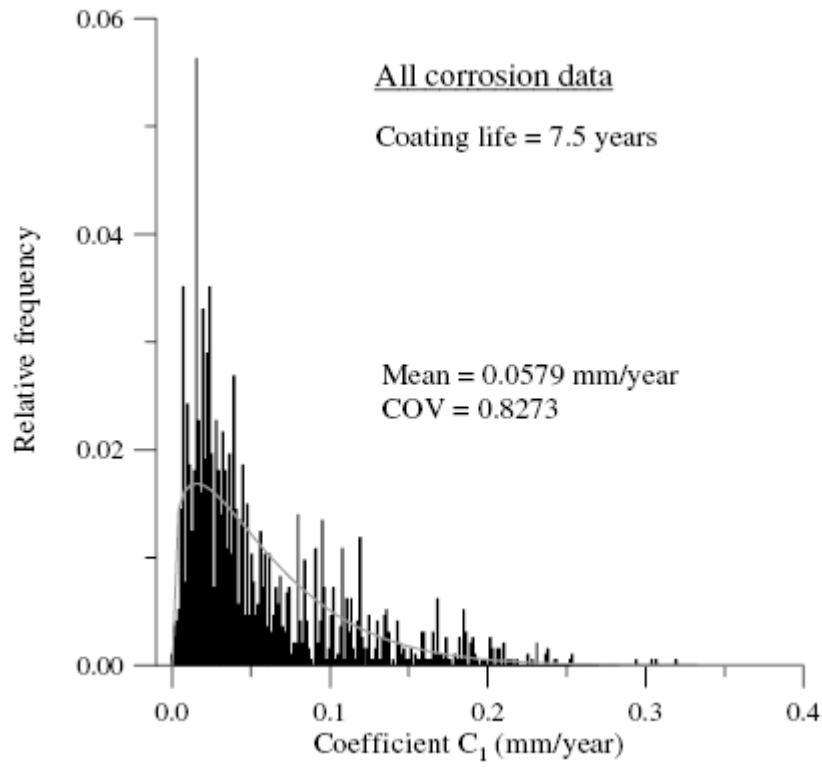
Ο πίνακας αυτός μας δίνει τα  $T$  και  $t_r$  και θεωρώντας τις σταθερές τιμές που είδαμε πιο πάνω για το  $T_c$  υπολογίζεται το  $C_1$ .

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σχετική συχνότητα της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης ανάλογα με την ηλικία του πλοίου με βάση τις πραγματικές μετρήσεις στις δεξαμενές έρματος[7].



Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η σχετική συχνότητα του συντελεστή ρυθμού διάβρωσης  $C_1$  για όλα τα πραγματικά δεδομένα διάβρωσης που βρίσκονται συγκεντρωμένα στον πίνακα , για τρεις διαφορετικές τιμές της διάρκειας ζωής του προστατευτικού επιστρώματος δηλαδή για 5, 7.5 και 10 χρόνια. Επίσης σε κάθε διάγραμμα αναγράφονται η μέση τιμή (mean) και ο συντελεστής τυπικής απόκλισης (COV) του  $C_1$ . Είναι προφανές από τα διαγράμματα ότι η σχετική συχνότητα του  $C_1$  ακολουθεί την κατανομή του Weibull [7].





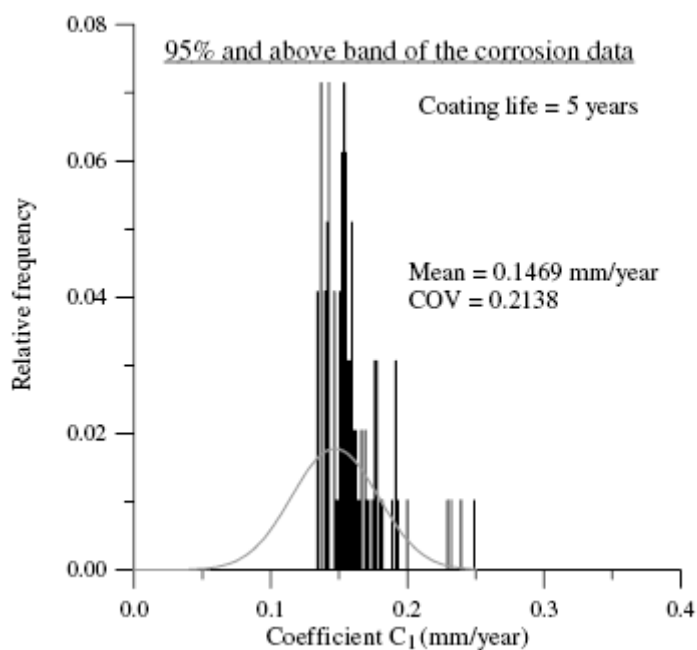
Χρησιμοποιώντας τις μέσες (mean) τιμές του  $C_1$  που φαίνονται στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να έχουμε μια εκτίμηση της μέσης απώλειας πάχους στις δεξαμενές έρματος σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις

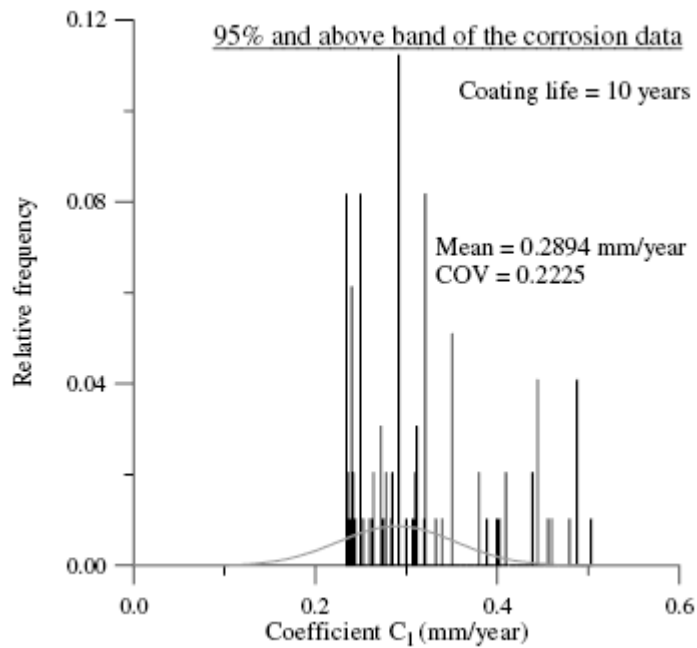
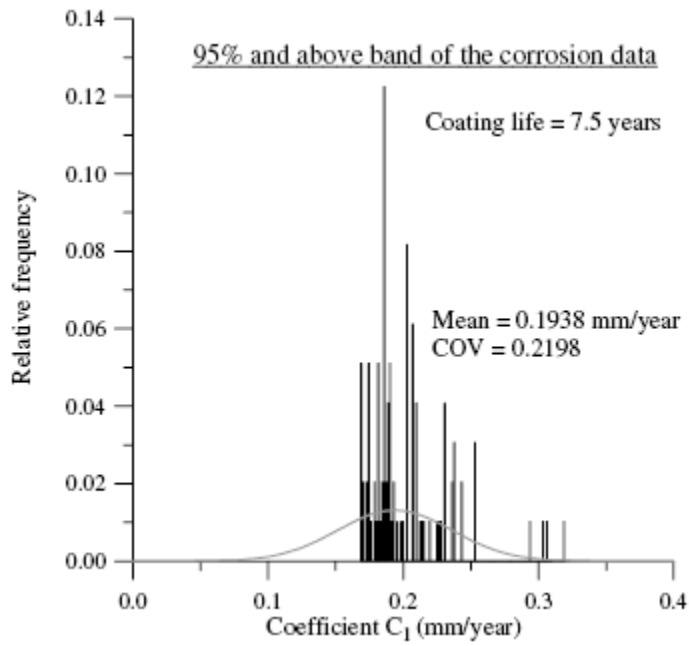
$$t_r = 0.0466(T-5) \quad \text{για } T_c = 5 \text{ χρόνια}$$

$$t_r = 0.0579(T-7.5) \quad \text{για } T_c = 7.5 \text{ χρόνια}$$

$$t_r = 0.0823(T-10) \quad \text{για } T_c = 10 \text{ χρόνια}$$

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η σχετική συχνότητα του συντελεστή  $C_1$  για τα δεδομένα διάβρωσης που βρίσκονται πάνω από το 95% της κατανομής και για διάρκειες ζωής του προστατευτικού επιστρώματος 5, 7.5 και 10 χρόνια. Το μοντέλο χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά, αντιστοιχεί στις σοβαρές περιπτώσεις διάβρωσης και ο συντελεστής  $C_1$  ακολουθεί την κανονική κατανομή. Σε κάθε διάγραμμα αναγράφονται η μέση τιμή (mean) και ο συντελεστής τυπικής απόκλισης (COV) του  $C_1$  [7].





Χρησιμοποιώντας τις μέσες (mean) τιμές του  $C_1$  που φαίνονται στα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να έχουμε μια εκτίμηση της μέσης απώλειας πάχους στις δεξαμενές έρματος σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$t_r = 0.1469(T-5) \quad \text{για } T_c = 5 \text{ χρόνια}$$

$$t_r = 0.1938(T-7.5) \quad \text{για } T_c = 7.5 \text{ χρόνια}$$

$$t_r = 0.2894(T-10) \quad \text{για } T_c = 10 \text{ χρόνια}$$



Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου αυτού συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα [7].

Δεδομένα διάβρωσης που χρησιμοποιήθηκαν	Διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος(σε χρόνια)	Μέση τιμή του $C_1$ (σε mm ανά χρόνο)	Συντελεστής τυπικής απόκλισης(COV) του $C_1$
Όλα τα δεδομένα	5	0.0466	0.8108
	7.5	0.0579	0.8273
	10	0.0823	0.9208
Πάνω από το 95% της κατανομής	5	0.1469	0.2138
	7.5	0.1938	0.2198
	10	0.2894	0.2225

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής τυπικής απόκλισης παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές όταν χρησιμοποιούνται όλα τα δεδομένα διάβρωσης. Αυτό δηλώνει ότι χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα για την εφαρμογή του μοντέλου τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά από ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση των δεδομένων που βρίσκονται πάνω από το 95% της κατανομής.

#### Συμπεράσματα από την εφαρμογή του μοντέλου διάβρωσης

- Η σχετική συχνότητα του συντελεστή  $C_1$  ακολουθεί την κατανομή Weibull όταν χρησιμοποιούνται όλα τα δεδομένα διάβρωσης, ενώ ακολουθεί την κανονική κατανομή όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα που αντιστοιχούν πάνω από το 95% της κατανομής.
- Η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης γενικά αυξάνεται με την ηλικία του πλοίου αλλά επηρεάζεται πολύ από τη διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος. Γι' αυτό το λόγο στα διαγράμματα κατανομής σχετικής συχνότητας των τιμών του  $C_1$  βλέπουμε ότι οι τιμές αυτές παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά όσο αυξάνεται η ζωή του προστατευτικού επιστρώματος. Αυτό γίνεται περισσότερο εμφανές στα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε δεδομένα πάνω από το 95% του συνόλου της κατανομής των δεδομένων, όπου οι τιμές του  $C_1$  ,όσο μικρότερη είναι η διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος, συγκεντρώνονται περί μια τιμή η οποία βρίσκεται στο μέσο της κατανομής.

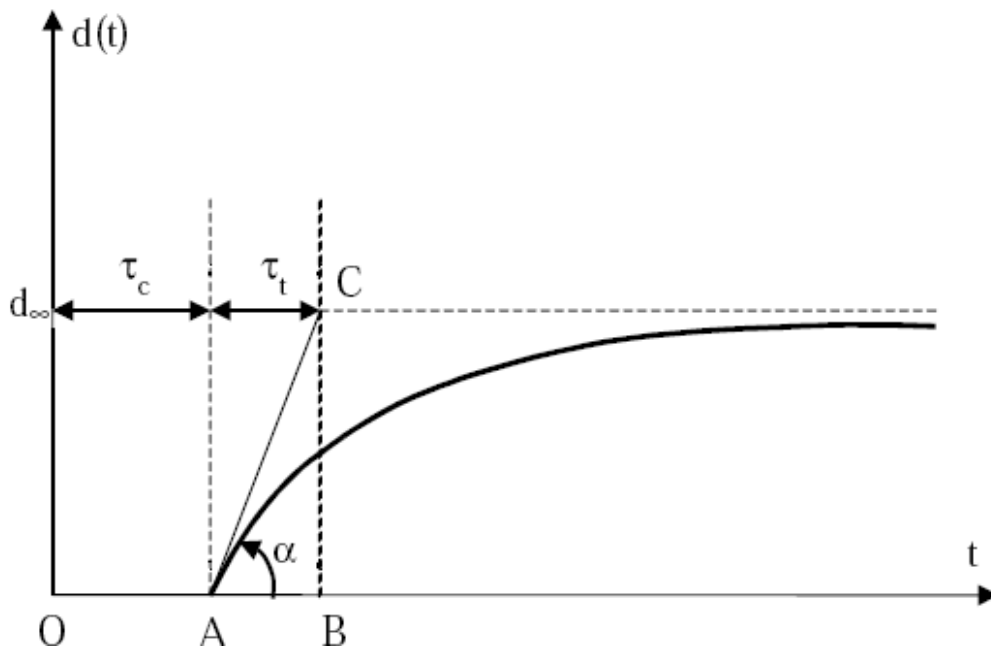
- Η εκτίμηση της μέσης απώλειας πάχους  $t_r$  που προέκυψε από την παραπάνω ανάλυση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του περιθωρίου διάβρωσης.
- Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση της διάβρωσης με βελονισμούς, θεωρώντας μια ισοδύναμη απώλεια πάχους [7].

Το παραπάνω παράδειγμα αναπτύχθηκε από τους Paik και Thayamballi. Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε το μοντέλο αυτό με τα επόμενα που θα αναφερθούν παρακάτω καθώς και αυτά μεταξύ τους, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα ίδια δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το μοντέλο δηλαδή τις μετρήσεις σε δεξαμενές έρματος δεξαμενοπλοίων διαφόρων ηλικιών.

#### 2.4.1.2 Μοντέλο των Guedes Soares & Garbatov

Οι Guedes Soares & Garbatov πρότειναν ένα μη γραμμικό μοντέλο για να περιγράψουν την έκταση της διάβρωσης. Γι' αυτό το σκοπό χώρισαν την εξέλιξη της διάβρωσης σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση υπέθεσαν ότι δεν υπάρχει καθόλου διάβρωση γιατί το προστατευτικό επίστρωμα είναι αποδοτικό. Η χρονική διάρκεια αυτής της φάσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και τα στατιστικά δείχνουν ότι στα πλοία ποικίλλει από 1.5 -5.5 χρόνια ή 5 - 10 χρόνια. Η δεύτερη φάση ξεκινάει όταν το προστατευτικό επίστρωμα έχει υποστεί ζημιά και αντιστοιχεί σε ταχεία εξέλιξη της διάβρωσης η οποία μειώνει το πάχος ενός κατασκευαστικού στοιχείου. Η τρίτη φάση αντιστοιχεί στη σταδιακή μείωση του ρυθμού διάβρωσης και τελικά στη λήξη της εξέλιξης της ( δηλ. δεν έχουμε περεταίρω μείωση του πάχους) . Σε αυτή τη φάση το υλικό της διάβρωσης μένει στην επιφάνεια του κατασκευαστικού στοιχείου προστατεύοντάς το από επαφή με το διαβρωτικό περιβάλλον. Αν για κάποιο λόγο το υλικό της διάβρωσης απομακρυνθεί από την επιφάνεια αυτή η απομάκρυνση σηματοδοτεί την έναρξη μιας νέας μη γραμμικής διαδικασίας διάβρωσης αλλά στα πλαίσια της ανάπτυξης αυτού του μοντέλου η απομάκρυνση αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη [1].

Οι τρεις αυτές φάσεις που περιγράφηκαν παραπάνω φαίνονται στο παρακάτω σχήμα όπου δείχνει την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης  $d$  σε συνάρτηση με τον χρόνο  $t$ .



Το διάστημα OA αντιστοιχεί στην πρώτη φάση, το AB στη δεύτερη, το B $\infty$  στην τρίτη. Το  $d_{\infty}$  είναι η μακροπρόθεσμη απώλεια πάχους δηλαδή η απώλεια πάχους όταν η εξέλιξη της διάβρωσης έχει σταματήσει.  $\tau_c$  και  $\tau_t$  είναι η διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος και η περίοδος ταχείας εξέλιξης της διάβρωσης αντίστοιχα [1].

Το μοντέλο των Guedes Soares and Garbaton προέκυψε από τη λύση της παρακάτω εξίσωσης για την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης.

$$\tau_t r(t) + d(t) = d_{\infty}$$

όπου  $r(t)$  είναι ο ρυθμός διάβρωσης.

Η περίοδος μετάβασης  $\tau_t$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση

$$\tau_t = \frac{d_{\infty}}{\tan \alpha}$$

όπου  $\alpha$  είναι η γωνία που ορίζεται από τα AC και AB όπως φαίνεται στο σχήμα.

Το μοντέλο αυτό που μας δίνει την απώλεια πάχους σε σχέση με το χρόνο έχει ως εξής:

$$d(t) = \begin{cases} 0 & \text{για } t \leq \tau_c \\ d_{\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t-\tau_c}{\tau_t}\right) \right] & \text{για } t > \tau_c \end{cases}$$

Για την εφαρμογή του μοντέλου αυτού θα πρέπει να προσδιορισθούν η περίοδος  $\tau_c$  και το  $d_\infty$  που είναι η απώλεια πάχους όταν η εξέλιξη της διάβρωσης σταματάει. Αυτά αποτελούν τυχαίες μεταβλητές και οι τιμές τους θα πρέπει να προσδιοριστούν από στατιστική ανάλυση πραγματικών δεδομένων διάβρωσης όπως προσδιορίστηκε και ο συντελεστής  $C_1$  στο μοντέλο του Paik. Για να είναι όμως συγκρίσιμα τα μοντέλα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα διάβρωσης με το μοντέλο του Paik δηλαδή οι μετρήσεις απώλειας πάχους σε δεξαμενές έρματος δεξαμενοπλοίων [1].

#### Σύγκριση του μοντέλου των Guedes Soares and Garbaton με το μοντέλο των Paik and Thayamballi

- Το μοντέλο των Paik and Thayamballi μετά τις απλουστευτικές παραδοχές δηλαδή  $C_2=1$  και  $T_{st}=0$  αποτελεί ένα γραμμικό μοντέλο ενώ των Guedes Soares and Garbaton αποτελεί μη γραμμικό μοντέλο.
- Το μοντέλο των Paik and Thayamballi προσδιορίζει την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης σε οποιοδήποτε χρόνο  $t$  ενώ στο μοντέλο των Guedes Soares and Garbaton πρέπει να γνωρίζουμε εξ αρχής την απώλεια πάχους που θα έχει το κατασκευαστικό στοιχείο μακροπρόθεσμα όταν η εξέλιξη της διάβρωσης σταματάει δηλαδή το  $d_\infty$ , για να υπολογίσουμε την απώλεια σε ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα.
- Στο μοντέλο των Guedes Soares and Garbaton πρέπει να γνωρίζουμε την περίοδο ταχείας εξέλιξης της διάβρωσης  $\tau_{st}$  την οποία και γνωρίζουμε από στατιστική ανάλυση πραγματικών δεδομένων διάβρωσης.
- Στο μοντέλο του Paik υπάρχει και μια περίοδος μετάβασης μεταξύ της απώλειας της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος και της έναρξης της διάβρωσης.
- Τη διάρκεια ζωής  $\tau_c$  τη θεωρούμε όπως και στο μοντέλο των Paik and Thayamballi 5, 7.5 και 10 χρόνια.
- Περαιτέρω σύγκριση θα γίνει στο τέλος της ενότητας με την αριθμητική εφαρμογή όλων των μοντέλων για ομοιόμορφη διάβρωση.

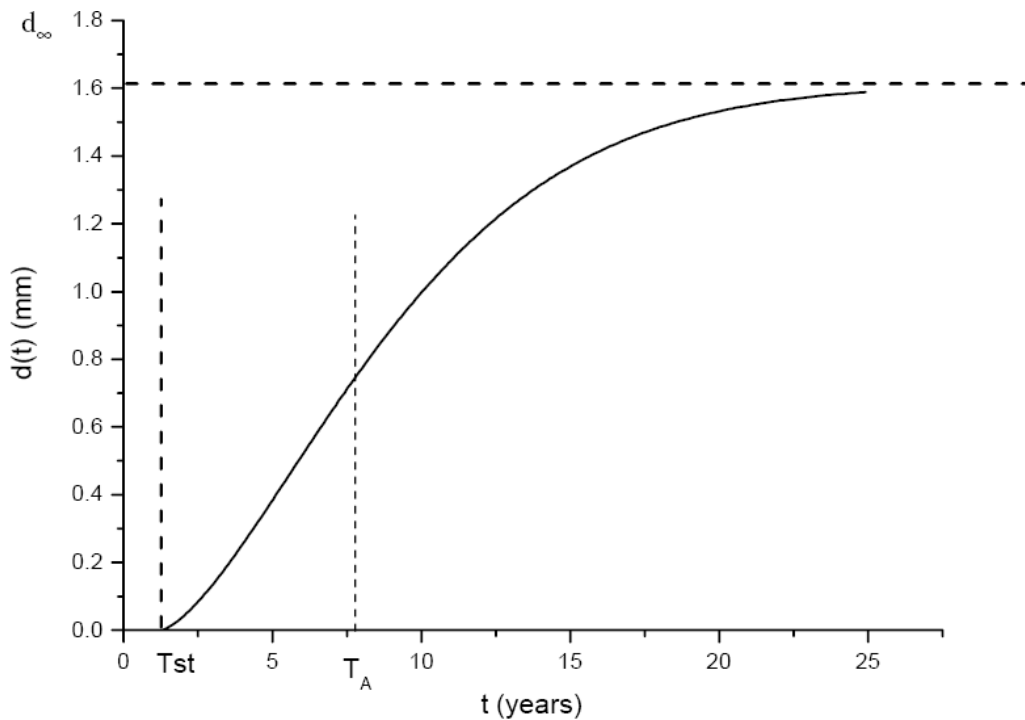
### 2.4.1.3 Μοντέλο των Qin & Cui

Στα μοντέλα των Guedes Soares and Garbatov και Paik and Thayamballi παρόλο που θεωρήσαμε την ύπαρξη των προστατευτικών επιστρωμάτων και εισάγαμε στις εξισώσεις την διάρκεια ζωής τους, υποθέσαμε ότι η ομοιόμορφη διάβρωση ξεκινάει αμέσως μόλις το προστατευτικό επίστρωμα χάσει την αποτελεσματικότητά του πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι το προστατευτικό επίστρωμα χάνει σταδιακά την αποτελεσματικότητά του και προτού τη χάσει τελείως, στο διάστημα αυτό δημιουργείται διάβρωση με βελονισμούς.

Αν ορίσουμε μια παράμετρο  $q$  σαν το βαθμό της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος αυτή θα παίρνει τιμές από 1 όταν το προστατευτικό επίστρωμα είναι καινούριο και πλήρως αποτελεσματικό, έως 0 όταν το προστατευτικό επίστρωμα χάνει τελείως την αποτελεσματικότητά του. Αυτό το διάστημα αντιπροσωπεύει τη διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος. Για κάθε προστατευτικό επίστρωμα υπάρχουν δύο παράμετροι : η χρονική στιγμή έναρξης της διάβρωσης με βελονισμούς  $T_{st}$  και η χρονική στιγμή έναρξης της ομοιόμορφης διάβρωσης  $T_{cl}$ . Εξαιτίας του γεγονότος ότι διάφοροι παράγοντες όπως η τοποθεσία, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και το επίπεδο μηχανικής καταπόνησης επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος τα  $T_{st}$  και  $T_{cl}$  μπορούμε να τα θεωρήσουμε ως τυχαίες μεταβλητές.

Στο μοντέλο των Qin & Cui η εξέλιξη της διάβρωσης διαιρείται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο από τη χρονική στιγμή 0 μέχρι τη χρονική στιγμή έναρξης της διάβρωσης με βελονισμούς  $T_{st}$  δεν υπάρχει καθόλου διάβρωση γιατί το προστατευτικό επίστρωμα είναι πλήρως αποτελεσματικό. Το δεύτερο στάδιο από τη χρονική στιγμή  $T_{st}$  μέχρι τη χρονική στιγμή  $T_A$  αντιστοιχεί στην έναρξη και εξέλιξη της διάβρωσης με βελονισμούς όπου ο ρυθμός διάβρωσης είναι επιταχυνόμενος . Στο τρίτο στάδιο έχουμε επιβράδυνση του ρυθμού διάβρωσης και αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή  $T_A$  μέχρι τη χρονική στιγμή  $T_L$  που είναι η διάρκεια ζωής της κατασκευής ή η χρονική στιγμή στην οποία λαμβάνουν χώρα επισκευή και συντήρησή της. Στην πραγματικότητα η χρονική στιγμή λήξης της επιτάχυνσης της διάβρωσης  $T_A$  δεν συμπίπτει με τη χρονική στιγμή έναρξης της ομοιόμορφης διάβρωσης  $T_{cl}$  όμως για λόγους απλοποίησης του μοντέλου θεωρούμε ότι  $T_A=T_{cl}$  [1],[8].

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο με την εφαρμογή του μοντέλου των Qin & Cui:



Ο ρυθμός διάβρωσης στο μοντέλο αυτό δίνεται από τη σχέση

$$r(t) = \begin{cases} 0 & \text{για } 0 \leq t \leq T_{st} \\ d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-T_{st}}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{t-T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right] & \text{για } T_{st} \leq t \leq T_L \end{cases}$$

όπου  $T_{st}$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $d_{\infty}$  είναι τέσσερις παράμετροι που πρέπει να καθορισθούν με κάποια μέθοδο όπως για παράδειγμα με στατιστική ανάλυση πραγματικών δεδομένων διάβρωσης όπως είδαμε στα προηγούμενα μοντέλα. Σημειώνεται ότι  $\beta, \eta$  συντελεστές που αφορούν την επιβράδυνση της διάβρωσης.

Ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή  $T_A$  όπου

$$T_A = \begin{cases} T_{cl} = T_{st} + \eta \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} & \text{για } \beta > 1 \\ T_{st} & \text{για } \beta \leq 1 \end{cases}$$

Και ισούται με

$$r_{max} = \begin{cases} d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \exp \left[ \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right)^{\beta} \right] & \text{για } \beta > 1 \\ d_{\infty} \frac{\beta}{\eta} & \text{για } \beta = 1 \\ \infty & \text{για } \beta < 1 \end{cases}$$

Έτσι με βάση αυτό το μοντέλο διάβρωσης η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$d(t) = \begin{cases} 0 & \text{για } 0 \leq t \leq T_{st} \\ d_{\infty} \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} \right) \right] & \text{για } T_{st} \leq t \leq T_L \end{cases}$$

Όταν οι τέσσερις παράμετροι  $T_{st}$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $d_{\infty}$  είναι γνωστοί το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί. Μένει μόνο να τις προσδιορίσουμε. Στο χρονικό διάστημα που έχουμε διάβρωση με βελονισμούς το μοντέλο υπολογίζει ισοδύναμη ομοιόμορφη απώλεια πάχους [1],[8].

#### Σύγκριση του μοντέλου των Qin & Cui με αυτό των Guedes Soares and Garbatov και των Paik and Thayamballi

- Το μοντέλο των Qin & Cui παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία από τα δύο προηγούμενα μοντέλα που περιγράφηκαν πιο πάνω καθώς δίνοντας κατάλληλες τιμές σε παραμέτρους του το μοντέλο παίρνει τη μορφή των προηγούμενων δύο μοντέλων. Για παράδειγμα στη σχέση που μας δίνει το  $d(t)$  θέτοντας  $\beta=1$  έχουμε

$$d(t) = d_{\infty} \left[ 1 - \exp \left( - \left( \frac{t - T_{st}}{\eta} \right) \right) \right]$$

το οποίο αποτελεί το μοντέλο των Guedes Soares and Garbatov όπου  $\eta = \tau_t$  που είναι ο χρόνος ανάμεσα στην απώλεια αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος και την έναρξη της διάβρωσης και  $T_{st} = \tau_c$  που είναι η διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος.

Εάν θέσουμε  $\eta=1$ , τότε από την εφαρμογή των σειρών Taylor και κρατώντας μόνο τον γραμμικό όρο, το μοντέλο αποκτά την παρακάτω μορφή

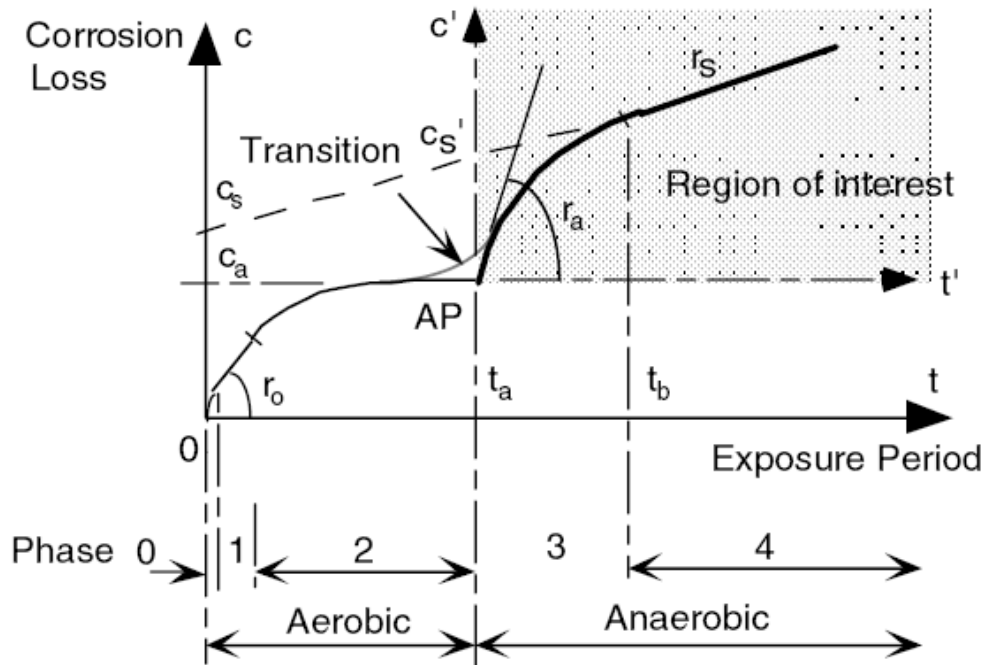
$$d_{\infty} \left( \frac{t - T_{st}}{\eta} \right)^{\beta} = d_{\infty} (t - T_{st})^{\beta}$$

όπου είναι το μοντέλο διάβρωσης των Paik and Thayamballi, όπου  $\beta = C_2$ ,  $T_{st} = T_C$  και  $d_{\infty} = C_1$ .

- Το μοντέλο των Qin & Cui περιλαμβάνει χρόνους επιτάχυνσης και επιβράδυνσης του ρυθμού διάβρωσης και ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα ενώ τα άλλα μοντέλα δεν αναφέρονται σε αυτούς τους χρόνους.
- Περαιτέρω σύγκριση θα γίνει στο τέλος της ενότητας με την αριθμητική εφαρμογή όλων των μοντέλων για ομοιόμορφη διάβρωση.

#### 2.4.1.4 Μοντέλο του Melchers

Η περιγραφή του μοντέλου του Melchers φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Το μοντέλο προβλέπει ότι μετά από μια αρχική και αρκετά βραχυπρόθεσμη φάση (τη φάση 0), η εξέλιξη της διάβρωσης είναι καθοδικά ελεγχόμενη και έτσι περιορίζεται από τη διάχυση του οξυγόνου, αρχικά μέσω του οριακού στρώματος του νερού με το οποίο η μεταλλική κατασκευή έρχεται απευθείας σε επαφή (φάση 1-έλεγχος συγκέντρωσης οξυγόνου) και έπειτα μέσω της διάχυσης οξυγόνου η οποία ελέγχεται από το αυξανόμενο πάχος του προϊόντος διάβρωσης στην επιφάνεια της κατασκευής (φάση 2).

Η αυξανόμενη δυσκολία διάχυσης του οξυγόνου λόγω της ανάπτυξης του προϊόντος διάβρωσης στην επιφάνεια, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αναερόβιων συνθηκών στη διεπιφάνεια μετάλλου- προϊόντος διάβρωσης. Αυτές οι συνθήκες επιτρέπουν την ανάπτυξη της δραστηριότητας των αναερόβιων βακτηρίων. Αυτή η διαδικασία εκπροσωπείται από τις φάσεις 3 και 4 του σχήματος όπου η φάση 3 είναι μια μεταβατική απόκριση στην αναερόβια δραστηριότητα, ενώ η φάση 4 είναι μια μακροπρόθεσμη σταθερή απόκριση, γι' αυτό μπορεί να παρασταθεί γραμμικά.

Έτσι με βάση τα παραπάνω για τις χαλύβδινες κατασκευές που δεν φέρουν κάποιο σύστημα προστασίας από τη διάβρωση, η διαδικασία της διάβρωσης σύμφωνα με τον Melchers αποτελείται από τέσσερα στάδια [9].



- Έναρξη διάβρωσης(φάση 1).
- Διάχυση οξυγόνου που ελέγχεται από τα προϊόντα της διάβρωσης και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών(φάση 2).
- Περιορισμός στην τροφή των μικροοργανισμών που προκαλούν την αερόβια δραστηριότητα(φάση 3).
- Αναερόβια δραστηριότητα(φάση 4).

Για κάποια από τα στάδια αυτά, οι κύριες περιβαλλοντικές παράμετροι έχουν αναγνωρισθεί και έχουν ποσοτικοποιηθεί, ενώ για άλλα στάδια απαιτείται καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού διάβρωσης.

Ο Melchers χρησιμοποίησε διαφορετικές σχέσεις σε καθένα από τα στάδια αυτά για την περιγραφή της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω [9].

#### Φάση 1- έναρξη διάβρωσης

Στη φάση αυτή έχουμε την πρώτη έκθεση της κατασκευής στο θαλασσινό νερό και τα προϊόντα διάβρωσης όπως και βιολογικοί παράγοντες ελάχιστα επιδρούν στην εξέλιξη της διάβρωσης. Εάν η κατασκευή διαθέτει καθοδική προστασία, ο ρυθμός απώλειας μετάλλου στις ανόδους ελέγχει το ρυθμό διάβρωσης, αλλά για τα περισσότερα μέταλλα αυτή η αντίδραση είναι ταχύτερη από αυτή που συμβαίνει στην κάθοδο η οποία στους χάλυβες εξαρτάται από την επάρκεια του οξυγόνου. Έτσι λόγω της εξάρτησης της εξέλιξης της διάβρωσης από τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου, η απώλεια πάχους  $x$  λόγω διάβρωσης εκφράζεται με την παρακάτω σχέση

$$x = \lambda k_i C_i^n$$

όπου  $C_i$  είναι η συγκέντρωση του οξυγόνου στη διεπιφάνεια μετάλλου-προϊόντος διάβρωσης,  $k_i$  είναι μια σταθερά για τον αρχικό ρυθμό διάβρωσης,  $\lambda$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας της επιφάνειας της κατασκευής διότι η τραχύτητα της επιφάνειας επηρεάζει το ρυθμό διάβρωσης και  $n$  είναι ένας εκθέτης που σχετίζεται με τη σειρά της αντίδρασης διάβρωσης. Σε αυτή τη φάση όμως έχουμε ότι  $n=1$  γιατί είναι η πρώτη αντίδραση που έχουμε άρα

$$x = \lambda k_i C_i$$

δηλαδή η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης είναι γραμμική [9].

## Φάση 2 - Διάχυση οξυγόνου που ελέγχεται από τα προϊόντα της διάβρωσης και την ανάπτυξη των μικροοργανισμών

Όπως είδαμε, η αύξηση του πάχους του προϊόντος διάβρωσης αλλά και της μικροβιακής βιομάζας εμποδίζουν τη συγκέντρωση του οξυγόνου στην επιφάνεια της κατασκευής. Άρα η σχέση που περιγράφει το μοντέλο σε αυτή τη φάση έχει να κάνει με τον έλεγχο της διάχυσης του οξυγόνου και είναι η εξής:

$$\frac{dO_2}{dt} = \text{ροή μάζας οξυγόνου} = \frac{k_2 (C_L - C_i)}{R}$$

Όπου  $O_2$  είναι η μάζα του μεταφερόμενου οξυγόνου,  $C_L$  και  $C_i$  είναι οι συγκεντρώσεις του διαλυμένου οξυγόνου στο θαλασσινό νερό και στη διεπιφάνεια προϊόντος διάβρωσης και μετάλλου αντίστοιχα,  $R$  είναι η αντίσταση στη διάχυση του οξυγόνου και  $k_2$  είναι μια σταθερά.

Η μεταφορά της μάζας του οξυγόνου προκαλείται από τη διαφορά των συγκεντρώσεων οξυγόνου μεταξύ του θαλασσινού νερού και της διεπιφάνειας προϊόντος διάβρωσης και μετάλλου. Εάν η έκταση της διάβρωσης είναι γραμμική συνάρτηση του διαλυμένου οξυγόνου που φθάνει στη διεπιφάνεια, η σχέση που μας δίνει την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης έχει ως εξής:

$$\frac{dO_2}{dt} = k_3 \frac{dx}{dt}$$

Όπου το  $k_3$  είναι μια σταθερά.

Τόσο το προϊόν διάβρωσης όσο και η μικροβιακή βιομάζα στην επιφάνεια του μετάλλου εμποδίζουν τη διάχυση του οξυγόνου. Στην ειδική περίπτωση που το προϊόν διάβρωσης έχει ομοιόμορφη πυκνότητα σε σχέση με το βάθος η παραπάνω έκφραση του μοντέλου του μοντέλου σε αυτή τη φάση γίνεται

$$x = k_4 t^{1/2}$$

όπου  $k_4$  είναι μια σταθερά [9].

## Φάση 3- Περιορισμός στην τροφή των μικροοργανισμών που προκαλούν την αερόβια δραστηριότητα

Η δράση των αναερόβιων βακτηρίων απαιτεί όχι μόνο τις κατάλληλες συνθήκες, δηλαδή έλλειψη οξυγόνου αλλά και την επαρκή ποσότητα τροφής η οποία βρίσκεται στο στρώμα σκουριάς στην επιφάνεια του μετάλλου. Η τροφή αυτή προέρχεται από τα νεκρά αερόβια βακτήρια των οποίων η ζωή διαρκεί όσο υπάρχει επάρκεια οξυγόνου αλλά και θρεπτικά συστατικά.

Για την μοντελοποίηση αυτής της φάσης ο Melchers όρισε στην επιφάνεια του μετάλλου ένα στρώμα σκουριάς μήκους  $L$  και ως  $x$  όρισε την απόσταση από την επιφάνεια του μετάλλου ώστε  $0 < x < L$ . Για  $x=L$  η καθαρή συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών θεωρούμε ότι είναι 0 δηλαδή  $C_{x=L}=0$  για κάθε χρονική στιγμή  $t$  μετρούμενη από το χρόνο έναρξης της τρίτης φάσης. Επίσης θεωρούμε ότι δεν μεταφέρονται θρεπτικά συστατικά από το θαλάσσιο περιβάλλον δηλαδή  $\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$  για  $t > 0$ . Επιπροσθέτως, υποθέτοντας ομοιόμορφη συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών σε όλο το στρώμα σκουριάς η αρχική κατάσταση δίνεται από τη σχέση  $C(x,t') \Big|_{t'=0} = C_i$  για  $0 < x < L$ , όπου  $C_i$  η αρχική συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών. Οι παραπάνω συνθήκες αποτελούν τις οριακές συνθήκες της διαφορικής εξίσωσης που θα χρησιμοποιήσουμε για την περιγραφή του μοντέλου. Η διαφορική αυτή εξίσωση είναι η εξής:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Όπου  $D$  είναι ο συντελεστής διάχυσης ο οποίος είναι ομοιόμορφος κατά μήκος του πάχους της σκουριάς γι' αυτό εδώ θεωρείται σταθερός.

Από τη λύση της διαφορικής εξίσωσης με τη χρήση των οριακών συνθηκών και στη συνέχεια την εφαρμογή της σειράς Taylor παίρνουμε την τελική έκφραση της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης σε αυτή τη φάση.

$$C(t) = \frac{8C_i L}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \left( 1 - k \exp\left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4L^2}\right) \right) + c_a$$

όπου  $k = 1/\exp[(2n+1)^2 \pi^2 D t_a / (4L^2)]$ ,  $t_a$  η χρονική στιγμή έναρξης της τρίτης φάσης και  $c_a$  η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης της κατασκευής στην έναρξη της τρίτης φάσης. Εφαρμόζουμε την παραπάνω σχέση για  $n=0,1$  [9].

#### Φάση 4- Αναερόβια δραστηριότητα

Στη φάση αυτή τα αναερόβια βακτήρια ελέγχουν το ρυθμό διάβρωσης κάτω από συνθήκες πολύ χαμηλής ή μηδενικής περιεκτικότητας οξυγόνου στη διεπιφάνεια μετάλλου- σκουριάς. Η σχέση που χρησιμοποιείται για την έκφραση του μοντέλου σε αυτή τη φάση είναι η εξής:

$$x = mD(t - t_c) + k_5$$

όπου το  $m$  εκφράζει την ποσότητα της υγρασίας,  $D$  είναι ο συντελεστής διάχυσης ο οποίος είναι ομοιόμορφος κατά μήκος του πάχους της σκουριάς και γι' αυτό θεωρείται σταθερός,  $k_5$  είναι η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης τη χρονική στιγμή έναρξης της τέταρτης φάσης και  $t_c$  είναι η χρονική στιγμή έναρξης της τέταρτης φάσης.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω οι πληροφορίες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των συντελεστών του μοντέλου του Melchers είναι δύσκολο να αποκτηθούν καθώς δεν καταγράφονται στις βάσεις δεδομένων των μετρήσεων διάβρωσης αλλά και διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν. Γι' αυτό ο Melchers έδωσε κάποιες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό κάποιων βασικών παραμέτρων του μοντέλου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού  $T$  [9].

- Ρυθμός διάβρωσης κατά τη διάρκεια της φάσης 1  
 $r_o = 0,076 \exp(-0,054T)$
- Χρονική στιγμή  $t_a$  λήξης της 2<sup>ης</sup> φάσης και έναρξης της 3<sup>ης</sup> καθώς και απώλεια πάχους  $C_a$  τη δεδομένη χρονική στιγμή.  
 $t_a = 6.61 \exp(-0.088T)$   
 $C_a = 0.32 \exp(-0,038T)$
- Ρυθμός διάβρωσης κατά τη διάρκεια της φάσης 3  
 $r_a = 0,066 \exp(0.061T)$
- Απώλεια πάχους  $C_s$  την έναρξη της 4<sup>ης</sup> φάσης και ρυθμός διάβρωσης  $r_s$  κατά τη διάρκεια της 4<sup>ης</sup> φάσης.  
 $C_s = 0.075 + 5678 T^{-4}$   
 $r_s = 0,045 \exp(0.017T)$  [9]

#### Σύγκριση του μοντέλου του Melchers με αυτό των Qin & Cui, των Guedes Soares and Garbatov και των Paik and Thayamballi

Το μοντέλο του Melchers διαφέρει πολύ από τα μοντέλα που περιγράφηκαν πιο πάνω. Το μόνο κοινό χαρακτηριστικό είναι ότι εκφράζει την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο.

- Το μοντέλο του Melchers θεωρεί ότι η μεταλλική κατασκευή που είναι εκτεθειμένη στο διαβρωτικό περιβάλλον δεν διαθέτει προστατευτικό επίστρωμα σε αντίθεση με τα άλλα μοντέλα που θεωρούν ότι διαθέτει και μάλιστα λαμβάνουν υπόψη τη διάρκεια ζωής του.
- Πρόκειται για μοντέλο που δεν χρησιμοποιεί άμεσα για την εφαρμογή του δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις απώλειας πάχους. Οι σχέσεις που το περιγράφουν προέκυψαν πειραματικά.
- Στο μοντέλο του Melchers η εξέλιξη της διάβρωσης χωρίζεται σε τέσσερις φάσεις και για καθεμία από αυτές χρησιμοποιούνται διαφορετικές σχέσεις για την περιγραφή του μοντέλου, ενώ για τα άλλα μοντέλα χρησιμοποιείται μια μόνο σχέση για την περιγραφή τους σε όλη τη διάρκεια εξέλιξης της διάβρωσης.

- Το μοντέλο του Melchers λαμβάνει υπόψη την ανάπτυξη και εξέλιξη της βακτηριακής δραστηριότητας ως έναν από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης ενώ τα άλλα μοντέλα δεν τη λαμβάνουν καθόλου υπόψη.
- Για την εφαρμογή του μοντέλου του Melchers πρέπει να είναι γνωστά ένα πλήθος συντελεστών που έχουν να κάνουν με τη συγκέντρωση και διάχυση του οξυγόνου, την ποσότητα της υγρασίας στη συγκεκριμένη περιοχή που εφαρμόζεται το μοντέλο, τη συγκέντρωση των θρεπτικών συστατικών των βακτηρίων και την τραχύτητα της επιφάνειας. Στα άλλα μοντέλα ο μικρός αριθμός των συντελεστών που διαθέτουν προσδιορίζεται αποκλειστικά και μόνο από βάσεις δεδομένων μετρήσεων διάβρωσης και οι οποίες περιλαμβάνουν μόνο μετρήσεις απωλειών πάχους και τις ηλικίες των πλοίων στα οποία μετρήθηκαν. Δεν περιλαμβάνουν λεπτομέρειες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των συντελεστών του Melchers.
- Η αριθμητική εφαρμογή του μοντέλου με σκοπό να επιτευχθεί περαιτέρω σύγκριση με τα υπόλοιπα γίνεται με τη χρήση των εμπειρικών σχέσεων που ο Melchers έδωσε για τον υπολογισμό κάποιων βασικών παραμέτρων του μοντέλου σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του θαλασσινού νερού  $T$  η οποία θα τη λαμβάνεται ίση με  $T=15^{\circ} C$

#### 2.4.1.5 Μοντέλο των Southwell et al.

Οι Southwell et al βασιζόμενοι σε πραγματικά δεδομένα διάβρωσης που είχαν συλλέξει παρατήρησαν ότι η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης αυξάνει μη γραμμικά σε περίοδο 2-5 έτη έκθεσης της κατασκευής στο διαβρωτικό περιβάλλον αλλά μετά από αυτήν την περίοδο αυξάνει με σχετικά σταθερό ρυθμό. Αυτό σημαίνει ότι μετά από μια περίοδο αρχικής μη γραμμικής εξέλιξης της διάβρωσης, το οξειδωμένο υλικό που παράγεται παραμένει στην επιφάνεια του μετάλλου εμποδίζοντας την επαφή της με το διαβρωτικό περιβάλλον σταματώντας την εξέλιξη της διάβρωσης.

Πρότειναν ένα γραμμικό και ένα δι-γραμμικό μοντέλο διάβρωσης, παρόλο που έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι τα μη γραμμικά μοντέλα είναι περισσότερο κατάλληλα για την περιγραφή του φαινομένου της διάβρωσης. Συσχετίζοντας πραγματικές παραμέτρους του μοντέλου με τη μέση τιμή αυτών και χρησιμοποιώντας στατιστική ανάλυση, αυτά τα δύο μοντέλα επεκτάθηκαν από τον Melchers [1].

Το εκτεταμένο γραμμικό μοντέλο διάβρωσης των Southwell et al. έχει ως εξής

$$\mu_d(t) = 0.076 + 0.038t$$

$$\sigma_d(t) = 0.051 + 0.025t$$

όπου  $t$  ο χρόνος σε έτη

Το εκτεταμένο δι- γραμμικό μοντέλο διάβρωσης των Southwell et al. έχει ως εξής:

$$\mu_d(t) = \begin{cases} 0.09t & 0 < t < 1.46 \text{ years} \\ 0.076 + 0.038t & 1.46 < t < 16 \text{ years} \end{cases}$$

$$\sigma_d(t) = \begin{cases} 0.062t & 0 < t < 1.46 \text{ years} \\ 0.035 + 0.017t & 1.46 < t < 16 \text{ years} \end{cases}$$

Το μη γραμμικό μοντέλο των Melchers και Southwell et al. έχει ως εξής:

$$\mu_d(t) = 0.084t^{0.823}$$

$$\sigma_d(t) = 0.056 t^{0.823}$$

Ο Melchers επίσης πρότεινε ένα τρι-γραμμικό μοντέλο, καθώς και μια άλλη προσέγγιση για τη μείωση του πάχους λόγω διάβρωσης, τα οποία έχουν ως εξής:

Το τρι-γραμμικό μοντέλο

$$d(t) = \begin{cases} 0.170t & 0 \leq t < 1 \\ 0.152 + 0.0186t & 1 \leq t < 8 \\ -0.364 + 0.083t & 8 \leq t \leq 16 \end{cases}$$

Μια άλλη προσέγγιση του Melchers

$$d(t) = 0.1207 t^{0.6257}$$

Στις παραπάνω σχέσεις  $d(t)$  είναι η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης στον χρόνο  $t$ ,  $\mu(t)$ ,  $\sigma(t)$  είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης στον χρόνο  $t$  [1].

Σύγκριση του μοντέλου των Southwell et al με αυτά του Melchers, των Qin & Cui, των Guedes Soares and Garbatov και των Paik and Thayamballi

Το μοντέλο των Southwell et al όπως και τα προηγούμενα μοντέλα που περιγράφηκαν παρουσιάζει την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο.

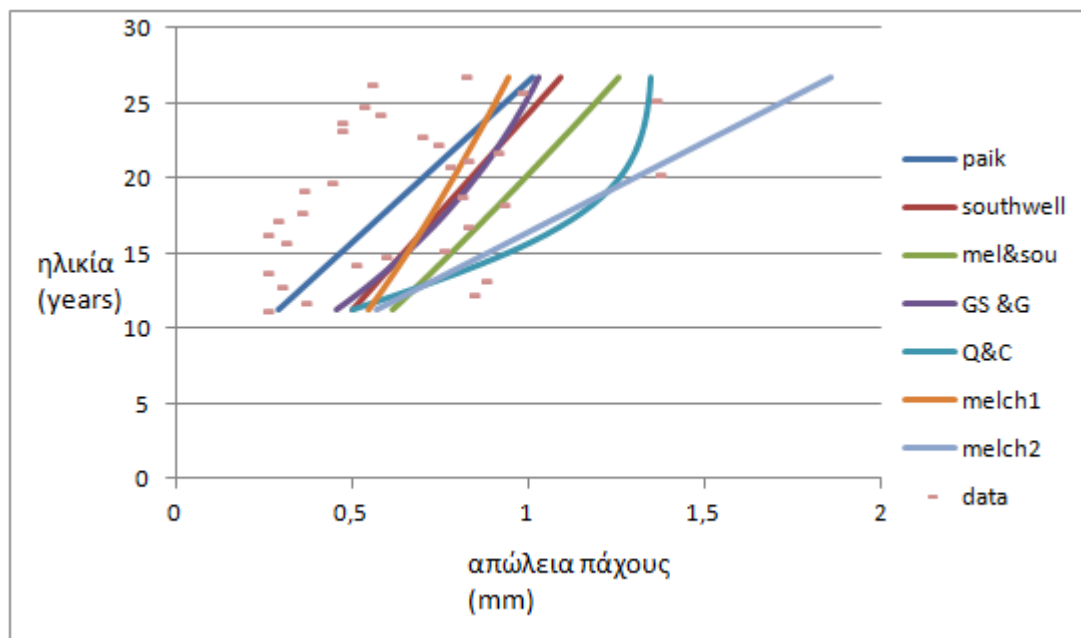
- Είναι γραμμικό μοντέλο όπως και το μοντέλο του Paik αλλά τα άλλα μοντέλα είναι μη γραμμικά. Έχει όμως αποδειχθεί πειραματικά ότι τα μη γραμμικά μοντέλα περιγράφουν καλύτερα την εξέλιξη της διάβρωσης.
- Τόσο το γραμμικό όσο και το δι-γραμμικό μοντέλο των Southwell et al είναι συντηρητικά στα αρχικά στάδια εξέλιξης της διάβρωσης υπερεκτιμώντας την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης.
- Πρόκειται για μοντέλο που δεν χρησιμοποιεί συντελεστές που προκύπτουν άμεσα από βάσεις δεδομένων πραγματικών μετρήσεων διάβρωσης όπως όλα τα υπόλοιπα μοντέλα αλλά προέκυψαν πειραματικά.

- Δεν περιέχει κάποια πληροφορία για την επίδραση του προστατευτικού επιστρώματος στην εξέλιξη της διάβρωσης όπως είδαμε στα μοντέλα των Qin & Cui , Paik και Guedes Soares and Garbatov.
- Δεν περιέχει κάποια πληροφορία για τη βακτηριακή δραστηριότητα ούτε για τη συγκέντρωση οξυγόνου ούτε γενικά για τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή λειτουργίας την εξεταζόμενης κατασκευής , άλλα ούτε και πληροφορίες για επιτάχυνση η επιβράδυνση της διάβρωσης.
- Περιλαμβάνει έκφραση τόσο για τη μέση τιμή της απώλειας πάχους όσο και για την τυπική απόκλιση ενώ όλα τα άλλα μοντέλα αποτελούνται μόνο από την έκφραση της μέσης τιμής.
- Για την εφαρμογή του μοντέλου αρκεί μόνο να δώσουμε τιμές στο χρόνο  $t$  γι' αυτό το λόγο είναι πολύ εύκολη και θα γίνει παρακάτω με την αριθμητική εφαρμογή όλων των μοντέλων.

#### 2.4.1.6 Εφαρμογή των μοντέλων με χρήση δεδομένων από μετρήσεις και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Για την εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των δεδομένων από μετρήσεις σε δεξαμενές έρματος δεξαμενοπλοίων τα οποία παρατίθενται παραπάνω στην περιγραφή του μοντέλου του Paik. Επειδή στα περισσότερα μοντέλα χρησιμοποιείται ως παράμετρος η διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος εφαρμόσαμε τα μοντέλα για τρεις διαφορετικές διάρκειες ζωής δηλαδή για 5, 7.5 και 10 χρόνια. Επίσης για τον προσδιορισμό του  $d_{\infty}$  που είναι η απώλεια πάχους μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα και υπήρχε ως παράμετρος στα μοντέλα των των Guedes Soares and Garbatov και Qin & Cui χρησιμοποιήθηκε η απώλεια πάχους για  $t=25.25$  που είναι ίση με 1.352 mm και αυτό γιατί για αυτό το  $t$  υπήρχαν περισσότερες μετρήσεις από τις άλλες μεγαλύτερες ηλικίες. Επίσης για τις παραμέτρους  $\eta$  και  $\beta$  στα μοντέλα των Qin & Cui χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές τιμές δηλαδή  $\eta=9.19$  και  $\beta= 1.99$  όπως και εμπειρική τιμή χρησιμοποιήθηκε για το  $\tau_t =15,2$  years στο μοντέλο των Guedes Soares & Garbatov. (πρόκειται για τιμές που έχουν υπολογιστεί από τους ίδιους τους ερευνητές). Επίσης το  $T_{st}$  στο μοντέλο των Qin & Cui ταυτίζεται με τη διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος. Η παράμετρος  $C_1$  στο μοντέλο του Paik υπολογίστηκε με στατιστική ανάλυση των δεδομένων από τον Paik. Τα μοντέλα των Southwell et al. , Southwell & Melchers και Melchers αναπτύχθηκαν για τις θαλάσσιες κατασκευές , οι συντελεστές τους προέκυψαν πειραματικά και δεν χρησιμοποιούν άμεσα δεδομένα από μετρήσεις.

Η εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων σε κοινό διάγραμμα μαζί με τις μέσες τιμές των δεδομένων απώλειας πάχους που παρατίθενται με μορφή σημείων, φαίνονται παρακάτω για  $T_c = 5$  χρόνια:



Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τις απώλειες πάχους σε mm και στον κατακόρυφο τις ηλικίες των πλοίων.

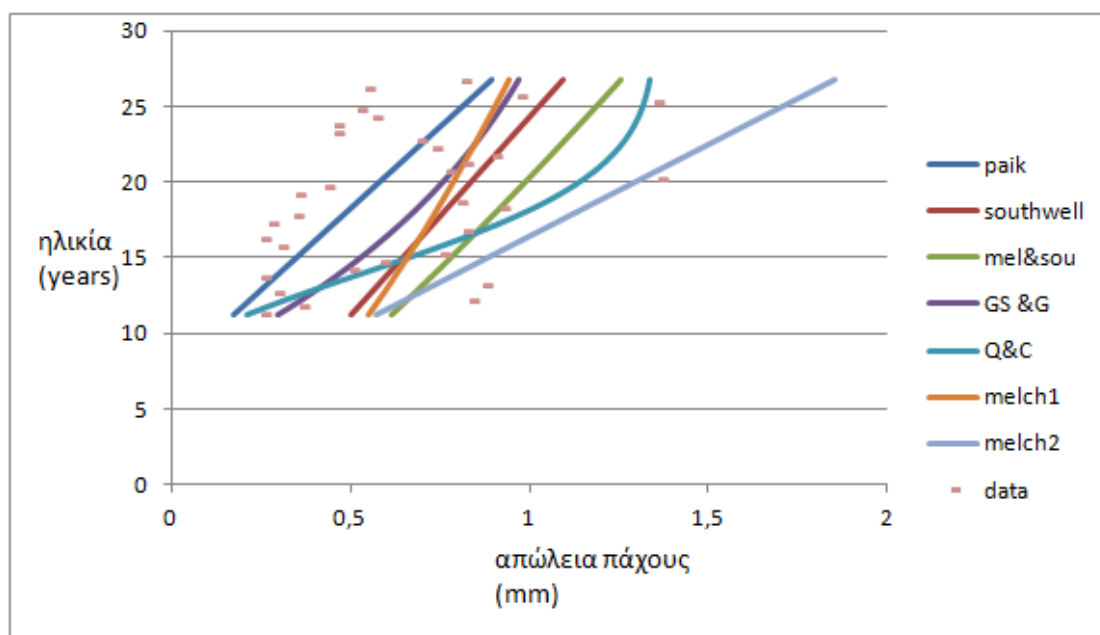
Παρατηρούμε ότι τα πραγματικά δεδομένα παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά και είναι δύσκολο μόνο από αυτά να σχηματίσουμε εικόνα για την απώλεια πάχους σε σχέση με το χρόνο. Παρατηρούμε γενικά ότι τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν άμεσα τις πραγματικές μετρήσεις ταιριάζουν περισσότερο στα πραγματικά δεδομένα σε σχέση με τα μοντέλα που προέκυψαν πειραματικά και γενικά υπερεκτιμούν την απώλεια πάχους. Ειδικά τα μοντέλα του Paik και Guedes Soares and Garbaton περιγράφουν καλύτερα την απώλεια πάχους πλησιάζοντας περισσότερο τα δεδομένα. Παρατηρούμε όμως ότι το μη γραμμικό μοντέλο του Melchers παρότι δεν αξιοποιεί άμεσα τις πραγματικές μετρήσεις, πλησιάζει και αυτό αρκετά καλά τα δεδομένα. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τον πίνακα που ακολουθεί ο οποίος περιλαμβάνει και εκτίμηση με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων για το ποια από τα μοντέλα πλησιάζουν περισσότερο τα πραγματικά δεδομένα. Η εφαρμογή των μοντέλων έγινε χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες σχέσεις για κάθε μοντέλο που περιγράφουν την απώλεια πάχους σε σχέση με το χρόνο και αντικαθιστώντας τις αντίστοιχες παραμέτρους στις σχέσεις αυτές βρέθηκαν οι απώλειες πάχους για κάθε ηλικία οι οποίες δίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:



ηλικία	μέση απώλεια πάχους	Paik	least square	Southwell	least square	Mel&Sou	least square	GS&G	least square	Q&C	least square	Melch 1	least square	Melch2	least square
11,25	0,25	0,292	0,023	0,504	0,192	0,616	0,317	0,456	0,146	0,503	0,19	0,549	0,239	0,57	0,263
11,75	0,358	0,315	0,03	0,523	0,145	0,639	0,28	0,485	0,107	0,566	0,192	0,564	0,19	0,612	0,246
12,25	0,833	0,338	0,58	0,542	0,401	0,661	0,258	0,513	0,431	0,628	0,301	0,579	0,359	0,653	0,268
12,75	0,29	0,362	0,047	0,561	0,231	0,683	0,382	0,541	0,208	0,689	0,391	0,594	0,269	0,695	0,398
13,25	0,868	0,385	0,606	0,58	0,418	0,705	0,258	0,567	0,433	0,749	0,194	0,608	0,384	0,736	0,213
13,75	0,25	0,408	0,104	0,599	0,296	0,727	0,465	0,592	0,288	0,807	0,588	0,623	0,325	0,778	0,542
14,25	0,5	0,432	0,065	0,618	0,132	0,748	0,31	0,617	0,13	0,862	0,492	0,637	0,155	0,819	0,421
14,75	0,583	0,455	0,134	0,637	0,066	0,77	0,253	0,641	0,07	0,914	0,494	0,651	0,083	0,861	0,401
15,25	0,75	0,478	0,335	0,656	0,133	0,791	0,063	0,664	0,123	0,962	0,363	0,664	0,122	0,902	0,251
15,75	0,3	0,501	0,161	0,675	0,365	0,813	0,57	0,686	0,38	1,008	0,925	0,678	0,369	0,944	0,8
16,25	0,25	0,525	0,213	0,694	0,419	0,834	0,632	0,708	0,438	1,049	1,038	0,691	0,415	0,985	0,908
16,75	0,819	0,548	0,371	0,713	0,164	0,855	0,06	0,728	0,141	1,088	0,512	0,705	0,176	1,027	0,383
17,25	0,275	0,571	0,251	0,732	0,46	0,876	0,691	0,749	0,485	1,123	1,184	0,718	0,439	1,068	1,065
17,75	0,343	0,595	0,236	0,751	0,446	0,897	0,686	0,768	0,472	1,154	1,213	0,731	0,416	1,11	1,113
18,25	0,917	0,618	0,46	0,77	0,249	0,917	0,001	0,787	0,223	1,182	0,556	0,743	0,29	1,151	0,484
18,75	0,798	0,641	0,227	0,789	0,016	0,938	0,243	0,805	0,011	1,207	0,819	0,756	0,067	1,193	0,785
19,25	0,349	0,665	0,32	0,808	0,531	0,959	0,796	0,823	0,555	1,229	1,388	0,769	0,469	1,234	1,401
19,75	0,429	0,688	0,289	0,827	0,5	0,979	0,774	0,84	0,522	1,248	1,374	0,781	0,426	1,276	1,443
20,25	1,36	0,711	1,345	0,846	1,135	0,999	0,853	0,857	1,117	1,265	0,251	0,793	1,222	1,317	0,116
20,75	0,766	0,734	0,049	0,865	0,161	1,02	0,452	0,873	0,175	1,28	1,05	0,805	0,062	1,359	1,259
21,25	0,817	0,758	0,095	0,884	0,114	1,04	0,413	0,888	0,121	1,292	1,001	0,818	0,001	1,4	1,292
21,75	0,9	0,781	0,201	0,903	0,005	1,06	0,313	0,903	0,006	1,303	0,886	0,83	0,123	1,442	1,268
22,25	0,733	0,804	0,109	0,922	0,312	1,08	0,628	0,918	0,305	1,312	1,183	0,841	0,17	1,483	1,662
22,75	0,687	0,828	0,213	0,941	0,413	1,1	0,737	0,932	0,396	1,319	1,268	0,853	0,256	1,525	1,852
23,25	0,458	0,851	0,514	0,96	0,711	1,12	1,043	0,946	0,684	1,326	1,547	0,865	0,538	1,566	2,242
23,75	0,458	0,874	0,554	0,979	0,748	1,139	1,088	0,959	0,709	1,331	1,56	0,876	0,558	1,608	2,374

24,25	0,564	0,898	0,487	0,998	0,677	1,159	1,025	0,971	0,625	1,335	1,464	0,888	0,47	1,649	2,401
24,75	0,521	0,921	0,576	1,017	0,762	1,179	1,117	0,984	0,696	1,339	1,52	0,899	0,537	1,691	2,586
25,25	1,352	0,944	0,938	1,036	0,756	1,198	0,394	0,996	0,838	1,342	0,03	0,911	1	1,732	1,172
25,75	0,969	0,967	0,004	1,055	0,174	1,218	0,543	1,007	0,075	1,344	0,866	0,922	0,091	1,774	2,206
26,25	0,544	0,991	0,685	1,074	0,857	1,237	1,234	1,018	0,741	1,346	1,514	0,933	0,574	1,815	2,998
26,75	0,812	1,014	0,368	1,093	0,535	1,256	0,919	1,029	0,399	1,346	1,153	0,944	0,231	1,857	2,787
		sum	10,59		12,524		17,798		12,05		27,507		11,026		37,6

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εφαρμογή των μοντέλων για  $T_c = 7,5$  χρόνια



Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τις απώλειες πάχους σε mm και στον κατακόρυφο τις ηλικίες των πλοίων.

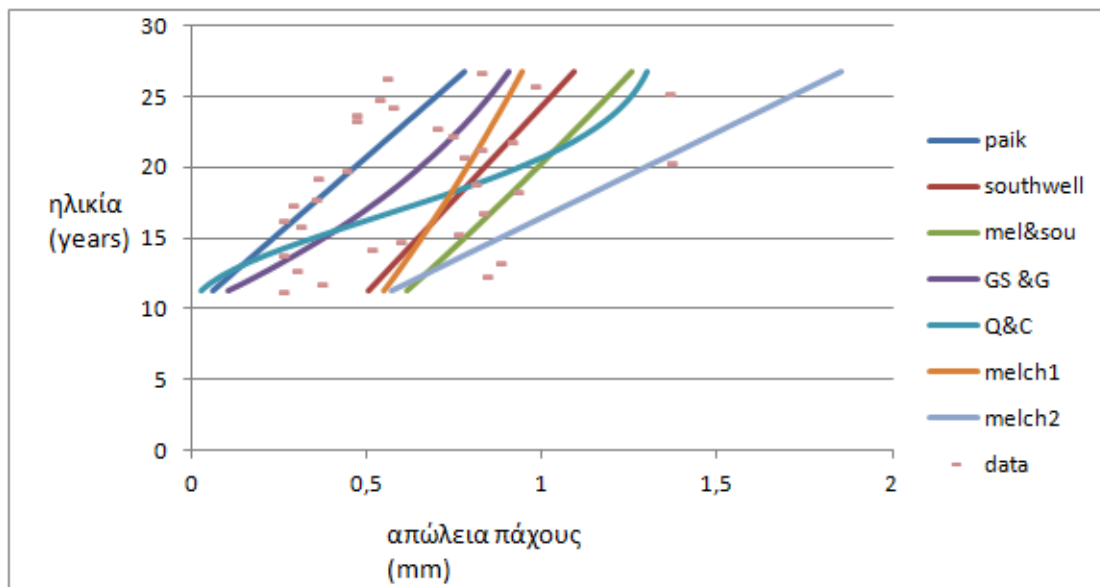
Παρατηρούμε ότι και εδώ τα μοντέλα των Paik, Guedes Soares and Garbaton τα οποία χρησιμοποιούν άμεσα τις πραγματικές μετρήσεις ταιριάζουν περισσότερο στα δεδομένα. Επίσης παρατηρούμε ότι το μη γραμμικό μοντέλο του Melchers παρότι δεν αξιοποιεί άμεσα τις πραγματικές μετρήσεις παρουσιάζει εδώ αρκετά καλή συνάφεια με τα δεδομένα. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τον πίνακα που ακολουθεί ο οποίος περιλαμβάνει και εκτίμηση με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων για το ποια από τα μοντέλα πλησιάζουν περισσότερο τα πραγματικά δεδομένα. Το μοντέλο όμως των Qin and Cui παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία από όλα τα μοντέλα καθώς οι τιμές του καλύπτουν όλο το εύρος των πραγματικών τιμών των δεδομένων παρότι με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων δεν φαίνεται να υπάρχει τόσο καλή συνάφεια με τα δεδομένα όσο με τα άλλα μοντέλα. Γενικά οι τιμές των μοντέλων για  $T_c = 7,5$  χρόνια πλησιάζουν περισσότερο τις τιμές των πραγματικών δεδομένων από ότι για  $T_c = 5$  χρόνια.

Οι απώλειες πάχους που υπολογίστηκαν για κάθε ηλικία τόσο από τα δεδομένα όσο και από τα μοντέλα δίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

ηλικία	μέση απώλεια πάχους	Paik	least square	Southwell	least square	Mel&Sou	least square	GS&G	least square	Q&C	least square	Melch 1	least square	Melch2	least square
11,25	0,25	0,175	0,032	0,504	0,192	0,616	0,317	0,296	0,025	0,21	0,019	0,549	0,239	0,57	0,263
11,75	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358	0,358
12,25	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833	0,833
12,75	0,29	0,245	0,025	0,561	0,231	0,683	0,382	0,395	0,072	0,379	0,059	0,594	0,269	0,695	0,398
13,25	0,868	0,268	0,682	0,58	0,418	0,705	0,258	0,426	0,573	0,44	0,561	0,608	0,384	0,736	0,213
13,75	0,25	0,292	0,023	0,599	0,296	0,727	0,465	0,456	0,146	0,503	0,19	0,623	0,325	0,778	0,542
14,25	0,5	0,315	0,152	0,618	0,132	0,748	0,31	0,485	0,015	0,566	0,07	0,637	0,155	0,819	0,421
14,75	0,583	0,338	0,226	0,637	0,066	0,77	0,253	0,513	0,077	0,628	0,054	0,651	0,083	0,861	0,401
15,25	0,75	0,362	0,433	0,656	0,133	0,791	0,063	0,541	0,271	0,689	0,088	0,664	0,122	0,902	0,251
15,75	0,3	0,385	0,058	0,675	0,365	0,813	0,57	0,567	0,231	0,749	0,471	0,678	0,369	0,944	0,8
16,25	0,25	0,408	0,104	0,694	0,419	0,834	0,632	0,592	0,288	0,807	0,588	0,691	0,415	0,985	0,908
16,75	0,819	0,432	0,485	0,713	0,164	0,855	0,06	0,617	0,291	0,862	0,071	0,705	0,176	1,027	0,383
17,25	0,275	0,455	0,131	0,732	0,46	0,876	0,691	0,641	0,335	0,914	0,759	0,718	0,439	1,068	1,065
17,75	0,343	0,478	0,111	0,751	0,446	0,897	0,686	0,664	0,323	0,962	0,808	0,731	0,416	1,11	1,113
18,25	0,917	0,501	0,59	0,77	0,249	0,917	0,001	0,686	0,372	1,008	0,174	0,743	0,29	1,151	0,484
18,75	0,798	0,525	0,362	0,789	0,016	0,938	0,243	0,708	0,137	1,049	0,464	0,756	0,067	1,193	0,785
19,25	0,349	0,548	0,179	0,808	0,531	0,959	0,796	0,728	0,409	1,088	1,061	0,769	0,469	1,234	1,401
19,75	0,429	0,571	0,142	0,827	0,5	0,979	0,774	0,749	0,376	1,123	1,076	0,781	0,426	1,276	1,443
20,25	1,36	0,595	1,497	0,846	1,135	0,999	0,853	0,768	1,261	1,154	0,52	0,793	1,222	1,317	0,116
20,75	0,766	0,618	0,206	0,865	0,161	1,02	0,452	0,787	0,032	1,182	0,81	0,805	0,062	1,359	1,259
21,25	0,817	0,641	0,257	0,884	0,114	1,04	0,413	0,805	0,02	1,207	0,789	0,818	0,001	1,4	1,292
21,75	0,9	0,665	0,37	0,903	0,005	1,06	0,313	0,823	0,134	1,229	0,7	0,83	0,123	1,442	1,268
22,25	0,733	0,688	0,065	0,922	0,312	1,08	0,628	0,84	0,168	1,248	1,02	0,841	0,17	1,483	1,662
22,75	0,687	0,711	0,034	0,941	0,413	1,1	0,737	0,857	0,262	1,265	1,128	0,853	0,256	1,525	1,852
23,25	0,458	0,734	0,329	0,96	0,711	1,12	1,043	0,873	0,552	1,28	1,427	0,865	0,538	1,566	2,242
23,75	0,458	0,758	0,364	0,979	0,748	1,139	1,088	0,888	0,579	1,292	1,459	0,876	0,558	1,608	2,374

24,25	0,564	0,781	0,292	0,998	0,677	1,159	1,025	0,903	0,498	1,303	1,378	0,888	0,47	1,649	2,401
24,75	0,521	0,804	0,375	1,017	0,762	1,179	1,117	0,918	0,571	1,312	1,448	0,899	0,537	1,691	2,586
25,25	1,352	0,828	1,144	1,036	0,756	1,198	0,394	0,932	0,961	1,319	0,089	0,911	1	1,732	1,172
25,75	0,969	0,851	0,216	1,055	0,174	1,218	0,543	0,946	0,046	1,326	0,817	0,922	0,091	1,774	2,206
26,25	0,544	0,874	0,468	1,074	0,857	1,237	1,234	0,959	0,623	1,331	1,474	0,933	0,574	1,815	2,998
26,75	0,812	0,898	0,146	1,093	0,535	1,256	0,919	0,971	0,284	1,334	1,121	0,944	0,231	1,857	2,787
		sum	10,689		13,169		18,451		11,123		21,884		11,668		38,277

Τέλος παρουσιάζεται η εφαρμογή των μοντέλων για  $T_c = 10$  χρόνια



Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τις απώλειες πάχους σε mm και στον κατακόρυφο τις ηλικίες των πλοίων.

Παρατηρούμε ότι και εδώ τα μοντέλα των Paik, Guedes Soares and Garbaton τα οποία χρησιμοποιούν άμεσα τις πραγματικές μετρήσεις ταιριάζουν περισσότερο στα δεδομένα. Επίσης παρατηρούμε ότι το μη γραμμικό μοντέλο του Melchers παρότι δεν αξιοποιεί άμεσα τις πραγματικές μετρήσεις παρουσιάζει εδώ αρκετά καλή συνάφεια με τα δεδομένα. Τα συμπεράσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τον πίνακα που ακολουθεί ο οποίος περιλαμβάνει και εκτίμηση με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων για το ποια από τα μοντέλα πλησιάζουν περισσότερο τα πραγματικά δεδομένα. Το μοντέλο όμως των Qin and Cui παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία από όλα τα μοντέλα καθώς οι τιμές του καλύπτουν όλο το εύρος των πραγματικών τιμών των δεδομένων παρότι με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων δεν φαίνεται να υπάρχει τόσο καλή συνάφεια με τα δεδομένα όσο με τα άλλα μοντέλα. Γενικά οι τιμές των μοντέλων για  $T_c = 10$  χρόνια πλησιάζουν περισσότερο τις τιμές των πραγματικών δεδομένων από ότι για  $T_c = 5$  και  $7,5$  χρόνια.

Οι απώλειες πάχους που υπολογίστηκαν για κάθε ηλικία τόσο από τα δεδομένα όσο και από τα μοντέλα δίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

ηλικία	μέση απώλεια πάχους	Paik	least square	Southwell	least square	Mel&Sou	least square	GS&G	least square	Q&C	least square	Melch 1	least square	Melch2	least square
11,25	0,25	0,059	0,06	0,504	0,192	0,616	0,317	0,107	0,052	0,026	0,062	0,549	0,239	0,57	0,263
11,75	0,358	0,082	0,122	0,523	0,145	0,639	0,28	0,148	0,107	0,049	0,126	0,564	0,19	0,612	0,246
12,25	0,833	0,105	0,683	0,542	0,401	0,661	0,258	0,187	0,66	0,08	0,688	0,579	0,359	0,653	0,268
12,75	0,29	0,129	0,068	0,561	0,231	0,683	0,382	0,224	0,035	0,118	0,071	0,594	0,269	0,695	0,398
13,25	0,868	0,152	0,731	0,58	0,418	0,705	0,258	0,261	0,686	0,161	0,728	0,608	0,384	0,736	0,213
13,75	0,25	0,175	0,032	0,599	0,296	0,727	0,465	0,296	0,025	0,21	0,019	0,623	0,325	0,778	0,542
14,25	0,5	0,199	0,211	0,618	0,132	0,748	0,31	0,33	0,142	0,263	0,182	0,637	0,155	0,819	0,421
14,75	0,583	0,222	0,291	0,637	0,066	0,77	0,253	0,363	0,209	0,319	0,239	0,651	0,083	0,861	0,401
15,25	0,75	0,245	0,503	0,656	0,133	0,791	0,063	0,395	0,407	0,379	0,42	0,664	0,122	0,902	0,251
15,75	0,3	0,268	0,019	0,675	0,365	0,813	0,57	0,426	0,092	0,44	0,104	0,678	0,369	0,944	0,8
16,25	0,25	0,292	0,023	0,694	0,419	0,834	0,632	0,456	0,146	0,503	0,19	0,691	0,415	0,985	0,908
16,75	0,819	0,315	0,572	0,713	0,164	0,855	0,06	0,485	0,436	0,566	0,352	0,705	0,176	1,027	0,383
17,25	0,275	0,338	0,039	0,732	0,46	0,876	0,691	0,513	0,188	0,628	0,319	0,718	0,439	1,068	1,065
17,75	0,343	0,362	0,013	0,751	0,446	0,897	0,686	0,541	0,174	0,689	0,357	0,731	0,416	1,11	1,113
18,25	0,917	0,385	0,694	0,77	0,249	0,917	0,001	0,567	0,521	0,749	0,281	0,743	0,29	1,151	0,484
18,75	0,798	0,408	0,471	0,789	0,016	0,938	0,243	0,592	0,287	0,807	0,014	0,756	0,067	1,193	0,785
19,25	0,349	0,432	0,065	0,808	0,531	0,959	0,796	0,617	0,259	0,862	0,62	0,769	0,469	1,234	1,401
19,75	0,429	0,455	0,023	0,827	0,5	0,979	0,774	0,641	0,226	0,914	0,65	0,781	0,426	1,276	1,443
20,25	1,36	0,478	1,622	0,846	1,135	0,999	0,853	0,664	1,41	0,962	0,925	0,793	1,222	1,317	0,116
20,75	0,766	0,501	0,336	0,865	0,161	1,02	0,452	0,686	0,117	1,008	0,428	0,805	0,062	1,359	1,259
21,25	0,817	0,525	0,393	0,884	0,114	1,04	0,413	0,708	0,168	1,049	0,433	0,818	0,001	1,4	1,292
21,75	0,9	0,548	0,511	0,903	0,005	1,06	0,313	0,728	0,281	1,088	0,373	0,83	0,123	1,442	1,268
22,25	0,733	0,571	0,212	0,922	0,312	1,08	0,628	0,749	0,023	1,123	0,722	0,841	0,17	1,483	1,662
22,75	0,687	0,595	0,119	0,941	0,413	1,1	0,737	0,768	0,118	1,154	0,859	0,853	0,256	1,525	1,852
23,25	0,458	0,618	0,172	0,96	0,711	1,12	1,043	0,787	0,409	1,182	1,187	0,865	0,538	1,566	2,242
23,75	0,458	0,641	0,201	0,979	0,748	1,139	1,088	0,805	0,439	1,207	1,247	0,876	0,558	1,608	2,374

24,25	0,564	0,665	0,123	0,998	0,677	1,159	1,025	0,823	0,359	1,229	1,192	0,888	0,47	1,649	2,401
24,75	0,521	0,688	0,202	1,017	0,762	1,179	1,117	0,84	0,434	1,248	1,286	0,899	0,537	1,691	2,586
25,25	1,352	0,711	1,323	1,036	0,756	1,198	0,394	0,857	1,095	1,265	0,229	0,911	1	1,732	1,172
25,75	0,969	0,734	0,401	1,055	0,174	1,218	0,543	0,873	0,179	1,28	0,698	0,922	0,091	1,774	2,206
26,25	0,544	0,758	0,278	1,074	0,857	1,237	1,234	0,888	0,493	1,292	1,373	0,933	0,574	1,815	2,998
26,75	0,812	0,781	0,051	1,093	0,535	1,256	0,919	0,903	0,156	1,303	1,037	0,944	0,232	1,857	2,787
		sum	10,564		12,524		17,798		10,333		17,411		11,027		37,6



Από τα παραπάνω βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα:

- Για διάρκεια ζωής προστατευτικού επιστρώματος  $T_c = 10$  χρόνια τα μοντέλα περιγράφουν καλύτερα την απώλεια πάχους σε σχέση με το χρόνο καθώς έχουν μεγαλύτερη συνάφεια με τα πραγματικά δεδομένα.
- Γενικά τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν για τις παραμέτρους τους άμεσα τα πραγματικά δεδομένα περιγράφουν καλύτερα την απώλεια πάχους σε σχέση με το χρόνο από τα μοντέλα που οι παραμετροί τους προέκυψαν πειραματικά.
- Ειδικότερα όπως παρατηρήθηκε από τα διαγράμματα τα μοντέλα των Paik και Guedes Soares and Garbaton περιγράφουν καλύτερα την πραγματική κατάσταση.
- Το μοντέλο των Qin and Cui παρουσιάζει την μεγαλύτερη ευελιξία από όλα τα μοντέλα γιατί καλύπτει όλο το εύρος των τιμών των μετρήσεων.

Σημειώνεται ότι τα μοντέλα για ομοιόμορφη διάβρωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για κατασκευαστικά στοιχεία που έχουν υποστεί διάβρωση με βελονισμούς αν θεωρηθεί ισοδύναμη απώλεια πάχους. Εξάλλου κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων γίνεται απλή καταγραφή της απώλειας πάχους ανεξάρτητα από τον τύπο της διάβρωσης.

#### 2.4.2 Μοντέλα για διάβρωση με βελονισμούς

Τα μοντέλα για διάβρωση με βελονισμούς έχουν ως στόχο τον υπολογισμό της μέσης αύξησης του βάθους και της διαμέτρου των κοιλοτήτων ή της μεγαλύτερης κοιλοτήτας που παρατηρείται σ' ένα κατασκευαστικό στοιχείο λόγω διάβρωσης, σε σχέση με το χρόνο. Άλλα από αυτά προβλέπουν και τη χρονική στιγμή έναρξης της δημιουργίας των κοιλοτήτων. Όπως είδαμε παραπάνω ο προσδιορισμός των ακραίων τιμών, τόσο αυτών που έχουν να κάνουν με το βάθος και τη διάμετρο των κοιλοτήτων όσο και αυτών που έχουν να κάνουν με την έναρξη της δημιουργίας τους, είναι ο πιο αποτελεσματικός για την πρόβλεψη της ζωής ενός κατασκευαστικού στοιχείου. Συγκεκριμένα η πρόβλεψη της ελάχιστης περιόδου έναρξης των κοιλοτήτων είναι εξίσου σημαντική.

Ο χρόνος μέχρι την αστοχία ενός κατασκευαστικού στοιχείου από διάβρωση με βελονισμούς (δηλ η διάρκεια ζωής του)  $t_f$ , μπορεί να ορισθεί ως το άθροισμα μιας περιόδου επώασης  $t_i$  μιας περιόδου μετάδοσης  $t_p$  μέχρι τη διάτρηση. Έτσι ώστε να χουμε:

$$t_f = t_i + t_p$$

Στον χρόνο  $t_f$  το βάθος της κοιλότητας φθάνει το πάχος  $\alpha^*$  του κατασκευαστικού στοιχείου. Επίσης ορίζεται και ένα βάθος κοιλότητας  $\alpha_o$ , το οριακό βάθος κάτω από το οποίο η κοιλότητα δεν αναπτύσσεται περαιτέρω όσος χρόνος κι αν περάσει. Σημειώνεται ότι μέχρι το τέλος της περιόδου επώασης  $t_i$  δεν έχουμε εξέλιξη της διάβρωσης. Στην πραγματικότητα η κατάσταση ποικίλει από το ένα άκρο στο οποίο το  $t_i$  είναι τόσο μικρό που δεν λαμβάνεται υπόψη, στο άλλο άκρο όπου το  $t_i$  είναι σημαντικά μεγαλύτερο του  $t_p$ . Το  $\alpha_o$  σε κάποια συστήματα μπορεί να είναι μηδενικό(μηδενική διάβρωση) ενώ σε κάποια άλλα έχει μια τιμή. Συγκεκριμένα στις θαλάσσιες κατασκευές όπως στις δεξαμενές πετρελαίου δεξαμενοπλοίων των οποίων τις μετρήσεις θα χρησιμοποιήσουμε παρακάτω για την εφαρμογή των μοντέλων, ο χρόνος  $t_p$  είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από τον  $t_i$ .

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή των μοντέλων της διάβρωσης με βελονισμούς έχουν συνήθως τις παρακάτω δύο μορφές:

$$x-\alpha_o = k(t-t_i)^n \text{ και}$$

$$x-\alpha_o = k \log(t-t_i)$$

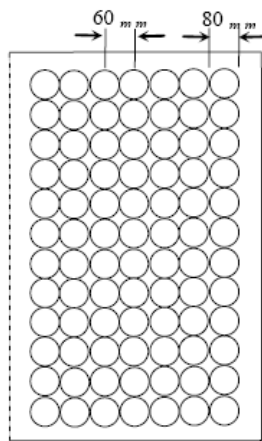
Αυτές οι δύο παραπάνω μορφές χρησιμοποιούνται για να επιτύχουν την καλύτερη συνάφεια του μοντέλου με τα πραγματικά δεδομένα από μετρήσεις [10].

Επειδή τα περισσότερα μοντέλα για να εφαρμοστούν χρησιμοποιούν πραγματικές μετρήσεις διάβρωσης από βάσεις δεδομένων, οι οποίες πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων είναι σημαντικό να αναφερθεί η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων και ποιά δεδομένα καταγράφονται.

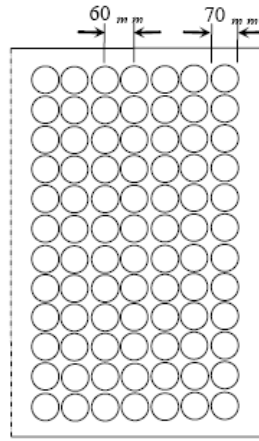
Εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των κοιλοτήτων που υπάρχουν στις δεξαμενές των πλοίων ιδιαίτερα στις δεξαμενές έρματος και υγρού φορτίου είναι αδύνατο να καταγραφεί και να μετρηθεί κάθε κοιλότητα. Γι' αυτό το λόγο επιλέγεται μια αντιπροσωπευτική περιοχή τετραγωνικού σχήματος διαστάσεων 300x300 mm. Όλες οι μετρήσεις και καταγραφές αφορούν αυτή την περιοχή και περιλαμβάνουν:

- Καταγραφή της συχνότητας δηλαδή του αριθμού των κοιλοτήτων που βρίσκονται στην τετραγωνική περιοχή.
  - Καταγραφή της πυκνότητας της διάβρωσης με βελονισμούς.  
Η πυκνότητα αυτή αντιπροσωπεύεται από τον συντελεστή DOP (degree of pit corrosion intensity) ο οποίος δίνεται από τη σχέση
- $$DOP = \frac{1}{ab} \sum_{i=1}^n A_{pi} \cdot 100 (\%)$$
- Όπου a,b οι διαστάσεις της περιοχής που εξετάζουμε, n ο αριθμός των κοιλοτήτων της περιοχής, A είναι το εμβαδό της i-οστής κοιλότητας.

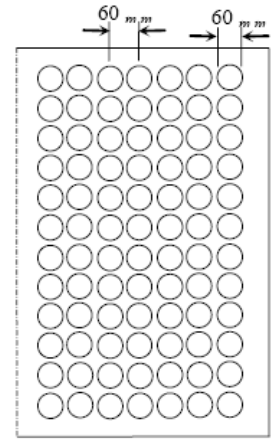
Η πυκνότητα αυτή η οποία εκφράζεται σε ποσοστό επί τις 100 αφορά την αντιπροσωπευτική τετραγωνική περιοχή που επιλέχθηκε και φαίνεται στα παρακάτω σχήματα για κάθε ποσοστό [11].



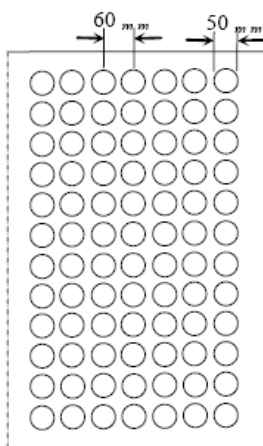
a) DOP = 75.40%



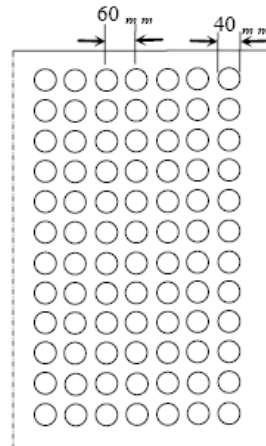
b) DOP = 57.73%



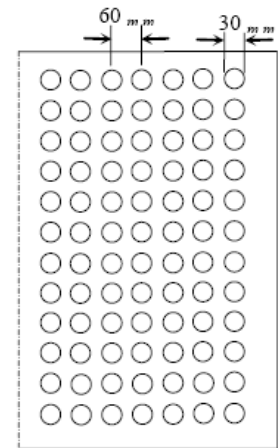
c) DOP = 42.41%



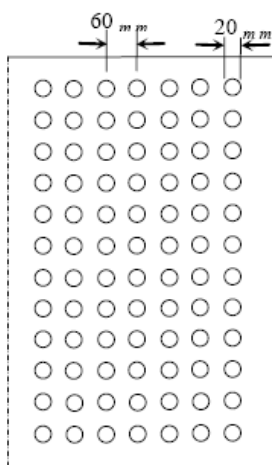
d) DOP = 29.45%



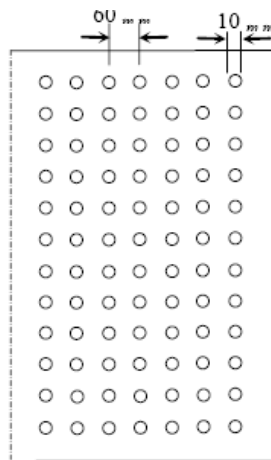
e) DOP = 18.85%



f) DOP = 10.60%



g) DOP = 4.71%



h) DOP = 1.18%

[12]

- Καταγραφή του μέσου πάχους ( $\mu_D$ ) όλων των κοιλότητων που βρίσκονται στην τετραγωνική περιοχή.
- Καταγραφή του μεγαλύτερου βάθους ( $X_D$ ) κοιλότητας που βρίσκεται στην τετραγωνική περιοχή.
- Καταγραφή της μέσης διαμέτρου ( $\mu_W$ ) όλων των κοιλότητων που βρίσκονται στην τετραγωνική περιοχή.
- Καταγραφή της μεγαλύτερης διαμέτρου ( $X_W$ ) κοιλότητας που βρίσκεται στην τετραγωνική περιοχή.
- Καταγραφή του αρχικού πάχους  $t$  της αντιπροσωπευτικής τετραγωνικής περιοχής [11]

Παρακάτω παρουσιάζονται μετρήσεις διάβρωσης με βελονισμούς που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια επιθεωρήσεων σε δεξαμενές πετρελαίου δεξαμενοπλοίων. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις περιλαμβάνουν μόνο τις κοιλότητες που είναι βαθύτερες από 12mm. Και αυτό γιατί οι ακραίες τιμές των δεδομένων είναι εκείνες που είναι επιθυμητές στα περισσότερα μοντέλα. Οι δεξαμενές αυτές στην πραγματικότητα έχουν πάνω από 1000 κοιλότητες με βάθος μικρότερο των 8 mm. Οι μετρήσεις αυτές αποτελούν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές τετραγωνικές δειγματικές περιοχές. Δεν διευκρινίζονται όμως οι τύποι των ελασμάτων από τους οποίους έγινε η λήψη των μετρήσεων [11].

Sizes and Depth of Deep Pits				
Tank No.	Pit No.	Width1 (mm)	Width2 (mm)	Depth (mm)
2 PORT	1	40.0 x	30.0 x	12.9
3 PORT	1	30.0 x	30.0 x	12.0
	2	30.0 x	30.0 x	12.0
	3	40.0 x	30.0 x	13.0
	4	30.0 x	30.0 x	12.0
	5	30.0 x	30.0 x	12.0
	6	30.0 x	30.0 x	13.0
	7	40.0 x	30.0 x	13.0
	8	40.0 x	30.0 x	15.0
	9	30.0 x	30.0 x	12.0
	10	30.0 x	30.0 x	12.0
3 STBD	1	30.0 x	30.0 x	12.0
	2	40.0 x	30.0 x	15.0
	3	40.0 x	30.0 x	15.0
	4	30.0 x	30.0 x	13.0
	5	30.0 x	30.0 x	13.0
	6	30.0 x	30.0 x	13.0
	7	40.0 x	30.0 x	16.0
	8	30.0 x	30.0 x	13.0
	9	50.0 x	40.0 x	19.0
	10	30.0 x	30.0 x	14.0
	11	40.0 x	40.0 x	15.0
	12	30.0 x	30.0 x	13.0
	13	40.0 x	30.0 x	14.0
4 STBD	1	70.0 x	70.0 x	15.0
	2	50.0 x	50.0 x	18.0
	3	30.0 x	50.0 x	13.0
	4	30.0 x	30.0 x	13.0

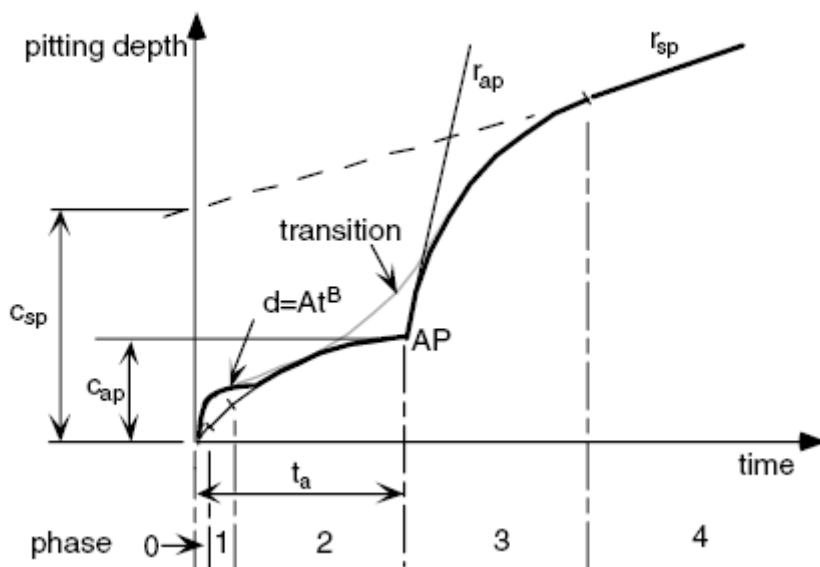
Sizes and Depth of Deep Pits					
Tank No.	Pit No.	Width1 (mm)		Width2 (mm)	Depth (mm)
7 PORT	1	60.0	x	40.0	14.0
	2	30.0	x	30.0	12.0
	3	40.0	x	30.0	15.0
	4	40.0	x	30.0	15.0
	5	30.0	x	30.0	15.0
	6	30.0	x	30.0	14.0
	7	30.0	x	30.0	14.0
	8	30.0	x	30.0	14.0
	9	40.0	x	30.0	15.0
	10	30.0	x	30.0	13.0
	11	30.0	x	30.0	12.0
	12	30.0	x	30.0	12.0
	13	70.0	x	30.0	12.0
	14	30.0	x	30.0	12.0
	15	30.0	x	30.0	16.0
	16	30.0	x	30.0	15.0
	17	30.0	x	30.0	15.0
	18	30.0	x	30.0	12.0
	19	30.0	x	30.0	12.0
	20	40.0	x	30.0	15.0
	21	40.0	x	30.0	16.0
	22	30.0	x	30.0	15.0
	23	30.0	x	30.0	15.0
	24	30.0	x	30.0	13.0
	25	30.0	x	30.0	13.0
	26	40.0	x	30.0	15.0
	27	30.0	x	30.0	16.0
	28	30.0	x	30.0	13.0
	29	40.0	x	30.0	15.0

Sizes and Depth of Deep Pits					
Tank No.	Pit No.	Width1 (mm)		Width2 (mm)	Depth (mm)
7 STBD	1	30.0	x	30.0	12.0
	2	30.0	x	30.0	12.0
	3	30.0	x	30.0	12.0
	4	30.0	x	30.0	12.0
	5	30.0	x	30.0	12.0
	6	30.0	x	30.0	12.0
	7	30.0	x	30.0	12.0
	8	60.0	x	60.0	15.0
	9	30.0	x	30.0	12.0
	10	30.0	x	30.0	12.0
	11	40.0	x	30.0	13.0
	12	30.0	x	30.0	12.0
	13	40.0	x	30.0	14.0
	14	40.0	x	40.0	15.0
	15	60.0	x	50.0	15.0
	16	65.0	x	65.0	15.0
	17	60.0	x	50.0	14.0
	18	60.0	x	60.0	13.0
	19	10.0	x	10.0	13.0
	20	50.0	x	40.0	14.0
	21	40.0	x	40.0	12.0
	22	50.0	x	50.0	18.0
	23	80.0	x	40.0	16.0
	24	30.0	x	30.0	12.0
	25	30.0	x	30.0	12.0
	26	40.0	x	30.0	14.0
8 PORT	1	80.0	x	50.0	13.0
	2	30.0	x	30.0	12.0
	3	30.0	x	30.0	12.0
	4	30.0	x	30.0	12.0
	5	40.0	x	30.0	12.0
	6	40.0	x	40.0	12.0
	7	30.0	x	30.0	12.0

### 3.4.2.1 Μοντέλο του Melchers για διάβρωση με βελονισμούς

Το μοντέλο αυτό είναι παρόμοιο με το μοντέλο του Melchers για ομοιόμορφη διάβρωση. Η επίδραση της αναερόβιας βακτηριακής δραστηριότητας είναι ακόμα περισσότερο έντονη εδώ και επηρεάζει την αύξηση του βάθους της μέγιστης σε βάθος κοιλότητας σε σχέση με το χρόνο [13].

Το μοντέλο αυτό περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα



Όπως βλέπουμε το μοντέλο αυτό αποτελείται από τέσσερις φάσεις όπως ακριβώς και το μοντέλο της ομοιόμορφης διάβρωσης και κάθε μια από αυτές περιγράφεται από διαφορετικές σχέσεις. Οι παράγοντες που επιδρούν στην εξέλιξη της διάβρωσης σε κάθε φάση είναι ίδιοι με αυτούς που επιδρούν στην ομοιόμορφη διάβρωση και έτσι οι τέσσερις φάσεις έχουν ως εξής:

- Φάσεις 1 και 2. Μετά την έναρξη της δημιουργίας των κοιλότητων, η αύξηση του βάθους τους γίνεται υπό πλήρως αερόβιας συνθήκες κάτω από το στρώμα σκουριάς που δημιουργείται. Κατά τη διάρκεια της φάσης 1 η αύξηση του βάθους δίνεται από τη σχέση  $d=At^B$  όπου A και B είναι σταθερές οι οποίες αποκτώνται εμπειρικά.
- Φάση 3. Ταχεία αύξηση του βάθους των κοιλότητων υπό πλήρως αναερόβιας συνθήκες κάτω από το στρώμα σκουριάς που δημιουργείται.
- Σταθερή αύξηση του βάθους των κοιλότητων υπό πλήρως αναερόβιας συνθήκες κάτω από το στρώμα σκουριάς που δημιουργείται.



Η διαφορά του μοντέλου του Melchers για διάβρωση με βελονισμούς με το μοντέλο του Melchers για ομοιόμορφη διάβρωση, βρίσκεται στην πρώτη φάση της διάβρωσης όπου στο μοντέλο της ομοιόμορφης διάβρωσης η απώλεια πάχους είναι γραμμική σε σχέση με το χρόνο ενώ εδώ είναι μη γραμμική και δίνεται από τη σχέση  $d=At^B$  όπου A και B είναι σταθερές οι οποίες αποκτώνται πειραματικά. Στις υπόλοιπες τρεις φάσεις τα μοντέλα παρουσιάζουν ίδια μορφή.

Όπως και στο μοντέλο για ομοιόμορφη διάβρωση έτσι και σε αυτό ο Melchers έδωσε εμπειρικές σχέσεις οι οποίες προέκυψαν από πειράματα για τον υπολογισμό κάποιων βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και εφαρμογή του μοντέλου. Αυτές οι παράμετροι δίνονται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία T του θαλασσινού νερού και είναι οι παρακάτω:

- Χρονική στιγμή  $t_a$  λήξης της 2<sup>ης</sup> φάσης και έναρξης της 3<sup>ης</sup> καθώς και απώλεια πάχους  $C_{ap}$  τη δεδομένη χρονική στιγμή.  
 $t_a = 6,61 \exp(-0.088T)$   
 $C_{ap} = 0,99 \exp(-0,052T)$
- Ρυθμός διάβρωσης κατά τη διάρκεια της φάσης 3  
 $r_{ap} = 0,596 \exp(0.0526T)$
- Απώλεια πάχους  $C_{sp}$  την έναρξη της 4<sup>ης</sup> φάσης και ρυθμός διάβρωσης  $r_s$  κατά τη διάρκεια της 4<sup>ης</sup> φάσης.  
 $C_{sp} = 0,0641 \exp(0.0613T)$   
 $r_s = 0,353 \exp(-0.0436T)$  [13]

Στο σημείο αυτό θα ήταν σκόπιμο να παραθέσουμε για σύγκριση τις αντίστοιχες σχέσεις που ανέπτυξε ο Melchers για την περιγραφή του μοντέλου του για ομοιόμορφη διάβρωση :

- Ρυθμός διάβρωσης κατά τη διάρκεια της φάσης 1  
 $r_o = 0,076 \exp(-0,054T)$
- Χρονική στιγμή  $t_a$  λήξης της 2<sup>ης</sup> φάσης και έναρξης της 3<sup>ης</sup> καθώς και απώλεια πάχους  $C_a$  τη δεδομένη χρονική στιγμή.  
 $t_a = 6,61 \exp(-0.088T)$   
 $C_a = 0,32 \exp(-0,038T)$
- Ρυθμός διάβρωσης κατά τη διάρκεια της φάσης 3  
 $r_a = 0,066 \exp(0.061T)$
- Απώλεια πάχους  $C_s$  την έναρξη της 4<sup>ης</sup> φάσης και ρυθμός διάβρωσης  $r_s$  κατά τη διάρκεια της 4<sup>ης</sup> φάσης.  
 $C_s = 0,075 + 5678 T^{-4}$   
 $r_s = 0,045 \exp(0.017T)$  [9]

Παρατηρούμε ότι ο Melchers στο μοντέλο του για ομοιόμορφη διάβρωση δίνει τη σχέση υπολογισμού του ρυθμού απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης κατά τη διάρκεια της φάσης 1 ενώ στο μοντέλο του για διάβρωση με βελονισμούς ξεκινάει από τη σχέση που δίνει τη χρονική στιγμή λήξης της 2<sup>ης</sup> φάσης και έναρξης της τρίτης και δίνει σχέση για την απώλεια πάχους τη δεδομένη χρονική στιγμή. Αντίστοιχες σχέσεις για τις φάσεις 2 και 3 δίνει και στο μοντέλο του για ομοιόμορφη διάβρωση. Παρατηρούμε ότι η σχέση που δίνει τη χρονική στιγμή λήξης της 2<sup>ης</sup> φάσης είναι ακριβώς ίδια στα δύο μοντέλα. Και στα δύο μοντέλα ο ρυθμός διάβρωσης κατά τη διάρκεια της φάσης 3 περιγράφεται από αντίστοιχες εκθετικές σχέσεις. Σημειώνεται ότι και στα δύο μοντέλα οι σχέσεις που τα περιγράφουν στις φάσεις από 1 έως 3 είναι εκθετικές και μόνο οι εκθετικές παράμετροι διαφοροποιούνται. Η απώλεια πάχους στην έναρξη της 4<sup>ης</sup> φάσης στο μοντέλο για ομοιόμορφη διάβρωση δίνεται από μια γραμμική σχέση ενώ στο μοντέλο για διάβρωση με βελονισμούς δίνεται από εκθετική σχέση. Ο ρυθμός διάβρωσης κατά τη διάρκεια της 4<sup>ης</sup> φάσης δίνεται και στα δύο μοντέλα από εκθετικές σχέσεις και διαφοροποιούνται μόνο οι αριθμητικές παράμετροι.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να εφαρμόσουμε το μοντέλο του Melchers για διάβρωση με βελονισμούς. Αρχικά για θερμοκρασία θαλασσινού νερού  $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , υπολογίζουμε τις παρακάτω παραμέτρους:

$$t_a = 1,77 \text{ χρόνια}$$

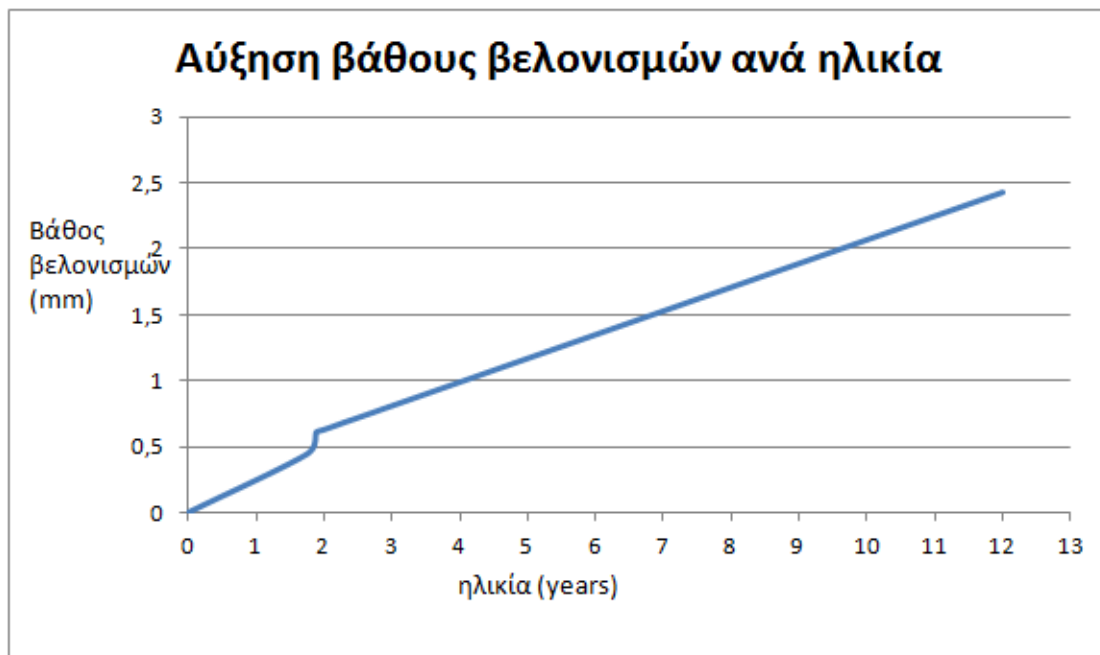
$$C_{ap} = 0,45 \text{ mm}$$

$$r_{ap} = 1,31 \text{ mm/year}$$

$$C_{sp} = 0,16 \text{ mm}$$

$$r_s = 0,18 \text{ mm/year}$$

Με βάση αυτές τις παραμέτρους κατασκευάζουμε το διάγραμμα της αύξησης του βάθους του βελονισμού σε σχέση με το χρόνο:



Στον οριζόντιο άξονα έχουμε τις τιμές του χρόνου σε έτη (years) και στον κατακόρυφο τις τιμές της μείωσης πάχους των βελονισμών.

#### 2.4.2.2 Μοντέλο των Yamamoto and Ikegami για διάβρωση με βελονισμούς

Το μοντέλο των Yamamoto and Ikegami βασίζεται στις εξής παραδοχές:

- Το κατασκευαστικά στοιχεία της γάστρας του πλοίου δεν υφίστανται διάβρωση όσο το προστατευτικό επίστρωμα παραμένει αποτελεσματικό. Όταν χάσει την αποτελεσματικότητά του, δημιουργούνται σημεία έναρξης κοιλοτήτων από τα οποία στη συνέχεια έχουμε τη δημιουργία διάβρωσης με βελονισμούς.
- Τα σημεία έναρξης κοιλοτήτων στη συνέχεια μετατρέπονται σε κοιλοότητες των οποίων το μέγεθος αυξάνεται με το χρόνο.
- Οι κοιλοότητες αναπτύσσονται ξεχωριστά η μια από την άλλη.

Το μοντέλο αυτό ουσιαστικά αποτελείται από τρία πιθανοθεωρητικά μοντέλα όπου το καθένα από αυτά αντιπροσωπεύει μια από της φάσης εξέλιξης της διάβρωσης με βελονισμούς, που περιγράφηκαν στις παραπάνω παραδοχές, δηλαδή τη χρονική διάρκεια της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος, την δημιουργία των σημείων έναρξης διάβρωσης με βελονισμούς και την εξέλιξη της διάβρωσης με βελονισμούς [14].

Τα μοντέλα αυτά περιγράφονται παρακάτω όπου δίνονται και οι αντίστοιχες σχέσεις για το καθένα από αυτά:

➤ Πιθανοθεωρητικό μοντέλο για την αποτελεσματικότητα του προστατευτικού επιστρώματος

Εάν ορίσουμε την διάρκεια ζωής  $T_0$  του προστατευτικού επιστρώματος ως το χρονικό διάστημα πριν από τη δημιουργία των κοιλοτήτων λόγω διάβρωσης, θεωρούμε ότι αυτή ακολουθεί την κανονική κατανομή η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_{r_0}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0} t} \exp\left\{-\frac{(\ln t - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\}$$

όπου  $\mu_0$  είναι η μέση τιμή του  $\ln(T_0)$  και  $\sigma_0$  είναι η τυπική απόκλιση του  $\ln(T_0)$ .

Γενικά δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τις τιμές των  $\mu_0$  και  $\sigma_0$  οι οποίες αντιμετωπίζονται σαν άγνωστες τιμές στην ανάλυση αυτή. Η σχέση μεταξύ του βαθμού της απώλειας της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος και της δημιουργίας της διάβρωσης με βελονισμούς δεν έχει γίνει απόλυτα κατανοητή. Από εμπειρικές παρατηρήσεις όμως είναι γνωστό ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μέσων τιμών της απώλειας αποτελεσματικότητας και της διασποράς τους. Με βάση αυτή τη συσχέτιση ο συντελεστής διασποράς της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{cov} = \frac{\sqrt{V[T_0]}}{E[T_0]} = \sqrt{\exp(\sigma_0^2) - 1} \approx 0.4 \quad [14]$$

➤ Πιθανοθεωρητικό μοντέλο για τη δημιουργία σημείων έναρξης διάβρωσης με βελονισμούς

Εάν ορίσουμε ως  $T_r$  τη μεταβατική περίοδο από τη δημιουργία των κοιλοτήτων μέχρι την εξέλιξή τους, θεωρούμε ότι αυτή ακολουθεί εκθετική κατανομή, η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$g_{T_r}(t) = \alpha \exp(-\alpha t)$$

όπου  $\alpha$  είναι το αντίστροφο της μέσης τιμή της  $T_r$ .

Σε αυτή τη σχέση δεν γνωρίζουμε εξ αρχής την τιμή της παραμέτρου  $\alpha$ , η οποία αντιμετωπίζεται σαν άγνωστη παράμετρος στην ανάλυση αυτή [14].

➤ Πιθανοθεωρητικό μοντέλο για την εξέλιξη της διάβρωσης με βελονισμούς.

Εάν ορίσουμε ως  $\tau$  το χρόνο μετά τη δημιουργία σημείων έναρξης διάβρωσης με βελονισμούς, η εξέλιξη του μεγέθους της διάβρωσης στη συγκεκριμένη περίπτωση η αύξηση του βάθους των κοιλοτήτων εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$Z(t) = \alpha \tau^b$$

Όπου  $z$  είναι το βάθος των κοιλοτήτων της διάβρωσης και  $\alpha$ ,  $b$  είναι συντελεστές οι οποίοι σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της εξέλιξης της διάβρωσης.

Συγκεκριμένα ο συντελεστής  $\alpha$  είναι μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί την κανονική κατανομή, η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$h_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\}$$

όπου  $\mu_0$  είναι η μέση τιμή του  $\ln(\alpha)$  και  $\sigma_0$  είναι η τυπική απόκλιση του  $\ln(\alpha)$  και αντιμετωπίζονται σαν άγνωστοι στην ανάλυση αυτή. Όσον αφορά το συντελεστή  $b$ , η τιμή του κυμαίνεται από 1 έως 1/3 ανάλογα με το υλικό του κατασκευαστικού στοιχείου, τις περιβαλλοντικές συνθήκες κτλ. Στη συγκεκριμένη ανάλυση ορίζουμε μια σταθερή τιμή για το  $b$ .

Η κατανομή της πιθανότητας του βάθους της διάβρωσης με βελονισμούς δεδομένου του χρόνου  $\tau$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p_z(z|\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left\{-\frac{(\ln z - b \ln \tau - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right\} [14].$$

Προκειμένου να εφαρμοσθεί το μοντέλο το οποίο αποτελείται από τα τρία πιθανοθεωρητικά μοντέλα που περιγράφηκαν παραπάνω και το οποίο περιγράφει την δημιουργία και εξέλιξη της διάβρωσης με βελονισμούς, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των τιμών των αγνώστων παραμέτρων  $\mu_0$ ,  $\alpha$ ,  $\mu_\alpha$  και  $\sigma_\alpha$ . Για τον υπολογισμό των τιμών τους χρησιμοποιούνται δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης. Συγκεκριμένα τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν είναι μετρήσεις απώλειας πάχους σε ελάσματα χώρων φορτίου και δεξαμενών έρματος bulk carries και παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες όπου έχουμε την αύξηση του βάθους της διάβρωσης με βελονισμούς σε σχέση με το χρόνο [14].

**1. Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις ελασμάτων σε δεξαμενές έρματος[14]**

Ηλικία (years)	Βάθος διάβρωσης(mm)											
	0	~0.5	~1.0	~1.5	~2.0	~2.5	~3.0	~3.5	~4.0	~4.5	~5.0	5~
4~4.25	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.25~4.5	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.25~7.5	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0
7.75~8	0	0	0	2	4	3	0	0	0	0	0	0
8~8.25	20	9	15	20	7	1	2	0	0	0	0	0
8.25~8.5	0	0	0	0	3	0	1	1	1	0	0	0
8.5~8.75	22	39	42	36	10	1	0	0	0	0	0	0
8.75~9	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9~9.25	0	0	0	1	3	1	0	0	0	0	0	0
9.25~9.5	18	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10.75~11	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
11~11.25	3	18	8	2	3	8	0	0	2	0	0	0
11.75~12	1	24	10	17	6	17	17	1	1	1	0	0
12~12.25	0	0	0	1	4	1	0	0	0	0	0	0
12.25~12.5	3	1	2	8	10	3	5	10	4	1	4	4
12.5~12.75	1	4	13	20	42	31	11	3	2	2	4	0
12.75~13	6	15	20	30	22	18	24	9	4	0	0	0
13~13.25	6	22	25	8	17	18	17	27	1	0	0	0

**2.Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις ελασμάτων σε χώρους φορτίου[14]**

Ηλικία (years)	Βάθος διάβρωσης(mm)											
	0	~0.5	~1.0	~1.5	~2.0	~2.5	~3.0	~3.5	~4.0	~4.5	~5.0	5~
4~4.25	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
4.25~4.5	5	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.25~7.5	9	5	9	2	3	0	0	0	0	0	0	0
7.75~8	0	0	0	5	0	1	0	0	0	0	0	0
8~8.25	18	28	20	17	39	10	4	0	0	0	0	0
8.25~8.5	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0
8.5~8.75	158	136	42	52	39	18	2	0	0	0	0	0
9~9.25	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0
9.25~9.5	15	23	1	1	1	5	0	0	0	0	0	0
10.75~11	0	2	1	2	2	0	3	0	0	0	0	0
11~11.25	9	27	39	37	28	21	17	4	3	0	0	0
11.75~12	7	34	25	25	14	29	38	18	21	5	7	4
12.25~12.5	3	5	4	5	10	19	15	27	27	25	8	0
12.5~12.75	58	52	29	32	24	43	60	68	27	8	0	0
12.75~13	30	35	51	55	50	84	74	39	7	1	0	0
13~13.25	10	98	55	32	39	79	83	94	25	8	0	0

**3.Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις στα κατώτερα stools των δεξαμενών έρματος[14]**

Ηλικία (years)	Βάθος διάβρωσης(mm)											
	0	~0.5	~1.0	~1.5	~2.0	~2.5	~3.0	~3.5	~4.0	~4.5	~5.0	5~
3.5~3.75	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0~4.25	0	3	11	9	1	0	0	0	0	0	0	0
4.25~4.5	6	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.25~7.5	0	2	6	1	0	1	0	0	0	0	0	0
7.5~7.75	0	0	0	0	2	3	0	1	0	0	0	0
7.75~8	0	0	5	5	1	6	0	0	0	0	0	0
8~8.25	0	0	0	9	12	0	1	0	0	0	0	0
8.25~8.5	3	9	5	6	14	6	6	1	0	0	0	0
8.5~8.75	17	19	20	13	8	4	0	0	0	0	0	0
9~9.25	0	1	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.25~9.5	0	0	16	17	6	17	0	0	0	0	0	0
10.75~11	0	0	1	0	1	0	2	1	0	1	0	0
11~11.25	0	18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11.25~11.5	0	0	0	0	2	3	1	2	0	0	0	0
11.75~12	0	2	2	4	4	6	2	4	3	0	0	0
12~12.25	0	0	3	4	5	0	0	0	0	0	0	0
12.25~12.5	0	0	0	0	0	1	3	3	3	0	0	0
12.5~12.75	3	1	0	4	7	1	2	1	0	0	0	0
12.75~13	0	0	0	2	8	8	2	2	0	0	0	0
13~13.25	1	22	24	18	5	6	7	11	5	0	0	0



**4.Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις στα κατώτερα stools των δεξαμενών φορτίου[14]**

Ηλικία (years)	Βάθος διάβρωσης(mm)											
	0	~0.5	~1.0	~1.5	~2.0	~2.5	~3.0	~3.5	~4.0	~4.5	~5.0	5~
3.25~3.5	0	2	9	19	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5~3.75	1	2	6	4	1	0	0	0	0	0	0	0
4~4.25	14	56	63	24	3	0	0	0	0	0	0	0
4.25~4.5	41	119	17	5	1	0	0	0	0	0	0	0
7.25~7.5	0	0	12	30	35	6	1	0	0	0	0	0
7.5~7.75	0	2	2	8	11	8	17	12	0	0	0	0
7.75~8	1	9	10	29	18	41	18	7	1	4	0	0
8~8.25	7	19	32	44	29	22	9	2	0	0	0	0
8.25~8.5	0	20	54	83	92	68	24	19	6	2	2	7
8.5~8.75	24	46	30	94	117	49	41	3	0	0	0	0
8.75~9	0	14	12	12	5	1	1	0	0	0	0	0
9~9.25	0	1	4	5	32	25	3	0	0	0	0	0
9.25~9.5	0	2	21	23	128	25	1	0	0	0	0	0
10.75~11	0	0	0	0	0	0	3	13	18	8	0	0
11~11.25	0	0	1	21	21	46	26	16	15	14	1	4
11.25~11.5	4	0	3	15	33	3	5	1	0	0	0	0
11.75~12	0	5	23	25	31	44	27	51	21	3	0	0
12~12.25	1	3	4	21	12	1	0	0	0	0	0	0
12.25~12.5	0	0	0	1	0	1	15	31	19	2	1	0
12.5~12.75	14	3	4	8	14	39	31	17	15	8	3	0
12.75~13	1	14	16	30	50	54	35	4	0	0	0	0
13~13.25	2	57	10	23	47	153	130	132	43	15	4	2

Στη συνέχεια ακολουθεί η παράθεση του τρόπου υπολογισμού από τους Yamamoto και Ikegami των ζητούμενων παραμέτρων από τα παραπάνω δεδομένα:

- Αρχικά, αν ονομάσουμε  $\Delta t$  τη μονάδα του χρονικού διαστήματος στο οποίο εξετάζουμε το μοντέλο και ο χρόνος που μας ενδιαφέρει στο να αναλύσουμε τη συμπεριφορά της διάβρωσης είναι  $t=N\Delta t$ , η πιθανότητα δημιουργίας σημείων έναρξης διάβρωσης με βελονισμούς στο διάστημα  $[i\Delta t, (i+1)\Delta t]$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_i = F_{r0}[(j+1)\Delta t - G_{Tr}(j\Delta t)] \quad , \quad j=0,1,\dots,(N-1)-i$$

- Στη συνέχεια, αν ονομάσουμε  $\delta$  τη μονάδα του βάθους της διάβρωσης με βελονισμούς, η πιθανότητα το βάθος της διάβρωσης να βρίσκεται στο διάστημα  $[(m-1)\delta, m\delta]$  με την προϋπόθεση ότι ο χρόνος  $\tau$  που πέρασε μετά τη δημιουργία εξελισσόμενων σημείων διάβρωσης με βελονισμούς είναι  $(N-i-j)\Delta t$ , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\xi_{N-i-j}^{(m)} = P_z[m\delta \setminus (N-i-j)\Delta t] - P_z[(m-1)\delta \setminus (N-i-j)\Delta t] \quad [14]$$

Με βάση τα παραπάνω, η πιθανότητα το βάθος της διάβρωσης με βελονισμούς να βρίσκεται στο  $m$  στάδιο μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$X_N^{(m)} = \begin{cases} 1 - \sum_{i=0}^{N-1} f_i \sum_{j=0}^{(N-1)-i} g_f & , m = 0 \\ \sum_{i=0}^{N-1} f_i \sum_{j=0}^{(N-1)-i} g_f \xi_{N-i-j}^{(m)} & , m \geq 1 \end{cases}$$

Για τον υπολογισμό των  $\mu_0$  και  $\alpha$  τα γεγονότα που λαμβάνονται υπόψη είναι το γεγονός να μην έχουμε καθόλου διάβρωση και το γεγονός ότι έχει δημιουργηθεί διάβρωση και εξελίσσεται. Έτσι τα δεδομένα τον χρόνο  $t= k\Delta t$  κατηγοριοποιούνται σε δύο στάδια και σε καθένα από αυτά τα στάδια ο αριθμός των δεδομένων εκφράζεται ως:

$$Y_k^{(1)} = \{Y_k^{(0)}, Y_k (= \sum_{m=1}^M Y_k^m) \}$$

Εάν οι πιθανότητες των δύο αυτών γεγονότων εκφράζονται με την παρακάτω σχέση:

$$X_k^{(1)} = \{X_k^{(0)}, 1 - X_k^{(0)}\}$$

[14]

η πιθανότητα να ανακτήσουμε τα δεδομένα από τις μετρήσεις μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$P_r[Y_k^{(1)}, X_k^{(1)}] = \binom{y_k + y_k^{(0)}}{y_k^{(0)}} \{x_k^{(0)}(\mu_0, \alpha)\}^{y_k^{(0)}} \{1 - x_k^{(0)}(\mu_0, \alpha)\}^{y_k}$$

Εάν ανακτήσουμε δεδομένα μετρήσεων που αντιστοιχούν σε διάφορα χρονικά διαστήματα, τότε η πιθανότητα να ανακτηθούν όλα τα δεδομένα εκφράζεται ως:

$$P_r[Y_k^{(1)}, X_k^{(1)}(k-1, 2, \dots, K)] = \prod_{n=1}^k P_r[Y_k^{(1)}, X_k^{(1)}]$$

Με βάση τα παραπάνω, η συνάρτηση πιθανότητας των αγνώστων παραμέτρων  $\mu_0$  και  $\alpha$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$l(\mu_0, \alpha) = \sum_{n=1}^k [y_k^{(0)} \ln(x_k^{(0)}(\mu_0, \alpha)) + y_k \ln\{1 - x_k^{(0)}(\mu_0, \alpha)\}]$$

Για τον υπολογισμό των αγνώστων παραμέτρων  $\mu_\alpha$  και  $\sigma_\alpha$ , τα γεγονότα τα οποία λαμβάνονται υπόψη είναι η δημιουργία και η εξέλιξη της διάβρωσης με βελονισμούς. Έτσι, τα δεδομένα από μετρήσεις τον χρόνο  $t=k\Delta t$  κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το ποσοστό της μείωσης από τη διάβρωση. Άρα οι αντίστοιχες εξισώσεις για τα  $Y_k^{(1)}, X_k^{(1)}$  είναι οι εξής:

$$Y_k^{(2)} = \{y_k^{(1)}, y_k^{(2)}, \dots, y_k^{(M)}\}$$

$$X_k^{(2)} = \{x_k^{(1)}, x_k^{(2)}, \dots, x_k^{(M)}\}$$

Σε αυτή την περίπτωση, οι πιθανότητες καθενός από το δύο γεγονότα, μπορεί να θεωρηθεί σαν συνάρτηση των  $\mu_\alpha$  και  $\sigma_\alpha$  με την προϋπόθεση ότι οι τιμές των  $\mu_0$  και  $\alpha$  δίνονται. Συνεπώς η πιθανότητα να ανακτήσουμε τα δεδομένα των μετρήσεων μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$P_r[Y_k^{(2)} \setminus X_k^{(2)}] = \frac{y_k!}{\prod_{m=1}^M y_k^{(m)}!} \prod_{m=1}^M \{x_k^{(m)}(\mu_\alpha, \sigma_\alpha \setminus \mu_0, \alpha)\}^{y_k^{(m)}}$$

Έχοντας τα δεδομένα των μετρήσεων για διάφορους χρόνους, η συνάρτηση πιθανότητας των αγνώστων παραμέτρων  $\mu_\alpha$  και  $\sigma_\alpha$  μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$l(\mu_\alpha, \sigma_\alpha \setminus \mu_0, \alpha) = \sum_{k=1}^K [y_k^{(m)} \ln \{x_k^{(m)}(\mu_\alpha, \sigma_\alpha \setminus \mu_0, \alpha)\}] [14]$$

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκαν από τους Yamamoto και Ikegami οι ζητούμενες παράμετροι, οι οποίες δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

		$\mu_0$	$1/a$	$1/b$	$\mu_\alpha$	$\sigma_\alpha$
Έλασμα φρακτής	Ballast Cargo	0.973	3.00	1.5	-0.5532	0.4246
		1.701	1.90	2.0	-0.0374	0.3553
Κατώτερο stool	Ballast Cargo	0.149	2.70	3.0	-0.0115	0.4724
		0.644	1.45	2.0	-0.1774	0.3627

[14]

Έχοντας λοιπόν τις τιμές αυτών των συντελεστών και αντικαθιστώντας τες στα τρία επί μέρους πιθανοθεωρητικά μοντέλα να εφαρμόζεται το μοντέλο των Yamamoto and Ikegami. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί το μοντέλο διότι είναι άγνωστοι οι χρόνοι  $t$ ,  $T_r$  και  $\tau$  που αποτελούν παραμέτρους στα επί μέρους πιθανοθεωρητικά μοντέλα.

#### Σύγκριση του μοντέλου του Yamamoto με το μοντέλο του Melchers

- Το μοντέλο αυτό όπως και το μοντέλο του Melchers υπολογίζει την έναρξη και εξέλιξη του βάθους των βελονισμών.
- Το μοντέλο του Yamamoto αποτελείται από τρία επιμέρους πιθανοθεωρητικά μοντέλα : ένα που προβλέπει τη διάρκεια ζωής του προστατευτικού επιστρώματος , ένα που προβλέπει την έναρξη διάβρωσης με βελονισμούς και ένα που προβλέπει την εξέλιξη της. Σε καθένα από αυτά τα μοντέλα υπάρχουν παράμετροι για τον υπολογισμό των οποίων χρησιμοποιούνται δεδομένα από μετρήσεις απώλειας πάχους. Το μοντέλο του Melchers από την άλλη αποτελείται από τέσσερις φάσεις και κάθε μια βάση περιγράφεται από διαφορετικές εμπειρικές σχέσεις.
- Το μοντέλο του Melchers θεωρεί ότι η μεταλλική κατασκευή που είναι εκτεθειμένη στο διαβρωτικό περιβάλλον δεν διαθέτει προστατευτικό επίστρωμα σε αντίθεση με το μοντέλο του Yamamoto που όχι μόνο τη λαμβάνει υπόψη αλλά και αναπτύσσει μοντέλο για τον υπολογισμό της
- Το μοντέλο του Melchers δεν χρησιμοποιεί άμεσα για την εφαρμογή του δεδομένα από πραγματικές μετρήσεις απώλειας πάχους αλλά περιγράφεται από εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν πειραματικά, σε αντίθεση με το μοντέλο του Yamamoto που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις αυτές για τους υπολογισμούς των παραμέτρων του.
- Το μοντέλο του Melchers λαμβάνει υπόψη την ανάπτυξη και εξέλιξη της βακτηριακής δραστηριότητας ως έναν από τους κύριους παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό διάβρωσης ενώ το μοντέλο του Yamamoto δεν τη λαμβάνει καθόλου υπόψη.

### **3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΕΠΙΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΠΑΧΟΥΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα τα περισσότερα μοντέλα διάβρωσης που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της εξέλιξης της αξιοποιούν για τους υπολογισμούς τους δεδομένα απώλειας πάχους τα οποία αποτελούν μετρήσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων. Για το λόγο αυτό θα ήταν χρήσιμο στην ενότητα αυτή να αναφερθούμε στις απαιτήσεις και στη μεθοδολογία συλλογής των δεδομένων αυτών καθώς και να πραγματοποιήσουμε στατιστική ανάλυση για να διαπιστωθεί η συσχέτιση τους με το χρόνο ώστε να μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της αξιοπιστίας των μοντέλων που βασίζονται σε αυτά.

#### **3.2 Απαιτήσεις για τη συλλογή δεδομένων διάβρωσης**

Οι απαιτήσεις για τη συλλογή δεδομένων διάβρωσης κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης έχουν εισαχθεί για να εξασφαλισθεί ότι τα απαιτούμενα δεδομένα έχουν αποκτηθεί. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν:

- Τον καθορισμό του τύπου της διάβρωσης. Σ' ένα πλοίο εμφανίζονται διάφοροι τύποι διάβρωσης οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενη ενότητα. Οι πιο κοινοί όμως τύποι που παρατηρούνται είναι η ομοιόμορφη διάβρωση και η διάβρωση με βελονισμούς.
- Τις περιοχές του πλοίου που παρατηρείται διάβρωση. Γενικά διάβρωση παρατηρείται στις περιοχές εκείνες που υπάρχει παρουσία θαλασσινού νερού. Παρόλα αυτά διάβρωση παρατηρείται και σε περιοχές που δεν έρχονται απευθείας σε επαφή με το θαλασσινό νερό και αυτό γιατί διάφοροι παράγοντες σε συνδυασμό μεταξύ τους δημιουργούν διαβρωτικά περιβάλλοντα. Η μεγαλύτερη και σοβαρότερη έκταση διάβρωσης παρατηρείται όπου υπάρχουν οριζόντιες επιφάνειες, εξαιτίας της ιδιότητας τους να συλλέγουν και να παγιδεύουν νερό ευνοώντας έτσι την ανάπτυξη διάβρωσης με βελονισμούς. Γενικότερα η σοβαρότητα και η έκταση της διάβρωσης καθορίζονται από διάφορους παράγοντες όπως το είδος του φορτίου, η θερμοκρασία, η υγρασία και το σύστημα προστασίας. Οι παράγοντες που επιδρούν στο ρυθμό διάβρωσης περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενη ενότητα. Από τη συλλογή δεδομένων διάβρωσης έχει παρατηρηθεί ότι οι δεξαμενές έρματος έχουν τους υψηλότερους ρυθμούς διάβρωσης λόγω της επαφής τους με το θαλασσινό νερό. Επίσης οι περιοχές εκείνες στις οποίες παρατηρείται διάβρωση και είναι σημαντικές για την ακεραιότητα της κατασκευής του πλοίου είναι οι παρακάτω:

- Τα ελάσματα του πυθμένα.
  - Τα πλευρικά ελάσματα και τα ενισχυτικά των φρακτών
  - Τα ελάσματα του καταστρώματος.
  - Ειδικές περιοχές στις οποίες παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση τάσεων με αποτέλεσμα την καταστροφή των προστατευτικών επιστρωμάτων, όπως οι ακμές στα πέλματα των διαμηκών ενισχυτικών.
- Τα όργανα μέτρησης του βάθους της διάβρωσης που χρησιμοποιούνται.  
Επειδή οι επιθεωρήσεις στα πλοία πραγματοποιούνται μέσα στα αμπάρια, τα διαμερίσματα και τις δεξαμενές, η πρόσβαση στους χώρους αυτούς γίνεται μέσω των στομιών κυτών ή των ανθρωποθυρίδων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτούνται φορητά όργανα μέτρησης τα οποία πρέπει να είναι ελαφριά ώστε να μεταφέρονται από ένα μόνο άτομο και να μπορούν εύκολα να διαβαστούν. Επίσης τα όργανα αυτά πρέπει να είναι ανθεκτικά σε συνθήκες υγρασίας και υψηλής θερμοκρασίας. Εκτός από τα όργανα μέτρησης σημαντικό ρόλο παίζει η εμπειρία και η εκπαίδευση των ατόμων που τα χρησιμοποιούν έτσι ώστε να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν ακριβή αποτελέσματα στις μετρήσεις [15].

### **3.3 Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων κατά τη διάρκεια της επιθεώρησης**

Η μεθοδολογία αυτή αφορά τις διαδικασίες για την απόκτηση, την καταγραφή και την ανάλυση των δεδομένων και αποτελείται από τέσσερα τμήματα τα οποία είναι τα παρακάτω:

- Η απόκτηση των δεδομένων. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον ορισμό, τη μέτρηση και την καταγραφή των δεδομένων. Η έκταση της επιθεώρησης για την απόκτηση των δεδομένων διαφέρει από πλοίο σε πλοίο, γενικά όμως απαιτείται η εξασφάλιση της ικανοποιητικής ακρίβειας των δεδομένων. Για να επιτευχθεί αυτή η ακρίβεια θα πρέπει να πραγματοποιούνται ενέργειες που αφορούν:
- Το σχεδιασμό της διαδικασίας της επιθεώρησης. Δηλαδή ο πλήρης καθορισμός των κατασκευαστικών στοιχείων που θα ελεγχθούν έτσι ώστε τα δεδομένα που θα αποκτηθούν να είναι αντιπροσωπευτικά των ρυθμών διάβρωσης του πλοίου. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει επίσης και την απόκτηση των δεδομένων από προηγούμενη επιθεώρηση του ίδιου πλοίου ώστε ο επιθεωρητής να έχει καλύτερη εικόνα της γενικής κατάστασης του πλοίου για να επικεντρωθεί σε συγκεκριμένες περιοχές ώστε να συλλέξει τα δεδομένα.

- Την ασφάλεια και την πρόσβαση στις περιοχές που θα επιθεωρηθούν. Δηλαδή την ύπαρξη κατάλληλης ατμόσφαιρας (π.χ περιεκτικότητα σε οξυγόνο), θερμοκρασίας, φωτισμού, εξοπλισμού και κατάλληλων μεθόδων διάσωσης σε περίπτωση κινδύνου.
  - Τα όργανα μέτρησης. Οι συσκευές που λειτουργούν με υπερήχους είναι ο πιο κοινός τύπος οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του πάχους των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου.
- Η καταγραφή των δεδομένων. Η καταγραφή των δεδομένων γίνεται με κώδικες κατάταξης οι οποίοι αποτελούνται από εννέα χαρακτήρες οι οποίοι αντιπροσωπεύουν:
- Τον τύπο του πλοίου.
  - Τον αριθμό της σειράς του πλοίου με την οποία είναι καταγεγραμμένο στη βάση δεδομένων.
  - Το διαμέρισμα του πλοίου στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις
  - Το είδος της κατασκευής που έγιναν οι μετρήσεις.
  - Τον αριθμό του πάνελ. Ο όρος πάνελ χρησιμοποιείται σαν γενικός όρος για τα ελάσματα, τα ενισχυτικά ή για το δίκτυο μιας συγκεκριμένης κατασκευής.

Ένα παράδειγμα κώδικα κατάταξης των δεδομένων είναι το παρακάτω:

C08B4SSP2

Όπου:

CO= container ship

08= number 8

B4= number 4 ballast tank

SSP= side shell plating

2 = panel number 2 [15]

- Η ανάλυση των δεδομένων. Αφού τα δεδομένα έχουν καταγραφεί σε βάσεις δεδομένων μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του ρυθμού διάβρωσης με τη χρήση μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί ή άλλων μεθόδων ανάλυσης όπως πεπερασμένα στοιχεία ή στατιστικές μέθοδοι [15].

### 3.4 Στατιστική ανάλυση δεδομένων για την εύρεση της συσχέτισης του χρόνου και της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης.

Για την πραγματοποίηση της στατιστικής ανάλυσης για την εύρεση συσχέτισης χρόνου και απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις βάσεις δεδομένων των Lloyd's register, του Paik και των Yamamoto and Ikegami. Η εύρεση της συσχέτισης είναι αναγκαία έτσι ώστε να είναι δικαιολογημένη η χρήση τους στα μοντέλα διάβρωσης.

#### 3.4.1 Στατιστική ανάλυση με βάση τα δεδομένα της Lloyd's register

Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης αυτής χρησιμοποιήθηκαν 6421 δεδομένα τα οποία είχαν την παρακάτω μορφή.

VESSEL TYPE	AGE	DEFECT TYPE	LOCATION 1	LOCATION 2	LOCATION 3	No of hull defects
BARGE	13,26	EXCESSIVE WASTAGE	FRESH WATER TANK	SIDE SHELL	PLATING	1
	13,86	EXCESSIVE WASTAGE	HOLD	LONGITUDINAL BULKHEAD	PLATING	2
				TRANSVERSE BULKHEAD	PLATING	2
	14,78	EXCESSIVE WASTAGE		LONGITUDINAL BULKHEAD	PLATING	3
				TRANSVERSE BULKHEAD	PLATING	2
	19,24	EXCESSIVE WASTAGE		TANK TOP (INNER BOTTOM)	PLATING	3
				TRANSVERSE BULKHEAD	PLATING	1
				LONGITUDINAL BULKHEAD	PLATING	3
	20,3	EXCESSIVE WASTAGE		TANK TOP (INNER BOTTOM)	PLATING	3
				TRANSVERSE BULKHEAD	PLATING	2
				LONGITUDINAL BULKHEAD	PLATING	3
	0,05	HOLED (CORROSION)	SIDE TANK	BOTTOM SHELL	PLATING	1
	13,86	EXCESSIVE WASTAGE		TRANSVERSE BULKHEAD	PLATING	1
18,24	EXCESSIVE WASTAGE		LONGITUDINAL	PLATING	2	



				BULKHEAD		
					TRANSVERSE	1
				SIDE SHELL	TRANSVERSE	1
	20,3	EXCESSIVE WASTAGE	UPPER DECK	TRANSVERSE HATCH COAMING	PLATING	3
	4,82	PITTED	WING BALLAST TANK	BOTTOM SHELL	PLATING	5
				SIDE SHELL	PLATING	5

Τα παραπάνω δεδομένα όπως παρουσιάζονται αφορούν έναν τύπο πλοίου. Συνολικά τα 6421 δεδομένα αφορούν επτά διαφορετικούς τύπους πλοίων και για κάθε τύπο παρουσιάζονται με την παραπάνω μορφή η οποία περιλαμβάνει την ηλικία του πλοίου , το είδος της διάβρωσης και τις περιοχές εμφάνισης της διάβρωσης που αντιστοιχούν σε αυτή την ηλικία και τον αριθμό των παρατηρήσεων της διάβρωσης για κάθε ηλικία. Οι τύποι πλοίων στους οποίους αναφέρονται είναι οι εξής:

- BARGE
- BARGE CONTAINERSHIP
- BULK CARRIER
- BULK CARRIER ( GREAT LAKES)
- BULK CONTAINERSHIP
- BUOY SHIP
- CEMENT CARRIER

Πριν περιγραφεί η διαδικασία της ανάλυσης σημειώνεται ότι για την περιγραφή της διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο δεν χρησιμοποιούνται αριθμητικά δεδομένα που να περιγράφουν την απώλεια πάχους ( δηλαδή πόσα mm απώλειας πάχους είχαμε σε σχέση με το χρόνο) αλλά χρησιμοποιείται χαρακτηρισμός του είδους της διάβρωσης και του αριθμού εμφάνισής της τον συγκεκριμένο χρόνο.

Συνολικά έχουμε τέσσερις χαρακτηρισμούς της διάβρωσης:

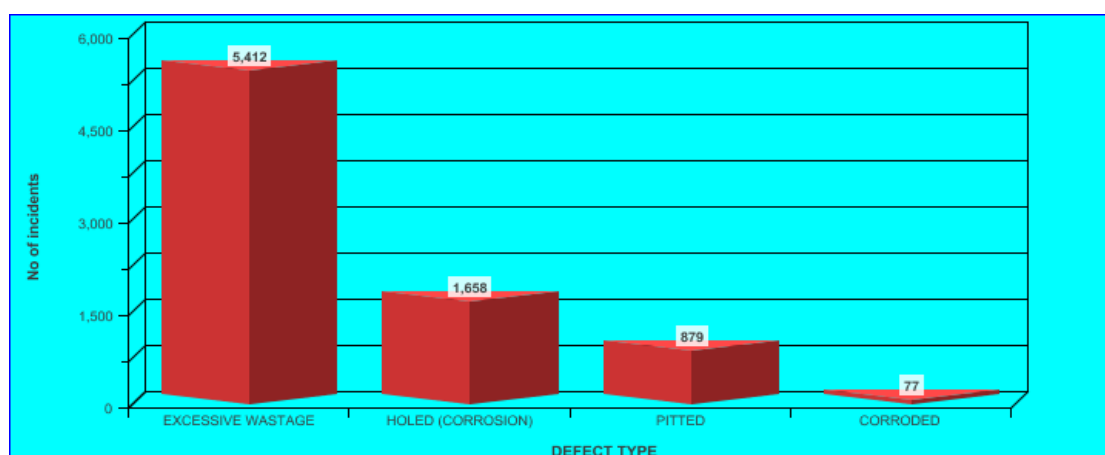
- EXCESSIVE WASTAGE : αναφέρεται στην διάβρωση που έχει υπερβεί το επιτρεπόμενο όριο
- PITTED CORROSION : Αναφέρεται στην τοπική διάβρωση με βελονισμούς.
- CORRODED : Αναφέρεται στην περίπτωση που η διάβρωση δεν υπερβαίνει το 30% των επιτρεπόμενων ορίων διάβρωσης
- HOLED (CORROSION)

Σημειώνεται ότι τα δεδομένα αυτά λόγω του γεγονότος ότι η διάβρωση δεν αντιπροσωπεύεται από νούμερα δεν είναι αξιοποιήσιμα από τα μοντέλα διάβρωσης για την πρόβλεψη της διάβρωσης στα επόμενα χρόνια. Η ανάλυσή τους όμως είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί γιατί λόγω του μεγάλου αριθμού τους δίνουν μια καλύτερη εικόνα για το αν η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης συσχετίζεται με το χρόνο.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυσή τους περιγράφεται παρακάτω.

Αρχικά υπολογίσθηκαν για κάθε τύπο πλοίο ο συνολικός αριθμός εμφάνισης του κάθε είδους διάβρωσης . Στην συνέχεια ταξινομήθηκαν οι ηλικίες κατά αύξουσα σειρά και για κάθε ηλικία υπολογίστηκε ο αριθμός εμφάνισης κάθε τύπου διάβρωσης. Επίσης και για κάθε περιοχή του πλοίου υπολογίστηκε ο αριθμός εμφάνισης κάθε είδους διάβρωσης. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται για έναν τύπο πλοίου στους πίνακες που βρίσκονται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα δεδομένα. Σχηματικά ο συνολικός αριθμός του κάθε είδους διάβρωσης από όλα συνολικά τα δεδομένα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Παρατηρούμε ότι η συχνότερα εμφανιζόμενη μορφή διάβρωσης είναι η excessive wastage, ακολουθεί η holed(corrosion) , στη συνέχεια η pitted και τέλος η corroded. Με βάση την πρωτογενή επεξεργασία των δεδομένων που περιγράφηκε παραπάνω πραγματοποιήθηκαν τρεις στατιστικές συσχετίσεις οι οποίες αφορούσαν:

- Τη συσχέτιση του είδους της διάβρωσης με τις περιοχές εμφάνισής της.
- Τη συσχέτιση του είδους της διάβρωσης με τον τύπο του πλοίου.
- Τη συσχέτιση του είδους της διάβρωσης με την ηλικία του πλοίου.

Οι μέθοδοι στατιστικής συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- Η μέθοδος του  $\chi^2$ . Η μέθοδος αυτή συσχετίζει δύο ποιοτικές μεταβλητές μεταξύ τους και στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση είδους διάβρωσης και περιοχής εμφάνισής της και για τη συσχέτιση είδους διάβρωσης και τύπου πλοίου. Για να διαπιστωθεί εάν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών ή αν είναι ανεξάρτητες ελέγχεται εάν ισχύει η σχέση  $\chi^2 = \sum_{i=1}^{nm} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} > \sum_{i=1}^{nm} \frac{((O_i - E_i) - 0,5)^2}{E_i}$ . Εάν ισχύει η σχέση αυτή τότε τα δεδομένα σχετίζονται αλλιώς είναι ανεξάρτητα [16].

Η διαδικασία περιγράφεται στους παρακάτω πίνακες για όλους του τύπους πλοίων και για τα δύο είδη συσχετίσεων:

#### 1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ ΤΗΣ

Τυπος πλοίου

BARGE

LOCATION 1	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	Sum
FRESH WATER TANK	1	0	0	1
HOLD	21	0	0	21
SIDE TANK	5	0	1	6
UPPER DECK	3	0	0	3
WING BALLAST TANK	0	10	0	10
	30	10	1	41

O	E	O-E	(O-E) <sup>2</sup>	(O-E) <sup>2</sup> /E	O-E-0,5	(O-E-0,5) <sup>2</sup>	(O-E-0,5) <sup>2</sup> /E
1	0,731707	0,268293	0,071981	0,098374	-0,23171	0,053688	0,073374
0	0,243902	-0,2439	0,059488	0,243902	-0,7439	0,553391	2,268902
0	0,02439	-0,02439	0,000595	0,02439	-0,52439	0,274985	11,27439
21	15,36585	5,634146	31,7436	2,065854	5,134146	26,35946	1,715457
0	5,121951	-5,12195	26,23438	5,121951	-5,62195	31,60634	6,170761
0	0,512195	-0,5122	0,262344	0,512195	-1,0122	1,024539	2,00029
5	4,390244	0,609756	0,371802	0,084688	0,109756	0,012046	0,002744
0	1,463415	-1,46341	2,141582	1,463415	-1,96341	3,854997	2,634248
1	0,146341	0,853659	0,728733	4,979675	0,353659	0,125074	0,854675
3	2,195122	0,804878	0,647829	0,295122	0,304878	0,092951	0,042344
0	0,731707	-0,73171	0,535396	0,731707	-1,23171	1,517103	2,073374
0	0,073171	-0,07317	0,005354	0,073171	-0,57317	0,328525	4,489837
0	7,317073	-7,31707	53,53956	7,317073	-7,81707	61,10663	8,35124
10	2,439024	7,560976	57,16835	23,43902	7,060976	49,85738	20,44152
0	0,243902	-0,2439	0,059488	0,243902	-0,7439	0,553391	2,268902
				46,69444			64,66206
		ΕΙΝΑΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ					

Η διαδικασία εύρεσης της συσχέτισης για τους υπόλοιπους τύπους πλοίων παρατίθενται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΥΠΟΥ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΚΑΙ ΤΥΠΟΥ ΠΛΟΙΟΥ

ΤΥΠΟΣ ΠΛΟΙΟΥ	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	CORRODED	sum
BARGE	30	10	1	0	41
BARGE CONT	14	0	0	0	14
BULK	5504	107	412	18	6041
BULK (G.L)	73	0	8	0	81
BULK CONT	353	9	6	0	368
BUOY	14	2	1	0	17
CEMENT	59	3	11	0	73
	6047	131	439	18	6635

O	E	O-E	(O-E)^2	(O-E)^2/E	O-E-0,5	(O-E-0,5)^2	(O-E-0,5)^2/E
30	37,36654	-7,36654	54,26593	1,45226	-7,86654	61,88247	1,656093
10	0,809495	9,190505	84,46538	104,3433	8,690505	75,52488	93,29874
1	2,712735	-1,71274	2,933463	1,081367	-2,21274	4,896198	1,804893
0	0,111228	-0,11123	0,012372	0,111228	-0,61123	0,3736	3,358857
14	12,75931	1,240693	1,53932	0,120643	0,740693	0,548627	0,042998
0	0,276413	-0,27641	0,076404	0,276413	-0,77641	0,602817	2,180857
0	0,9263	-0,9263	0,858032	0,9263	-1,4263	2,034331	2,196191
0	0,03798	-0,03798	0,001443	0,03798	-0,53798	0,289423	7,620322
5504	5505,641	-1,64084	2,692369	0,000489	-2,14084	4,583213	0,000832
107	119,2722	-12,2722	150,6067	1,262714	-12,7722	163,1289	1,367703
412	399,6984	12,30158	151,3289	0,378608	11,80158	139,2773	0,348456
18	16,38855	1,611454	2,596785	0,158451	1,111454	1,235331	0,075378
73	73,8217	-0,8217	0,675196	0,009146	-1,3217	1,746899	0,023664
0	1,599246	-1,59925	2,557589	1,599246	-2,09925	4,406836	2,75557
8	5,359307	2,640693	6,973261	1,30115	2,140693	4,582568	0,855067
0	0,219744	-0,21974	0,048287	0,219744	-0,71974	0,518031	2,357432

353	335,3875	17,61251	310,2005	0,924902	17,11251	292,838	0,873133
9	7,265712	1,734288	3,007754	0,413966	1,234288	1,523467	0,209679
6	24,34846	-18,3485	336,6658	13,82699	-18,8485	355,2643	14,59083
0	0,998342	-0,99834	0,996687	0,998342	-1,49834	2,245029	2,248757
14	15,49344	-1,49344	2,230375	0,143956	-1,99344	3,973818	0,256484
2	0,335644	1,664356	2,77008	8,253022	1,164356	1,355724	4,039169
1	1,124793	-0,12479	0,015573	0,013845	-0,62479	0,390366	0,347056
0	0,046119	-0,04612	0,002127	0,046119	-0,54612	0,298246	6,466871
59	66,53067	-7,53067	56,711	0,852404	-8,03067	64,49167	0,969352
3	1,441296	1,558704	2,429558	1,685676	1,058704	1,120854	0,777671
11	4,829992	6,170008	38,06899	7,881791	5,670008	32,14899	6,656115
0	0,198041	-0,19804	0,03922	0,198041	-0,69804	0,487261	2,460408
				148,5181			159,8386
				ΕΙΝΑΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ			

Με βάση τα παραπάνω παρατηρούμε ότι τα είδη διάβρωσης και οι περιοχές στις οποίες εμφανίζονται είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους όπως επίσης και τα είδη διάβρωσης σε σχέση με τον τύπο του πλοίου. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι το που θα εμφανισθεί το κάθε είδος διάβρωσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες των οποίων η επίδραση στην εξέλιξη της διάβρωσης των κατασκευαστικών στοιχείων καθώς και στο είδος της διάβρωσης, δεν μπορεί να προβλεφθεί με κάποια μέθοδο λόγω της περιπλοκότητας της συμπεριφοράς τους.

- Ο δείκτης biserial. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μικτών διμεταβλητών όταν η κατηγορική μεταβλητή έχει δύο μόνο κατηγορίες. Η άλλη μεταβλητή είναι ποσοτική. Στην προκειμένη περίπτωση η ποσοτική μεταβλητή είναι η ηλικία του πλοίου ενώ η ποιοτική είναι το είδος της διάβρωσης. Η συσχέτιση αυτή είναι πιο σημαντική από εκείνες που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω γιατί καθορίζει εάν το είδος της διάβρωσης συσχετίζεται με τον χρόνο. Ο τύπος του δείκτη biserial είναι ο παρακάτω:

$$r_{\text{bis}} = \frac{(X_1 - X_2) \sqrt{n_1 n_2}}{SN}$$

όπου  $X_1, X_2$  είναι οι μέσοι όροι των γινομένων των τιμών της αριθμητικής μεταβλητής επί της συχνότητας εμφάνισής της για καθεμία από τις δύο κατηγορίες της κατηγορικής μεταβλητής,  
 $v_1, v_2$  οι αριθμοί των ατόμων των δύο κατηγοριών της κατηγορικής μεταβλητής,  
 $N$  ο συνολικός πληθυσμός, δηλαδή  $N = v_1 + v_2$ ,  
 $S$  η τυπική απόκλιση της αριθμητικής μεταβλητής για όλο τον πληθυσμό.  
ο δείκτης biserial παίρνει τιμές  $0 < r_{bis} < 1$ . Όσο πιο κοντά βρίσκεται στο 1 τόσο μεγαλύτερη είναι η συσχέτιση των δεδομένων, ενώ αν βρίσκεται κοντά στο μηδέν η συσχέτιση είναι ασθενής έως καθόλου [17].  
Η διαδικασία της συσχέτισης ηλικιών και ειδών διάβρωσης με τον δείκτη biserial φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

τύπος πλοίου barge

AGE	DEFECT TYPE	No of hull defects	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	x1	x1^2	x2	x2^2
0,05	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
4,82	PITTED	5	0	5	0	0	24,1	116,162
4,82	PITTED	5	0	5	0	0	24,1	116,162
13,26	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	13,26	175,8276	0	0
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	27,72	384,1992	0	0
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	27,72	384,1992	0	0
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	41,58	576,2988	0	0
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	13,86	192,0996	0	0
14,78	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	29,56	436,8968	0	0
18,24	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	36,48	665,3952	0	0
18,24	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,24	332,6976	0	0
18,24	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,24	332,6976	0	0
19,24	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	19,24	370,1776	0	0
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	60,9	1236,27	0	0
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	60,9	1236,27	0	0
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	40,6	824,18	0	0
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	60,9	1236,27	0	0

20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	60,9	1236,27	0	0
			30	10	530,1	9619,749	48,2	232,324
					17,67		4,82	
x			S	rbis				
14,4575	246,3018	209,0193	6,105942	0,911278				

ΥΠΑΡΧΕΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

Η διαδικασία υπολογισμού της συσχέτισης για τους υπόλοιπους τύπους πλοίων παρατίθενται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας. Επίσης οι συσχετίσεις έγιναν ανά δύο ποιοτικές μεταβλητές δηλαδή είδη διάβρωσης. Γενικά παρατηρείται ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ χρόνου και διάβρωσης, άρα τα δεδομένα από μετρήσεις διάβρωσης κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα διάβρωσης για την πρόβλεψη της εξέλιξής της τα επόμενα χρόνια.

### 3.4.2 Στατιστική ανάλυση με βάση τα δεδομένα του Paik και των Yamamoto and Ikegami

Η στατιστική ανάλυση για την εύρεση της συσχέτισης χρόνου και απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης στα δεδομένα του Paik και των Yamamoto and Ikegami, πραγματοποιήθηκε με τον συντελεστή προσδιορισμού ή προσαρμογής  $R^2$ . Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για την εύρεση της συσχέτισης μεταξύ ποσοτικών μεταβλητών γιατί στην προκειμένη περίπτωση η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης ανάλογα με την ηλικία του πλοίου αντιπροσωπεύεται από αριθμούς όπως και οι ηλικία των πλοίων. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το ποσοστό των μεταβολών της εξαρτημένης μεταβλητής που ερμηνεύεται από τις μεταβολές της ανεξάρτητης μεταβλητής και παίρνει τιμές  $0 < R^2 < 1$ . Όταν ο  $R^2$  είναι μικρότερος από 0,5 δεν υπάρχει καμία συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών, ενώ αν είναι μεγαλύτερος υπάρχει συσχέτιση. Όσο πιο κοντά είναι ο  $R^2$  στο 1 τόσο μεγαλύτερη είναι και η συσχέτιση.

Ο  $R^2$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} \text{ όπου:}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum f_{y_j} y_j^2 - a \sum f_{y_j} y_j - \sum \sum f_{ij} X_i Y_j}{v}$$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum f_{y_j} y_j^2}{v} - \left( \frac{\sum f_{y_j} y_j}{v} \right)^2$$



$$b_1 = \frac{n \sum \sum f_{ij} x_i y_j - \sum f_{x_i} x_i \sum f_{y_j} y_j}{n \sum f_{x_i} x_i^2 - (\sum f_{x_i} x_i)^2}$$

$$X = \frac{\sum f_{y_j}}{\sum f_{x_i}}$$

$$Y = \frac{\sum f_{y_j} y_j}{\sum f_{x_i}}$$

$$a = Y - b_1 X$$

όπου  $x_i, y_j$  οι τιμές των δύο αριθμητικών μεταβλητών ανά γραμμή ή στήλη αντίστοιχα και  $f_{x_i}, f_{y_j}$  οι συχνότητες εμφάνισης των  $x_i, y_j$  ανά γραμμή ή στήλη αντίστοιχα[18].

Η ανάλυση αυτή που πραγματοποιήθηκε στα συγκεκριμένα δεδομένα φαίνεται στους παρακάτω πίνακες:

**Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις ελασμάτων σε δεξαμενές έρματος( Δεδομένα Paik) [7]**

Ηλικία (years)	Βάθος διάβρωσης(mm)							
			0~0,5	0,5~1	1~1,5	1,5~2	2,0~2,5	2,5~3
			0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75
11	11,5	11,25	2	0	0	0	0	0
11,5	12	11,75	18	5	0	0	0	0
12	12,5	12,25	6	3	9	0	0	0
12,5	13	12,75	23	2	0	0	0	0
13	13,5	13,25	16	28	30	2	0	0
13,5	14	13,75	9	0	0	0	0	0
14	14,5	14,25	3	3	0	0	0	0
14,5	15	14,75	1	2	0	0	0	0
15	15,5	15,25	22	13	10	3	2	0
15,5	16	15,75	9	1	0	0	0	0
16	16,5	16,25	5	0	0	0	0	0

16,5	17	16,75	12	8	5	2	1	1	
17	17,5	17,25	19	1	0	0	0	0	
17,5	18	17,75	84	1	2	4	0	0	
18	18,5	18,25	34	26	37	9	4	3	
18,5	19	18,75	1	0	2	0	0	0	
19	19,5	19,25	53	11	11	8	7	2	
19,5	20	19,75	84	9	1	0	2	0	
20	20,5	20,25	169	48	11	3	1	0	
20,5	21	20,75	10	14	11	10	16	2	
21	21,5	21,25	105	115	27	24	5	6	
21,5	22	21,75	9	1	1	2	2	0	
22	22,5	22,25	44	39	4	9	7	5	
22,5	23	22,75	8	18	1	3	0	0	
23	23,5	23,25	67	46	11	5	3	5	
23,5	24	23,75	8	3	1	0	0	0	
24	24,5	24,25	41	27	8	2	0	0	
24,5	25	24,75	18	15	2	0	0	0	
25	25,5	25,25	30	49	48	57	40	2	
25,5	26	25,75	10	1	1	2	0	0	
26	26,5	26,25	8	8	1	0	0	0	
26,5	27	26,75	0	7	1	0	0	0	
		fyj	928	504	235	145	90	26	Sum
		fyj*yj	232	378	293,75	253,75	202,5	71,5	1431,5
		fyj*yj^2	58	283,5	367,1875	444,062	455,62	196,62	1805
		Σfijxiyi	4630,25	7982,6	5869,688	5671,31	4572	1531,7	30184,31

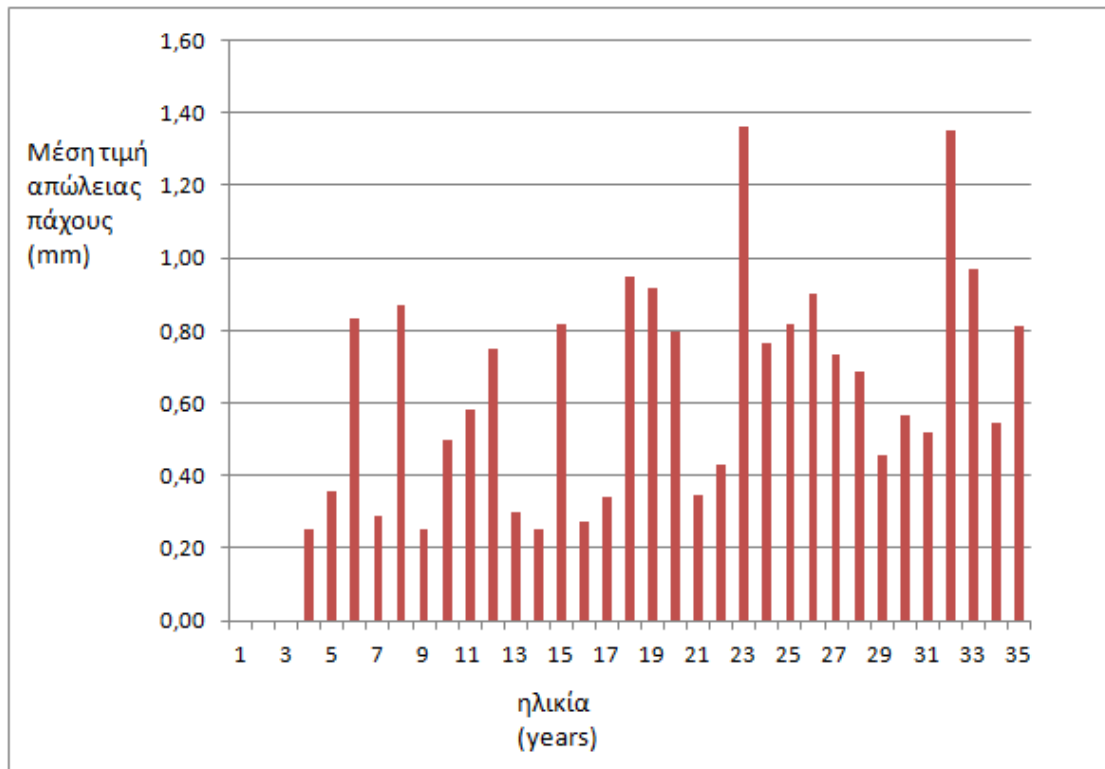
	fxi	fxi*xi	fxi*xi^2		
	2	22,5	253,125		
	23	270,25	3175,438		
	18	220,5	2701,125		
	25	318,75	4064,063		
	76	1007	13342,75		
	9	123,75	1701,563		
	6	85,5	1218,375		
	3	44,25	652,6875		
	50	762,5	11628,13		
	10	157,5	2480,625		
	5	81,25	1320,313		
	29	485,75	8136,313		
	20	345	5951,25		
	91	1615,25	28670,69		
	113	2062,25	37636,06		
	3	56,25	1054,688		
	92	1771	34091,75		
	96	1896	37446		
	232	4698	95134,5		
	63	1307,25	27125,44		
	282	5992,5	127340,6		
	15	326,25	7095,938		
	108	2403	53466,75		
	30	682,5	15526,88		
	137	3185,25	74057,06		
	12	285	6768,75		
	78	1891,5	45868,88		
	35	866,25	21439,69		
	226	5706,5	144089,1		
	14	360,5	9282,875		
	17	446,25	11714,06		
	8	214	5724,5		
sum	1928	39690	840160		
b1	X	Y	A	$\sigma^2$	$\sigma_y^2$
0,030969	20,5861	0,742479	0,10495	0,373438	0,384928
R^2	0,029849				

Παρατηρούμε ότι σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις δεν υπάρχει συσχέτιση χρόνου και απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αριθμός των δεδομένων που διαθέτουμε από τις συγκεκριμένες βάσεις είναι μικρός και τα δεδομένα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά η οποία φαίνεται από τον υπολογισμό μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης της απώλειας πάχους ανά ηλικία.

Ηλικία (years)	Μέση τιμή (mm)	Τυπική απόκλιση
11,25	0,25	0,00
11,75	0,36	0,21
12,25	0,83	0,45
12,75	0,29	0,14
13,25	0,87	0,40
13,75	0,25	0,00
14,25	0,50	0,25
14,75	0,58	0,24
15,25	0,75	0,56
15,75	0,30	0,15
16,25	0,25	0,00
16,75	0,82	0,65
17,25	0,28	0,11
17,75	0,34	0,34
18,25	0,95	0,62
18,75	0,92	0,47
19,25	0,80	0,78
19,75	0,35	0,33
20,25	0,43	0,34
20,75	1,36	0,75
21,25	0,77	0,57
21,75	0,82	0,77
22,25	0,90	0,81
22,75	0,73	0,42
23,25	0,69	0,61
23,75	0,46	0,32
24,25	0,56	0,38
24,75	0,52	0,30
25,25	1,35	0,70
25,75	0,97	1,17
26,25	0,54	0,30
26,75	0,81	0,17

--	--	--

Επίσης κάνοντας το διάγραμμα της μέσης τιμής της απώλειας πάχους ανά ηλικία (οριζόντιος άξονας ηλικία, κατακόρυφος απώλεια πάχους) παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις δεν μας δίνουν ένα σαφές αποτέλεσμα αν και παρατηρείται η τάση αύξησης της μέσης τιμής της μείωσης του πάχους με την ηλικία.



Παρόλα αυτά όμως τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης με τη χρήση μοντέλων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα και θα χρησιμοποιηθούν επίσης για την εκτίμηση της εναπομένουσας αντοχής της μέσης τομής του πλοίου κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή όπου θα πραγματοποιηθεί και εκτίμηση με βάση το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ηλικία πλοίου.

## **4. ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΟΜΗΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ**

### **4.1 Εισαγωγή**

Η απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης, η οποία μπορεί να προβλεφθεί με τα μοντέλα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μπορεί να μειώσει την αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου. Η μείωση αυτή μπορεί να επιδράσει τόσο σε επίπεδο τοπικής αντοχής δηλαδή να έχουμε αστοχία κάποιων κατασκευαστικών στοιχείων, όσο και σε επίπεδο ολικής αντοχής και να έχουμε απώλεια του πλοίου. Τα δύο είδη διάβρωσης όπως είδαμε είναι η γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση και η τοπική διάβρωση γι' αυτό τα μοντέλα που περιγράφηκαν παραπάνω αφορούν την ομοιόμορφη διάβρωση και μια κατηγορία τοπικής διάβρωσης, τη διάβρωση με βελονισμούς.

Η αντοχή ενός κατασκευαστικού στοιχείου που έχει υποστεί ομοιόμορφη διάβρωση, μπορεί εύκολα να προβλεφθεί απλά αφαιρώντας την απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης και χρησιμοποιώντας την τιμή του μειωμένου πάχους στις σχέσεις ή στα μοντέλα που δίνουν την αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων. Τα πράγματα όμως γίνονται περίπλοκα στην περίπτωση της διάβρωσης με βελονισμούς. Ένας τρόπος υπολογισμού της αντοχής είναι να θεωρήσουμε μια ισοδύναμη απώλεια πάχους και να χρησιμοποιήσουμε την τιμή του πάχους που απομένει στις σχέσεις ή στα μοντέλα που μας δίνουν την αντοχή.

### **4.2 Η ιεράρχηση των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου και η αντοχή τους**

#### **4.2.1 Η ιεράρχηση των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου**

Η γάστρα του πλοίου απαρτίζεται από ένα σύστημα κατασκευαστικών στοιχείων, όπου τα ελάσματα αντιπροσωπεύουν το κατώτερο επίπεδο αυτού του συστήματος (δηλ. είναι το κατασκευαστικό στοιχείο που παραλαμβάνει πρώτο τα φορτία) και ολόκληρο το πλοίο σαν δοκός, το ανώτερο επίπεδο. Μεταξύ αυτών κατά αύξουσα σειρά επιπέδων βρίσκονται τα ενισχυτικά, οι δοκοί, οι νομείς και τα πάνελ. Καθένα από αυτά τα στοιχεία εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο σκοπό από τοπική άποψη και ταυτόχρονα παίζει και ένα συγκεκριμένο ρόλο στο όλο σύστημα των κατασκευαστικών στοιχείων.

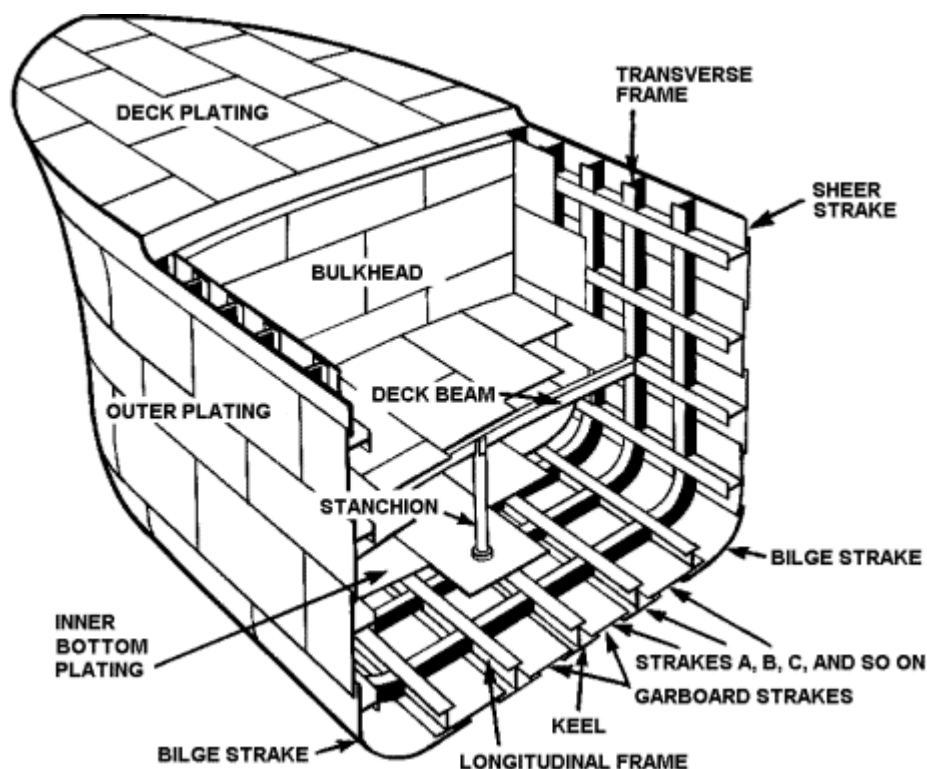
Παρακάτω ακολουθεί η περιγραφή της μεταφοράς του φορτίου από τα στοιχεία που βρίσκονται στο κατώτερο επίπεδο της ιεραρχίας του συστήματος στα στοιχεία που βρίσκονται στο ανώτερο:

Αρχικά τα ελάσματα τόσο του πυθμένα όσο και τα πλευρικά, που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, φέρουν τα φορτία που προκύπτουν από τις υδροστατικές φορτίσεις.

Το έλασμα όμως μόνο του δεν έχει την ικανότητα να φέρει την υδροστατική πίεση στις μεγάλες σε έκταση περιοχές. Για το σκοπό αυτό πρέπει να ενισχύεται. Το επόμενο κατασκευαστικό στοιχείο, το ενισχυτικό δηλαδή εισάγεται για να υποστηρίξει το έλασμα. Τα ενισχυτικά όμως, δεν μπορούν να μεταφέρουν το φορτίο από το έλασμα σε κάθε κατεύθυνση και πρέπει να υποστηρίζονται από νομείς. Τα συνδυασμένα φορτία από τα ενισχυτικά, μεταφέρονται μέσω των νομέων στις φρακτές και στις πλευρές του πλοίου.

Τα ελάσματα του πλοίου υποδιαιρούνται σε ορθογωνικές περιοχές, οι οποίες ορίζονται από δύο παράλληλα ενισχυτικά και δύο παράλληλους νομείς. Η υδροστατική πίεση η οποία ασκείται κάθετα και ομοιόμορφα στην ορθογωνική περιοχή μεταφέρεται πρώτα στα ενισχυτικά και μόνο πολύ μικρά φορτία μεταφέρονται απευθείας από το έλασμα στους νομείς[19].

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα κατασκευαστικά στοιχεία που απαρτίζουν τη γάστρα του πλοίου:



Οι διάφορες δυνάμεις που ασκούνται στα κατασκευαστικά στοιχεία έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων οι οποίες ιεραρχούνται ως πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες τάσεις.

- Οι πρωτεύουσες τάσεις οφείλονται στη διαμήκη κάμψη του πλοίου και παραμένουν σταθερές σε διατομές παράλληλες με τον ουδέτερο άξονα της διατομής( πυθμένας, καταστρώματα).
- Οι δευτερεύουσες τάσεις προκύπτουν από τη φόρτιση συστήματος έλασμα – ενισχυτικό με κάθετη φόρτιση.
- Οι τριτεύουσες τάσεις είναι αυτές που αναπτύσσονται σε απλά ελάσματα που στηρίζονται σε δοκούς κατά μήκος των πλευρών τους και μεταβάλλονται κατά το πάχος του ελάσματος. Η κατανομή τους εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες και μεγιστοποιείται σ' ένα σημείο ή σ' έναν περιορισμένο αριθμό σημείων γι ' αυτό καλούνται και σημειακές.

Για κάθε στοιχείο της κατασκευής , η τελική εντατική κατάσταση είναι η επαλληλία των τάσεων σε κάθε επίπεδο , έτσι ώστε κάθε στοιχείο να συμβάλλει στην αντοχή της κατασκευής σε διάφορα επίπεδα [20].

#### 4.2.2 Η αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου

Η αντοχή του πλοίου διακρίνεται σε τοπική και ολική αντοχή. Στην ολική αντοχή εξετάζουμε την συμπεριφορά ολόκληρου του πλοίου ως δοκού, ενώ στην τοπική αντοχή την συμπεριφορά των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων του. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την εκτίμηση τόσο της τοπικής αντοχής και συγκεκριμένα της αντοχής των ενισχυμένων ελασμάτων των πλοίων μετά από διάβρωση όσο και της ολικής αντοχής. Εξάλλου η τοπική αντοχή μπορεί να αποβεί εξίσου κρίσιμη με την ολική.

##### 4.2.2.1 Η αντοχή των ελασμάτων

Τα ελάσματα τα οποία όπως είδαμε βρίσκονται μεταξύ των ενισχυτικών και των νομένων, είναι τα πιο θεμελιώδη κατασκευαστικά στοιχεία και υπόκεινται σε δυνάμεις οι οποίες είναι είτε πιέσεις που προέρχονται από το νερό ή το μεταφερόμενο φορτίο, είτε δυνάμεις που προέρχονται από τις αποκρίσεις της κατασκευής σε διάφορες φορτίσεις. Η γεωμετρία τους καθορίζεται είτε από την απόλυτη τιμή του πάχους  $t$  κάθε ελάσματος, είτε από τον λόγο πλευρών  $a/b$  , είτε από τον λόγο πλάτους- πάχους  $b/t$ . Συνήθως χρησιμοποιείται ο λόγος  $b/t$  και τα συνήθη ναυπηγικά ελάσματα βρίσκονται στο πεδίο τιμών  $80 > b/t > 30$ .

Όταν ένα έλασμα υπόκειται σε θλίψη , λαμβάνει χώρα λυγισμός σε μια κρίσιμη τιμή της δύναμης που εφαρμόζεται και έτσι η παραμόρφωση αυξάνεται ραγδαία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ακαμψίας του ελάσματος και την δημιουργία καμπτικών τάσεων. Με την εξάπλωση της ευκαμψίας λόγω της συνδυασμένης δράσης κάμψης και μονοαξονικής δύναμης, η ακαμψία έναντι της



εφαρμοζόμενης δύναμης μειώνεται στο μηδέν και η ικανότητα παραλαβής φορτίου δηλαδή η αντοχή του ελάσματος ελαττώνεται.

Επομένως με βάση τα παραπάνω , για τα μεμονωμένα ελάσματα θα εξετάσουμε την αντοχή τους σε λυγισμό [20].

#### 4.2.2.1 .1 Λυγισμός ελάσματος υπό μονοαξονική φόρτιση

Όταν σ' ένα έλασμα δρουν θλιπτικές φορτίσεις το βέλος κάμψης παραμένει μηδενικό στην προλυγισμική περιοχή. Όταν όμως το θλιπτικό φορτίο το οποίο φέρει το έλασμα λάβει μια κρίσιμη τιμή τότε το βέλος κάμψης αυξάνεται σημαντικά. Μια διαφορά του λυγισμού με την κάμψη είναι ότι οι φορτίσεις είναι ομοεπίπεδες και όχι κάθετες στην επιφάνεια του ελάσματος. Επίσης στην περίπτωση των καμπτικών φορτίσεων , σε όλο το πεδίο φόρτισης η αύξηση του βέλους κάμψης είναι σταδιακή και ανάλογη με το μέγεθος της φόρτισης ενώ στην περίπτωση των θλιπτικών φορτίσεων , το βέλος κάμψης αυξάνεται απότομα όταν το φορτίο γίνει ίσο με το φορτίο λυγισμού. Και εδώ για λόγους απλούστευσης του προβλήματος θα θεωρήσουμε ότι τα ελάσματα που θα εξετάσουμε είναι επίπεδα χωρίς αρχικές ατέλειες . Στα λεπτά ελάσματα ο λυγισμός επέρχεται στην ελαστική περιοχή ενώ στα παχιά ελάσματα στην ανελαστική περιοχή δηλαδή η πλαστικοποίηση προηγείται του λυγισμού. Όταν όμως ο λυγισμός επέλθει στην ανελαστική περιοχή τότε το έλασμα αμέσως φθάνει στο όριο της αντοχής του.

Τα λεπτά ελάσματα όμως εξακολουθούν να παραλαμβάνουν φορτίο και αφότου η τάση υπερβεί την κρίσιμη τάση λυγισμού και επέλθει ελαστικός λυγισμός δηλαδή έχουν μεταλυγισμική αντοχή. Στην μεταλυγισμική περιοχή προκύπτει ανακατανομή με διάχυση του φορτίου στις στηριζόμενες αφόρτιστες πλευρές του ελάσματος. Στις περιοχές αυτές προκύπτει πλαστικοποίηση την οποία συνήθως ακολουθεί η άμεση κατάρρευση του ελάσματος [20]. Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να είναι γνωστή η κρίσιμη τάση λυγισμού  $\sigma_{cr}$  η οποία στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα υπολογιστεί με μοντέλα αντοχής σε λυγισμό τα οποία περιγράφονται στην επόμενη ενότητα. Επίσης δίνεται και από τις παρακάτω σχέσεις ανάλογα με το νηογνώμονα:

- ABS Safehull

$$\sigma_u = C \sigma_y$$

$$C = \begin{cases} \frac{2.25}{\beta} - \frac{1.25}{\beta^2} & \text{για } \beta \geq 2.68 \\ 1 & \text{για } \beta < 2.68 \end{cases}$$

[21]

- IACS CSR

$$\sigma_{cr} = C \sigma_y$$

$$C = \begin{cases} \frac{2.14}{\beta} - \frac{0.89}{\beta^2} & \text{για } \beta \geq 2.68 \\ 1 & \text{για } \beta < 2.68 \end{cases}$$

[21]

Όπου  $\sigma_{cr}$  η κρίσιμη τάση λυγισμού,  $\sigma_y$  η τάση διαρροής του υλικού του ελάσματος και  $\sigma_u$  η αντοχή του ελάσματος. Το  $\beta$  και για τις τρεις περιπτώσεις δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\beta = (\sigma_y/E)^{1/2} s / t_n$$

όπου  $s$  είναι η απόσταση των διαμήκων ενισχυτικών του ελάσματος,  $t_n$  το πάχος του ελάσματος χωρίς τα ενισχυτικά,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του ελάσματος [21].

- IACS UR S 11.5.2:

$$\sigma_c = \sigma_E \text{ για } \sigma_E \leq \frac{\sigma_F}{2}$$

$$\sigma_c = \sigma_F \left(1 - \frac{\sigma_F}{4\sigma_E}\right) \text{ για } \sigma_E > \frac{\sigma_F}{2}$$

όπου

$\sigma_F$  : η τάση διαρροής του υλικού σε  $N/mm^2$

$\sigma_E$  : η τάση ελαστικού λυγισμού σύμφωνα με Euler η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_E = 0,9 mE \left(\frac{t_b}{1000s}\right)$$

όπου

$$m = \frac{8.4}{\Psi + 1.1} \text{ για } 0 \leq \Psi \leq 1$$

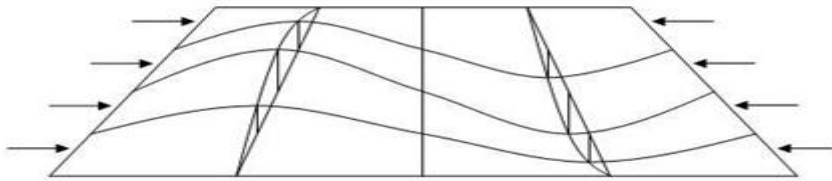
όπου  $\Psi$  ο λόγος μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων θλιπτικών τάσεων  $\sigma_a$

$E$  : το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$t_b$  : το πάχος σε mm του ελάσματος

$s$  : η μικρότερη διάσταση του ελάσματος σε m [22].

Εάν  $\sigma_{cr} > \sigma_y$  τότε το έλασμα θα καταρρεύσει όταν η τάση γίνει ίση με  $\sigma_y$  ενώ εάν  $\sigma_{cr} < \sigma_y$  το έλασμα θα καταρρεύσει όταν η τάση γίνει ίση με  $\sigma_{cr}$  [21].



### 4.3 Μοντέλα αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων σε λυγισμό.

Για την πρόβλεψη της αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων σε λυγισμό χρησιμοποιούνται οι γνωστές σχέσεις της μηχανικής για την εφαρμογή των οποίων πρέπει να είναι γνωστά το είδος του φορτίου, οι συνοριακές συνθήκες, η γεωμετρία και οι ιδιότητες του υλικού τα οποία θεωρούνται ότι είναι καλώς ορισμένα. Στην πραγματικότητα όμως εξακολουθούν να υπάρχουν αβεβαιότητες που σχετίζονται με αυτές τις παραμέτρους, όπως για παράδειγμα ο βαθμός περιορισμού των κινήσεων που προσφέρουν οι στηρίξεις σ' ένα έλασμα.

Εκτός από αυτά, η αντοχή ενός ελάσματος σε λυγισμό, καθώς και η μεταλυγισμική συμπεριφορά εξαρτάται και από άλλους παραγοντες όπως είναι η λυγηρότητα του ελάσματος, ο λόγος των πλευρών, οι αρχικές ατέλειες και οι παραμένουσες τάσεις. Η λυγηρότητα του ελάσματος υποδεικνύει εάν αυτό υποστεί λυγισμό στην ελαστική, ελαστοπλαστική ή πλαστική περιοχή. Ο λόγος των πλευρών έχει να κάνει με τον αριθμό των ημικυμάτων στον οποίο το έλασμα υφίσταται λυγισμό δηλαδή η αντοχή του ελάσματος είναι συνάρτηση αυτού του λόγου. Επίσης ο λόγος των πλευρών συνδέεται πολύ στενά με την επίδραση των αρχικών ατελειών. Γενικά, οι αρχικές ατέλειες μειώνουν την αντοχή των ελασμάτων όμως ελάσματα με μεγαλύτερο λόγο πλευρών παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και σε μερικές περιπτώσεις ανάλογα με τη μορφή των αρχικών ατελειών, αυξάνεται η αντοχή τους. Από τις παραπάνω παραμέτρους, η μορφή των αρχικών ατελειών παρουσιάζει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας που δεν είναι δυνατό να περιγραφεί από τα μοντέλα που θα αναπτυχθούν παρακάτω και γι' αυτό το λόγο για την εφαρμογή των μοντέλων θα θεωρήσουμε ότι τα ελάσματα δεν έχουν αρχικές ατέλειες [21].

#### 4.3.1 Μοντέλο του Faulkner για την αντοχή των ελασμάτων σε λυγισμό

Το μοντέλο αντοχής του Faulkner προβλέπει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, ενός ελάσματος χωρίς αρχικές ατέλειες, που είναι απλά εδρασμένο στις τέσσερις πλευρές του:

$$\phi = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2}$$

όπου  $\sigma_u$  είναι η ικανότητα παραλαβής φορτίου,  $\sigma_o$  είναι η τάση διαρροής του υλικού,  $\lambda = (b/t)(\sigma_o/E)^{1/2}$  είναι η λυγηρότητα του ελάσματος,  $b$  είναι το πλάτος του,  $t$  είναι το πάχος του και  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.

Στην περίπτωση που λαμβάνουμε υπόψη τις παραμένουσες τάσεις, το μοντέλο του Faulkner έχει ως εξής:

$$\phi = \phi_b - \phi_E \phi_r$$

$$\text{όπου } \phi_b = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2}$$

$$\phi_E = \frac{E_t}{E} = \left( \frac{14,5\lambda^2}{52,4 + \lambda^4} \right)^2 \quad \text{για } 0 < \lambda < 2,69$$

$$\phi_E = 1 \quad \text{για } \lambda > 2,69$$

$$\phi_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_o} = \frac{2\eta}{\left(\frac{b}{t}\right) - 2\eta}$$

όπου  $E_t$  είναι το εφαπτόμενο μέτρο ελαστικότητας και  $\sigma_r$  είναι οι παραμένουσες τάσεις. Οι συναρτήσεις  $\phi_r$  και  $\phi_E$  αντιπροσωπεύουν την επίδραση των ανελαστικών παραμορφώσεων και των παραμενουσών τάσεων οι οποίες αφορούν είτε διαρροή στη θερμικά επηρεασμένης ζώνης λόγω της συγκόλλησης κατά μήκος των πλευρών είτε θλιπτικές τάσεις  $\sigma_r$  στο κέντρο της  $(b - 2\eta t)$  περιοχής όπου  $\eta t$  είναι το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Ο Faulkner εκτιμά ότι η παράμετρος  $\eta$  παίρνει τιμές  $\eta = 4,5 \sim 6$ .

Στην περίπτωση που το έλασμα αποτελεί τμήμα μιας περίπλοκης κατασκευής όπως είναι το πλοίο, τα σύνορά του δεν είναι συνήθως ελεύθερα όπως στην περίπτωση της απλής στήριξης που θεωρήθηκε ισχύει στις παραπάνω σχέσεις. Σε πολλές περιπτώσεις περιορίζεται η εγκάρσια μετατόπιση των ελασμάτων και ειδικότερα όταν βρίσκονται μεταξύ διαμήκων ενισχυτικών ή διαμήκων φρακτών, ο βαθμός περιορισμού των κινήσεών τους είναι αρκετά υψηλός και οι συνοριακές συνθήκες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάπτυξη των μοντέλων αντοχής. Έτσι το μοντέλο του Faulkner παίρνει την εξής μορφή:

$$\phi = \phi_b - \phi_E$$

όπου

$$\phi_b = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{2,5}{\lambda} - \frac{1,5625}{\lambda^2}$$

$$\phi_E = \frac{E_t}{E} = \left( \frac{25,24\lambda^2}{159,2 + \lambda^4} \right)^2 \quad \text{για } 0 < \lambda < 3,5$$

$$\phi_E = 1 \quad \text{για } \lambda \geq 3,5 \quad [21]$$

#### 4.3.2 Μοντέλο των Ivanov και Rousev για την αντοχή των ελασμάτων σε λυγισμό

Οι Ivanov και Rousev για την ανάπτυξη του μοντέλου τους λαμβάνουν υπόψη την αρχική μετατόπιση  $\delta_o = w_o / t$  του ελάσματος:

$$\phi = \frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \frac{1}{1 + (0,3\lambda + 0,08)\delta_o}$$

όπου  $\lambda$  είναι ο συντελεστής λυγηρότητας,  $\lambda = (b/t)(\sigma_o/E)^{1/2}$  και σύμφωνα με Faulkner και Αντωνίου:

$$\delta_o = w_o / t = 0,11 \lambda^2 \quad [21]$$

#### 4.3.3 Μοντέλο του Carlsen για την αντοχή των ελασμάτων σε λυγισμό

Ο Carlsen για την ανάπτυξη του μοντέλου του λαμβάνει υπόψη τόσο την αρχική μετατόπιση του ελάσματος όσο και τις παραμένουσες τάσεις από τις συγκολλήσεις:

$$\phi = \left( \frac{2,1}{\lambda} - \frac{0,9}{\lambda^2} \right) \left( 1 - \frac{0,75 \delta_o}{\lambda} \right) \left( 1 - \frac{2\eta t}{b} \right)$$

όπου  $\eta t$  είναι το πλάτος της θερμικά επηρεασμένης ζώνης στα άκρα των ελασμάτων,  $\lambda = (b/t)(\sigma_o/E)^{1/2}$ ,  $\delta_o = w_o / t = 0,11 \lambda^2$ ,  $\eta = 4,5 \sim 6$  [21].

### **4.4 Πιθανοθεωρητική εκτίμηση του περιθωρίου αντοχής μέσης τομής του πλοίου**

Στην προηγούμενη ενότητα αναφερθήκαμε στα μοντέλα λυγισμού διότι η κρίσιμη τάση λυγισμού θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την εκτίμηση της αντοχής της μέσης τομής του πλοίου. Παρόλο που η κρίσιμη τάση λυγισμού χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τοπικής αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων (στη συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντοχής του καταστρώματος σε λυγισμό), αποτελεί επίσης και όρο που χρησιμοποιείται στη

σχέση εκτίμησης της ολικής αντοχής με τον υπολογισμό του περιθωρίου αντοχής μέσης τομής.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ολικής αντοχής ενός πλοίου ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$g(t) = U(t) - L(t)$$

όπου  $U(t)$  είναι το μοντέλο για τον υπολογισμό της αντοχής του καταστρώματος σε λυγισμό και  $L(t)$  είναι το μοντέλο που εκφράζει την επίδραση του εξωτερικού φορτίου στο πλοίο.

Σημειώνεται ότι επιλέγουμε την αντοχή του καταστρώματος από όλα τα στοιχεία της μέσης τομής διότι το κατάστρωμα είναι το πιο απομακρυσμένο στοιχείο από τον ουδέτερο άξονα της διατομής επομένως φτάνει γρηγορότερα στο όριο της αντοχής του [23].

Η απώλεια πάχους του ελάσματος του καταστρώματος λόγω διάβρωσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κρίσιμης τάσης λυγισμού, ενώ η απώλεια πάχους στα υπόλοιπα κατασκευαστικά στοιχεία της διατομής μαζί με το κατάστρωμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ροπής αντίστασης (section modulus). Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του περιθωρίου αντοχής της μέσης τομής και κατ'επέκταση τη μείωση της ολικής αντοχής του πλοίου.

Τελικά η συνάρτηση  $g(t)$  παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$g(t) = \sigma_u(t) - \sigma(t) = \sigma_u(t) - \frac{M_T}{SM_{DECK}}$$

όπου  $\sigma_u(t)$  είναι η αντοχή σε λυγισμό του ελάσματος του καταστρώματος τον χρόνο  $t$ ,  $\sigma(t)$  είναι οι ονομαστικές τάσεις που ασκούνται στο κατάστρωμα τον χρόνο  $t$ ,  $M_T$  είναι η συνολική καμπτική ροπή η οποία ισούται με το άθροισμα της καμπτικής ροπής σε ήρεμο νερό  $M_s$  και της καμπτικής ροπής σε κυματισμό  $M_w$ . Το  $SM_{DECK}$  είναι η ροπή αντίστασης στο κατάστρωμα τον χρόνο  $t$  [24].

Η καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό καθώς και η καμπτική ροπή σε κυματισμό είναι σταθεροί όροι και δίνονται από τους νηογνώμονες (IACS) από τις παρακάτω σχέσεις:

$$M_{stillwater} = C_{st} L^{2.5} B (C_b + 0.5) \quad (tm)$$

Το  $C_{st}$  δίνεται ανάλογα με το μήκος του πλοίου

$$M_{wv}(+) = +0,19 \cdot M \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot C_b \quad (kNm), \text{ για hogging}$$

$$M_{wv}(-) = -0,11 \cdot M \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_b + 0.7) \quad (kNm), \text{ για sagging.}$$

$$M = \begin{cases} 1 & \text{για απόσταση } 0,4L \text{ ως } 0,65L \text{ από A. P} \\ 0 & \text{A. P και F. P} \end{cases}$$

$$C = \begin{cases} 10,75 - \frac{(300-L)^{1,5}}{100} & 90 < L \leq 300 \text{ m} \\ 10,75 & 300 < L \leq 350 \text{ m} \\ 10,75 - \frac{(L-350)^{1,5}}{150} & L > 350 \text{ m} \end{cases}$$

[25]

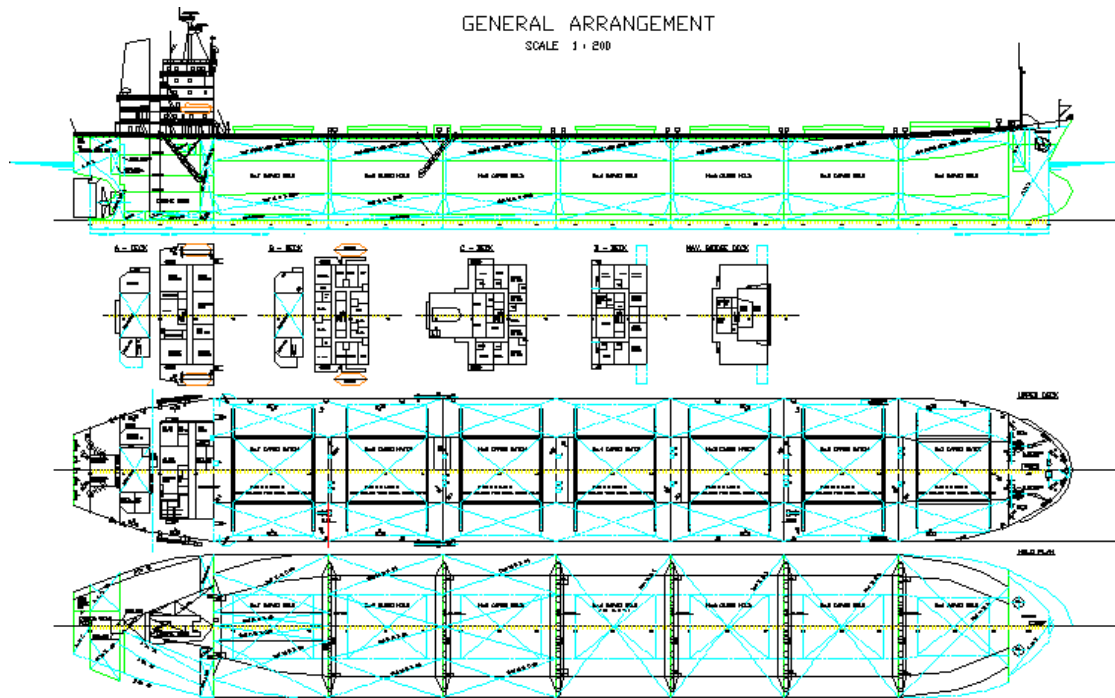
Σημειώνεται ότι στην κατάσταση hogging η μέση τομή του πλοίου βρίσκεται στην κορυφή κύματος με μήκος όσο το μήκος του πλοίου ενώ στην κατάσταση sagging βρίσκεται στο κοίλο κύματος με μήκος όσο το μήκος του πλοίου. Για τον υπολογισμό της αντοχής του καταστρώματος χρησιμοποιείται το  $M_T$  σε ήρεμο νερό-sagging το οποίο κατά απόλυτο τιμή θα χρησιμοποιηθεί στη σχέση

$$g(t) = \sigma_u(t) - \frac{M_T}{SM_{DECK}}$$

Τα  $\sigma_u(t)$  και  $SM_{DECK}$  θα υπολογιστούν με πιθανοθεωρητική μέθοδο όπως θα δούμε παρακάτω με βάση τα δεδομένα απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης της βάσης δεδομένων του Yamamoto διότι αντιπροσωπεύουν απώλεια πάχους σε χώρους φορτίου και δεξαμενών έρματος bulk carrier.

#### 4.4.1 Εφαρμογή του μοντέλου περιθωρίου αντοχή σε bulk carrier 68000 t DWT

Η εφαρμογή του μοντέλου περιθωρίου αντοχής θα γίνει σε πλοίο bulk carrier 68000 t DWT, μήκους  $L = 214,4$  m, πλάτους  $B = 32$  m, κοίλου  $D = 18,3$  m και  $C_b = 0,845$ . Το πλοίο αυτό σχεδιάστηκε στα πλαίσια του μαθήματος 'Θέμα μελέτης και σχεδίασης πλοίου' και δεν αποτελεί υπάρχον πλοίο. Η γενική διάταξη του φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Αρχικά υπολογίζονται οι σταθεροί όροι δηλαδή η ροπή σε ήρεμο νερό και σε κυματισμό.

- Ροπή σε ήρεμο νερό

$$M_{\text{stillwater}} = C_{\text{st}} L^{2,5} B (C_b + 0,5) \quad (\text{tm})$$

όπου  $C_{\text{st}} = 0.00505$  για  $L = 214,4$

$$M_{\text{stillwater}} = 146293,7 \quad (\text{tm}) = 1462937 \quad (\text{kNm})$$

- Ροπή σε κυματισμό

$$M_{\text{WV}(+)} = +0,19 \cdot M \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot C_b \quad (\text{kNm}), \text{ για hogging}$$

$$M_{\text{WV}(-)} = -0,11 \cdot M \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_b + 0.7) \quad (\text{kNm}), \text{ για sagging.}$$

Όπου

$$C = 10,75 - [(300 - L)/100]^{1,5}, \text{ για } 90 \leq L \leq 300 \text{ m.}$$

$L = 214,4 \text{ m}$ , το μήκος του πλοίου.

$B = 32 \text{ m}$ , το πλάτος του πλοίου.

$C_b = 0,845$  συντελεστής γάστρας

$$M_{\text{WV}(+)} = 2351706,547 \text{ kNm (hogging)}$$

$$M_{\text{WV}(-)} = |-2489396| \text{ kNm (sagging)}$$



Στην κατάσταση sagging έχουμε :

$$M_T = 1462937 + 2489396 = 3952333 \text{ kN m}$$

Στη συνέχεια ακολουθεί ο υπολογισμός του section modulus(SM) στο κατάστρωμα.  
Το σχέδιο μέσης τομής του πλοίου με τις αναγραφόμενες διαστάσεις δίνεται στο παράρτημα στο τέλος της παρούσας εργασίας.

### Υπολογισμός ροπής αντίστασης μέσης τομής αναλυτικά

	ΣΤΟΙΧΕΙΟ	No	b (cm)	t (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	h (cm)	A*h (cm <sup>3</sup> )	Ah <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> )	I=b*t <sup>3</sup> /12 (cm <sup>4</sup> )
Ελάσματα	Πυθμένα	2	2268	2,1	9525,6	0,000	0,000	0	3500,658
	Εσωτ πυθμένα	2	1620	1,6	5184	172,000	891648,000	153363456	1133740800
	Κεντρικής σταθμίδας	1	172	1,8	309,6	86,000	26625,600	2289801,6	83,592
	Πλευρικής σταθμίδας	8	172	1,3	1788,8	86,000	153836,800	13229964,8	251,9226667
	Κυρτού γάστρας	2	243	2,1	1020,6	7,200	7348,320	52907,904	375,0705
	Παρατροπιδίων	2	75	2,1	315	3,600	1134,000	4082,4	115,7625
	Τρόπιδας	1	240	2,3	552	0	0	0	2649600
	Πλευρικό έλασμα	2	1775	2	7100	1054,500	7486950,00	7894988775	1864119792
	Καταστρώματος	2	882	1,7	2998,8	1830,000	5487804,00	10042681320	722,211
	Υδροροής	2	330	1,7	1122	1830,000	2053260,00	3757465800	270,215
	Ζωστήρα	2	180	2	720	1740,000	1252800,00	2179872000	240
	Διαγώνιο κατω πλευρ Δ	2	469	1,5	1407	381,390	536615,730	204659873,3	263,8125
	Διαγώνιο άνω πλευρ Δ	2	912	1,4	2553,6	1683,240	4298321,66	7235106958	417,088
	Στομίων	2	200	1,2	480	20,300	9744,000	197803,2	57,6
		<b>TOTAL</b>				<b>35077</b>		<b>22206088,1</b>	<b>31483912742</b>

	ΣΤΟΙΧΕΙΟ	No	A (cm <sup>2</sup> )	A total (cm <sup>2</sup> )	h (cm)	A*h (cm <sup>3</sup> )	Ah <sup>2</sup> (cm <sup>4</sup> )	I (cm <sup>4</sup> )	I total (cm <sup>4</sup> )
	Ενισχυτικά πυθμένα	28	52,79	1478,12	38,450	56833,714	2185256,303	4722,25	132223
	Ενισχυτικά εσωτ πυθμένα	20	46,79	935,8	133,550	124976,09	16690556,82	4191,49	83829,8
Ενισχυτικά	Ενισχυτικά κυρίου καταστρώματος	20	95,15	1903	1806,460	3437693,4	6210055583	13678	273560
	Πλευρική ενίσχυση	2	5460	10920	1000,000	10920000	10920000000	80262000	160524000
	Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Άνω 1	2	52,79	105,58	1396,060	147396,01	205773680,4	4722,25	9444,5
	Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Άνω 2	2	52,79	105,58	1480,480	156309,08	231412464,4	4722,25	9444,5
	Ενισχ. Διαγωνίου ελ.	2	52,79	105,58	1500,900	158465,02	237840151,5	4722,25	9444,5

Ανω 3								
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Ανω 4	2	52,79	105,58	1523,320	160832,13	244998793,6	4722,25	9444,5
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Ανω 5	2	52,79	105,58	1565,740	165310,83	258833777,7	4722,25	9444,5
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Ανω 6	2	52,79	105,58	1608,160	169789,53	273048735,1	4722,25	9444,5
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Ανω 7	2	52,79	105,58	1650,580	174268,24	287643665,6	4722,25	9444,5
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Ανω 8	2	52,79	105,58	1693,000	178746,94	302618569,4	4722,25	9444,5
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Ανω 9	2	52,79	105,58	1735,420	183225,64	317973446,4	4722,25	9444,5
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Ανω 10	2	52,79	105,58	1777,840	187704,35	333708296,6	4722,25	9444,5
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Κάτω 1	2	46,79	93,58	274,150	25654,957	7033306,462	4191,49	8382,98
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Κάτω 2	2	46,79	93,58	328,550	30745,709	10101502,69	4191,49	8382,98
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Κάτω 3	2	46,79	93,58	382,950	35836,461	13723572,74	4191,49	8382,98
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Κάτω 4	2	46,79	93,58	437,350	40927,213	17899516,61	4191,49	8382,98
Ενισχ. Διαγωνίου ελ. Κάτω 5	2	46,79	93,58	491,750	46017,965	22629334,29	4191,49	8382,98
Ενισχ. πλευρικού ελ. Ανω 1	2	52,79	105,58	1500,230	158394,28	237627855,8	4722,25	9444,5
Ενισχ. πλευρικού ελ. Ανω 2	2	52,79	105,58	1528,230	161350,52	246580710,4	4722,25	9444,5
Ενισχ. πλευρικού ελ. Ανω 3	2	52,79	105,58	1609,230	169902,5	273412205,5	4722,25	9444,5
Ενισχ. πλευρικού ελ. Ανω 4	2	52,79	105,58	1690,230	178454,48	301629121,5	4722,25	9444,5
Ενισχ. πλευρικού ελ. Ανω 5	2	52,79	105,58	1771,230	187006,46	331231458,2	4722,25	9444,5
Ενισχ. πλευρικού ελ. Κάτω 1	2	46,79	93,58	179,200	16769,536	3005100,851	4191,49	8382,98
Ενισχ. πλευρικού ελ. Κάτω 2	2	46,79	93,58	260,200	24349,516	6335744,063	4191,49	8382,98

Ενισχ. πλευρικού ελ. Κάτω 3	2	46,79	93,58	341,200	31929,496	10894344,04	4191,49	8382,98
Ενισχ. πλευρικού ελ. Κάτω 4	2	46,79	93,58	422,200	39509,476	16680900,77	4191,49	8382,98
Ενισχ. πλευρικού ελ. Κάτω 5	2	46,79	93,58	503,200	47089,456	23695414,26	4191,49	8382,98
<b>TOTAL</b>			<b>17756,42</b>		<b>17415489</b>	<b>21365263065</b>		<b>161239110</b>
							<b>Σ(I) (cm<sup>4</sup>) =</b>	<b>3161755600</b>

<b>Ολικό Εμβαδόν μέσης τομής</b>	<b>52833,420</b>	<b>cm<sup>2</sup></b>
<b>Πρώτη Ροπή Επιφανείας</b>	<b>39621577,110</b>	<b>cm<sup>3</sup></b>
<b>Δεύτερη Ροπή Επιφανείας</b>	<b>52849175807,133</b>	<b>cm<sup>4</sup></b>
<b>Ουδέτερος άξονας από πυθμένα</b>	<b>749,934</b>	<b>cm</b>
<b>Ροπή Αδράνειας από πυθμένα</b>	<b>560,109</b>	<b>m<sup>4</sup></b>
<b>Ροπή Αδράνειας από Ο.Α</b>	<b>262,974</b>	<b>m<sup>4</sup></b>
<b>Ροπή Αντίστασης πυθμένα</b>	<b>35,066</b>	<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Ροπή Αντίστασης καταστρώματος</b>	<b>24,348</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

Αυτή είναι η αρχική ροπή αντίστασης της μέσης τομής του πλοίου από κατάστρωμα χωρίς να έχουν υποστεί τα κατασκευαστικά στοιχεία φθορά από διάβρωση (απώλεια πάχους). Η εκτίμηση της ροπής αντίστασης από κατάστρωμα για τα επόμενα χρόνια καθώς και της κρίσιμης τάσης λυγισμού του καταστρώματος θα γίνει με την πιθανοθεωρητική μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo χρησιμοποιώντας σαν δεδομένα τις μετρήσεις απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης στους χώρους φορτίου bulk carrier , από τη βάση δεδομένων του Yamamoto. Ο πίνακας αυτός παρατίθενται σε προηγούμενη ενότητα.

Για να γίνει κατανοητή η μέθοδος αυτή θα πρέπει να εξηγηθεί πρώτα ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου Monte Carlo.

#### 4.4.1.1 Η πιθανοθεωρητική μέθοδος προσομοίωσης Monte Carlo

Πρόκειται για μια στοχαστική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων. Με τον όρο στοχαστική εννοούμε ότι χρησιμοποιούνται ως δεδομένα τυχαίες μεταβλητές. Η μέθοδος Monte Carlo συλλέγει τυχαίες τιμές για την δημιουργία πιθανών σεναρίων ενός προβλήματος. Αυτές οι τιμές λαμβάνονται από ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών για να ταιριάζουν σε μια συγκεκριμένη πιθανοθεωρητική κατανομή (πχ κανονική κατανομή, γραμμική κατανομή). Στην προσομοίωση Monte Carlo η επιλογή των τυχαίων τιμών επαναλαμβάνεται πολλές φορές για τη δημιουργία πολλαπλών σεναρίων. Κάθε τιμή που επιλέγεται τυχαία διαμορφώνει ένα πιθανό σενάριο και κατ'έπекταση μια πιθανή λύση στο πρόβλημα. Όλα μαζί τα πιθανά σενάρια δίνουν ένα εύρος πιθανών λύσεων που κάποιες από αυτές είναι περισσότερο πιθανό να συμβούν και άλλες λιγότερο.

Όταν η προσομοίωση επαναλαμβάνεται για έναν μεγάλο αριθμό σεναρίων ( 10000 ή και περισσότερα) η μέση λύση μπορεί να δώσει μια προσεγγιστική απάντηση στο πρόβλημα. Η ακρίβεια της απάντησης βελτιώνεται προσομοιώνοντας ακόμα περισσότερα σενάρια. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι παράγει λύσεις σε προβλήματα που δεν είναι δυνατόν να λυθούν με διαφορετικό τρόπο.

Η προσομοίωση Monte Carlo εκτελείται στον Η/Υ με τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων ώστε να είναι δυνατή η επανάληψη ενός αρκετά μεγάλου αριθμού σεναρίων έτσι ώστε να παραχθεί όσο το δυνατόν πιο ακριβής λύση [26],[27],[28].

Ο λόγος που χρησιμοποιούμε τη μέθοδο αυτή στο πρόβλημα υπολογισμού του περιθωρίου αντοχής είναι διότι τα δεδομένα απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης που χρησιμοποιούνται τόσο για την κρίσιμη τάση λυγισμού του καταστρώματος όσο και για το SM αποτελούν τυχαίες μεταβλητές. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ο υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού  $\sigma_u$ , του SM και του περιθωρίου αντοχής για όλα τα έτη .

Το υπολογιστικό εργαλείο που θα χρησιμοποιήσουμε είναι το oracle crystal ball το οποίο λειτουργεί ως εξής:

Για κάθε αβέβαιη μεταβλητή η οποία έχει ένα εύρος πιθανών τιμών ορίζουμε τις πιθανές τιμές της χρησιμοποιώντας μια πιθανοθεωρητική κατανομή. Το Crystal ball διαθέτει έτοιμες διάφορες κατανομές ώστε να επιλέξουμε αυτή η οποία ταιριάζει περισσότερο στα δεδομένα που έχουμε. Για να βρούμε ποιά από τις κατανομές ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα αρκεί να φτιάξουμε ένα διάγραμμα των συχνοτήτων που εμφανίζεται η κάθε τιμή της μεταβλητής.

Κάποιες από τις κατανομές που διαθέτει έτοιμες το Crystall ball φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Τρέχοντας την προσομοίωση , αυτή υπολογίζει πολλαπλά σενάρια συλλέγοντας επαναλαμβανόμενα τιμές από τις κατανομές των αβέβαιων μεταβλητών. Όσο περισσότερες τιμές συλλέξει τόσο καλύτερη θα είναι και η προσέγγιση της λύσης του προβλήματος [28].

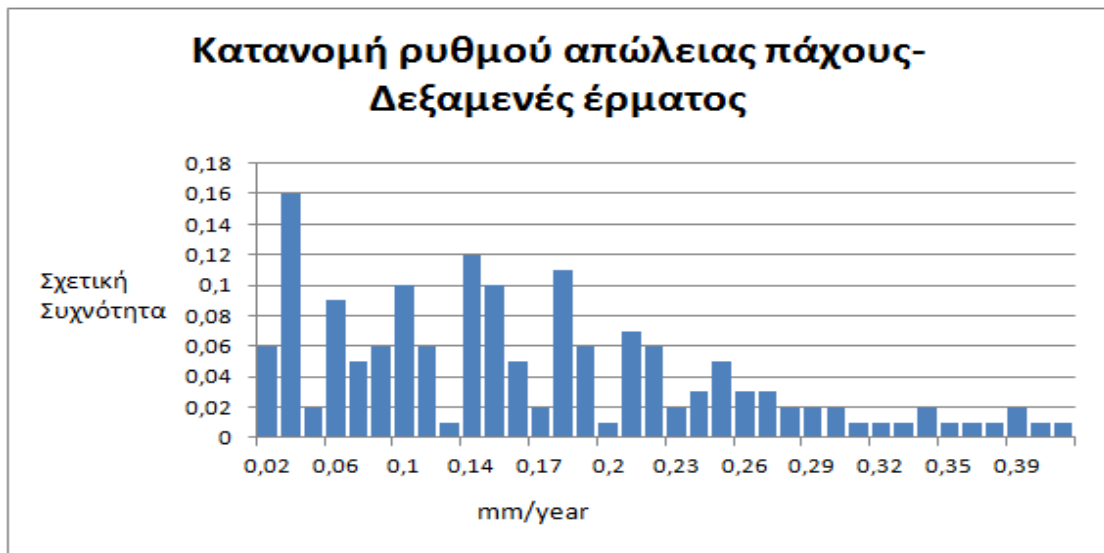
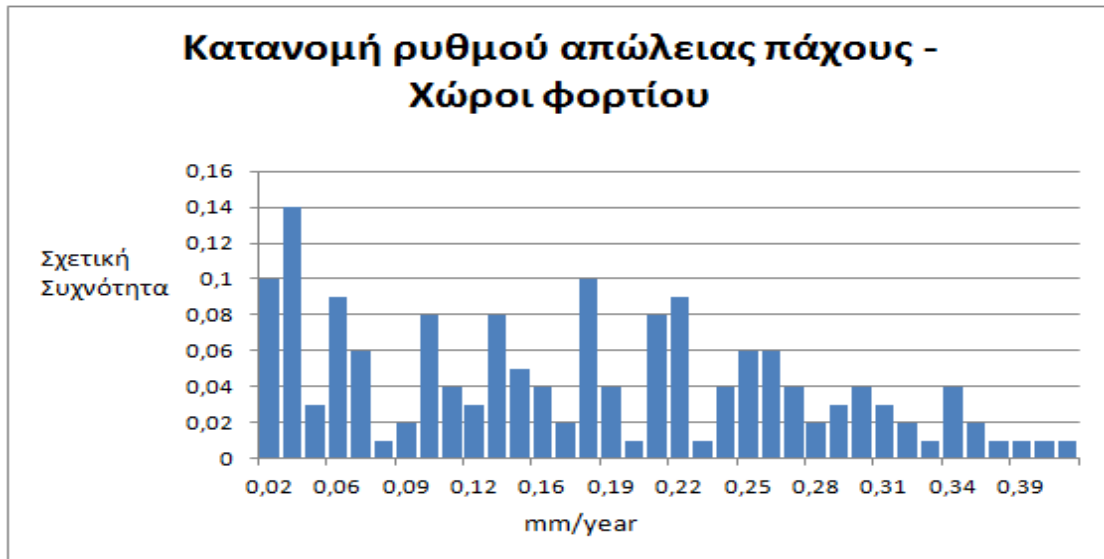
Εμείς θα πραγματοποιήσουμε προσομοίωση Monte Carlo στο Crystal ball ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Αρχικά θα δούμε ποια κατανομή ακολουθούν τα δεδομένα απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης ανά ηλικία ώστε να ορίσουμε στο crystal ball την αντίστοιχη κατανομή ώστε να μπορέσει αυτό να συλλέξει τυχαίες μεταβλητές από την κατανομή ώστε να παράγει μια λύση για το πρόβλημα υπολογισμού των  $\sigma_u$ ,  $SM_{deck}$  και περιθωρίου αντοχής.
- Στη συνέχεια αφού τα δεδομένα μας ορίστηκαν ως κατανομές τυχαίων μεταβλητών χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των  $\sigma_u$ ,  $SM_{deck}$  και περιθωρίου αντοχής τα οποία τα έχουμε ορίσει ως πρόβλεψη (forecast) στο crystal ball. Δηλαδή οι τυχαίες μεταβλητές τις οποίες τις έχουμε ορίσει ως κατανομές αποτελούν παράγοντα για τον υπολογισμό των ανωτέρω όρων .
- Αφού πραγματοποιηθούν οι προβλέψεις της αντοχής στη συνέχεια φτιάχνουμε τα διαγράμματα αντοχής- ηλικιών πλοίων.

Υπολογισμός της κατανομής των συχνοτήτων του ρυθμού απώλειας πάχους ανά έτος στις δεξαμενές έρματος και στις δεξαμενές φορτίου πλοίων τύπου bulk carrier , με βάση τα δεδομένα από μετρήσεις του Yamamoto.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα δεδομένα μετρήσεων απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης ανά ηλικία που περιλαμβάνονται στους πίνακες 1( δεξαμενές έρματος) και 2(δεξαμενές φορτίου), οι οποίοι παρατίθενται στην ενότητα 2 της παρούσας εργασίας στο κομμάτι της περιγραφής του μοντέλου του Yamamoto.

Από τα δεδομένα αυτά υπολογίζονται οι κατανομές των σχετικών συχνοτήτων των ρυθμών απώλειας πάχους οι οποίες φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα ( ο πίνακας που περιλαμβάνει αναλυτικά για κάθε ρυθμό την αντίστοιχη συχνότητα εμφάνισης και με βάση τον οποίο προέκυψαν τα διαγράμματα, παρατίθεται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας) :



Στον οριζόντιο άξονα των παραπάνω διαγραμμάτων έχουμε τις τιμές του ρυθμού απώλειας πάχους σε mm/ year και στον κάθετο άξονα τη σχετική συχνότητα εμφάνισης της κάθε τιμής.

Οι παραπάνω κατανομές χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα στο crystal ball και από εκεί με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo θα υπολογιστούν για όλες τις ηλικίες, με βάση τον ρυθμό απώλειας πάχους ανά έτος, η κρίσιμη τάση λυγισμού  $\sigma_u$ , το  $SM_{DECK}$  και το περιθώριο αντοχής  $g(t)$ . Οι σχέσεις που μας δίνουν τα προαναφερθέντα μεγέθη περιέχουν σαν μεταβλητή το πάχος ενώ όλοι οι υπόλοιποι όροι τους είναι σταθεροί. Στο crystal ball ο ρυθμός απώλειας του πάχους εισάγεται όχι σαν μεταβλητή που παίρνει διάφορες αριθμητικές τιμές αλλά σαν κατανομή. Επομένως και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση της προσομοίωσης Monte Carlo έχουν τη μορφή κατανομής.

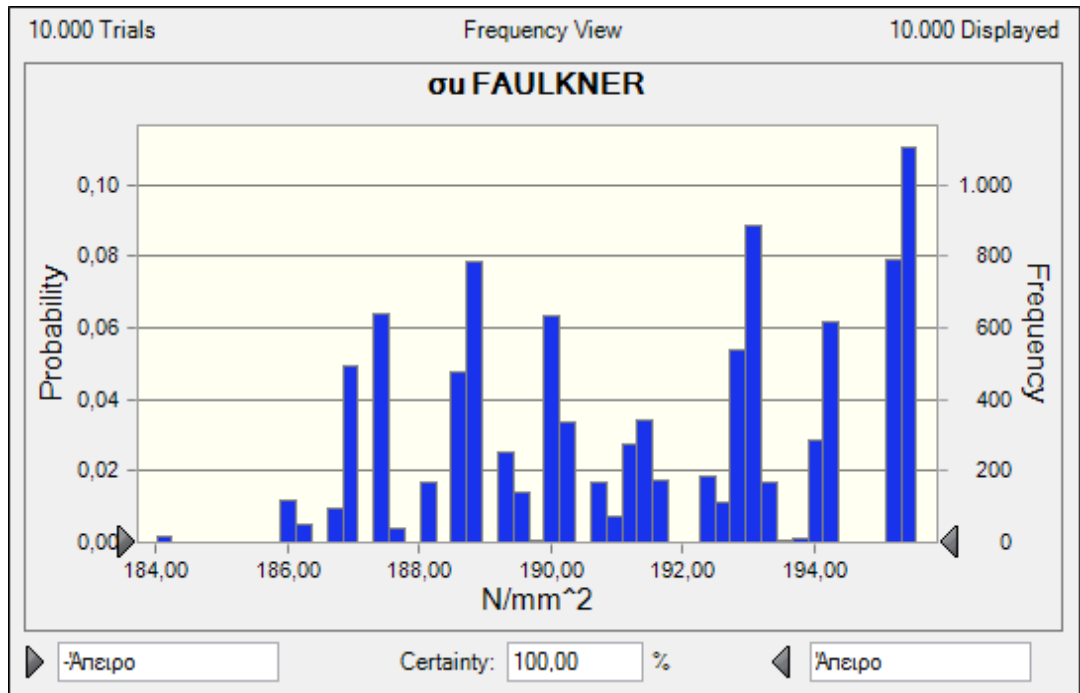
Η προσομοίωση εκτελείται για κάθε ηλικία οπότε η μέση τιμή της κατανομής που προκύπτει σαν αποτέλεσμα θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  ή  $g(t)$  κάθε ηλικίας.

#### 4.4.1.2 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του ελάσματος του καταστρώματος ανά ηλικία σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους.

Ο υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού  $\sigma_u$  θα γίνει με τα μοντέλα λυγισμού (Faulkner, Ivanov-Rousev, Carlsen), καθώς και με τον κανονισμό IACS UR S11.5.2, που περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Σε καθεμία από τις σχέσεις που αντιστοιχούν στα μοντέλα λυγισμού και στον κανονισμό, θα αφαιρείται από την μεταβλητή του πάχους ο ρυθμός απώλειας πάχους ανά έτος ο οποίος έχει οριστεί στο Crystal ball σαν κατανομή. Αφού αφαιρεθεί αυτός ο ρυθμός, για κάθε ηλικία θα πραγματοποιείται η προσομοίωση Monte Carlo στο Crystal ball. Συνολικά θα γίνουν 14 (όσες δηλ και οι ηλικίες) προσομοιώσεις για το κάθε μοντέλο και για κάθε ηλικία θα προκύπτουν κατανομές των τιμών του  $\sigma_u$ . Η μέση τιμή των κατανομών αυτών θα είναι και αυτή που θα εκπροσωπεί την τιμή του  $\sigma_u$  για την συγκεκριμένη ηλικία. Οι σταθερές που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις των μοντέλων του  $\sigma_u$  είναι: το αρχικό πάχος του ελάσματος του καταστρώματος (μαζί με την προσθήκη του περιθωρίου διάβρωσης) το οποίο είναι 17mm, το  $\sigma_0 = 235 \text{ N/mm}^2$  για απλό ναυπηγικό χάλυβα και το πλάτος του ελάσματος του καταστρώματος μεταξύ διαμηκών ενισχυτικών είναι  $b = 850 \text{ mm}$ . Οι σταθερές που χρησιμοποιούνται στις σχέσεις του κανονισμού είναι:  $\sigma_f = 235 \text{ N/mm}^2$  (η τάση διαρροής του υλικού),  $\Psi = 1$  (ο λόγος μεταξύ των μέγιστων και των ελάχιστων θλιπτικών τάσεων),  $E = 207000 \text{ N/mm}^2$  (μέτρο ελαστικότητας του υλικού),  $t_b = 17 \text{ mm}$  το πάχος σε mm του ελάσματος,  $s = 0,85$  (η μικρότερη διάσταση του ελάσματος σε m).



- Μοντέλο του Faulkner

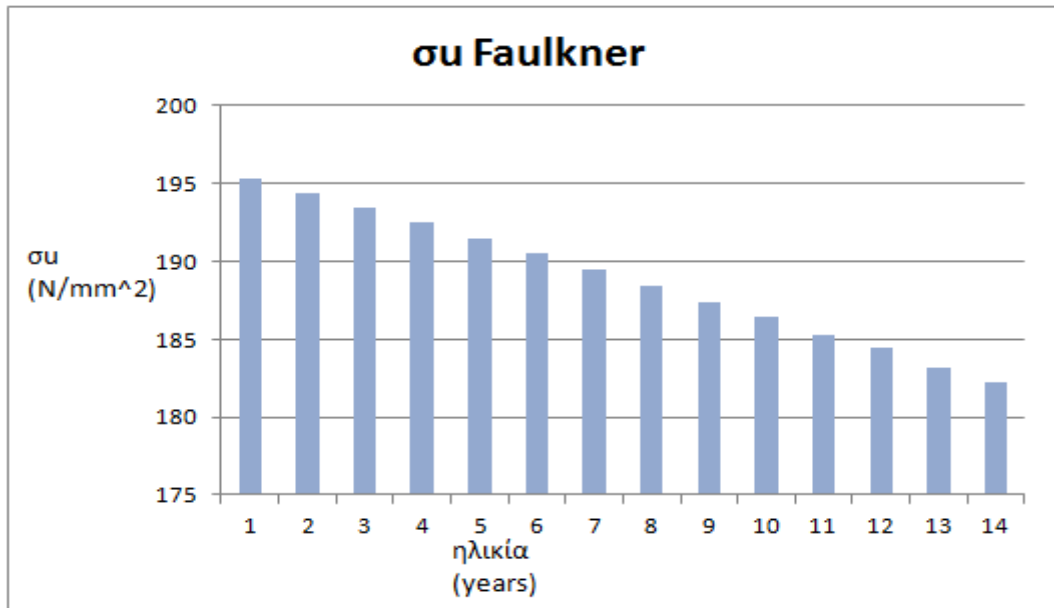


Forecast: ου FAULKNER	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Mean	191,46
Median	191,52
Mode	193,06
Standard Deviation	2,89
Variance	8,34
Skewness	-0,1177
Kurtosis	1,76
Coeff. of Variability	0,0151
Minimum	184,02
Maximum	195,55
Mean Std. Error	0,03

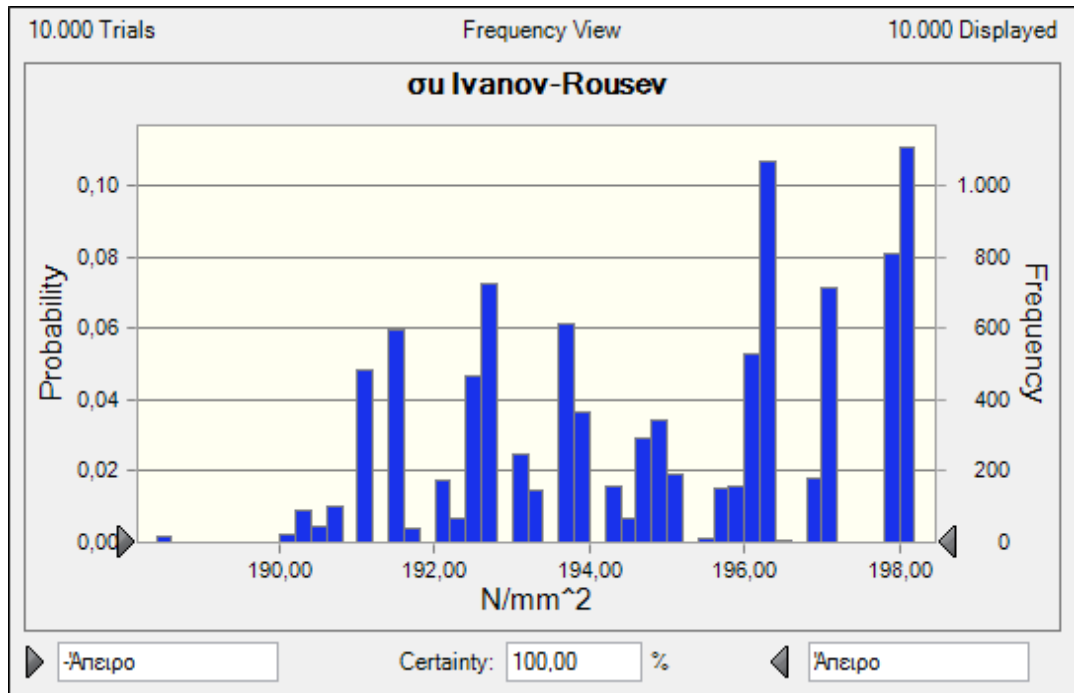
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $\sigma_u$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 191,46 N/mm<sup>2</sup> και η τυπική απόκλιση 2,89. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) ,οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	196,18
1	195,27
2	194,36
3	193,43
4	192,47
5	191,46
6	190,5
7	189,48
8	188,48
9	187,4
10	186,42
11	185,26
12	184,4
13	183,12
14	182,22

Στο παρακάτω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $\sigma_u$  για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη:



- Μοντέλο των Ivanov και Rousev

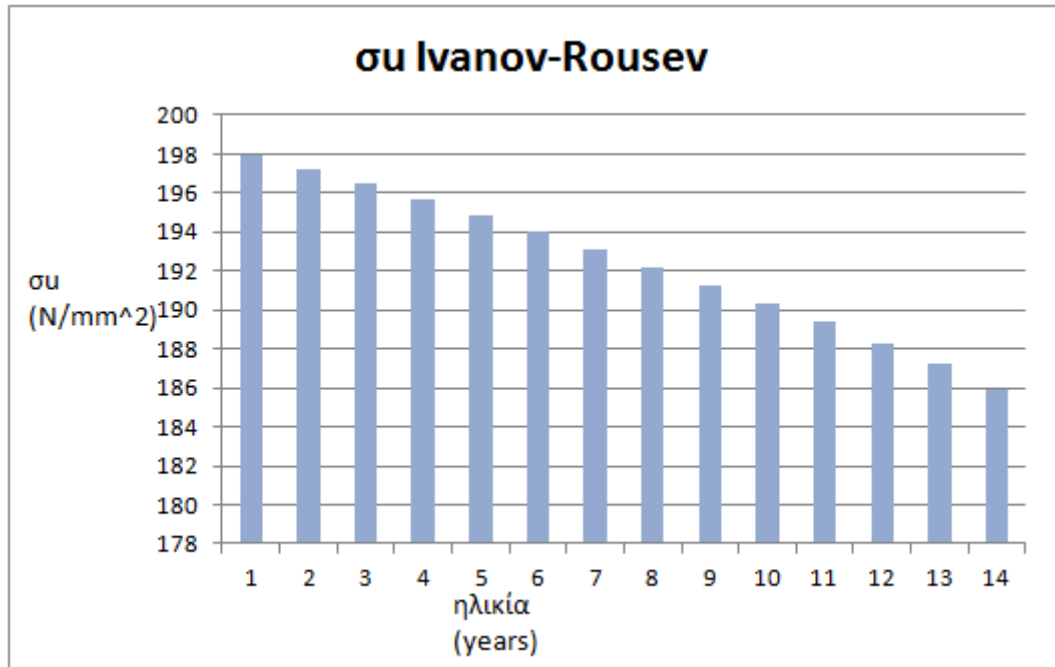


Forecast: συ Ivanov-Rousev	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Mean	194,88
Median	194,95
Mode	196,21
Standard Deviation	2,39
Variance	5,72
Skewness	-0,1757
Kurtosis	1,80
Coeff. of Variability	0,0123
Minimum	188,41
Maximum	198,19
Mean Std. Error	0,02

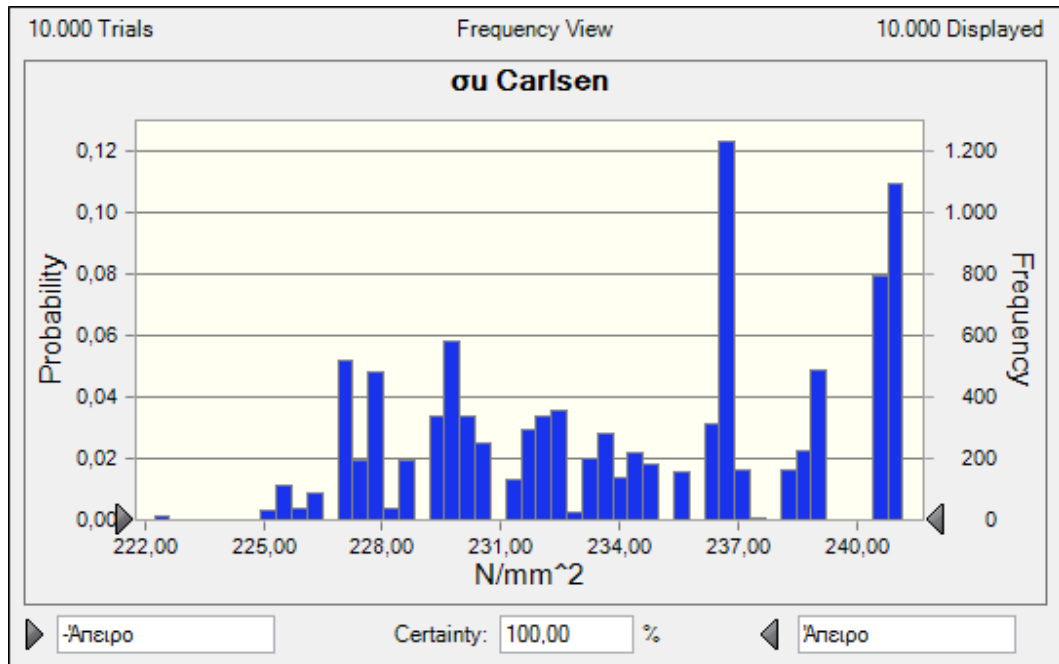
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $\sigma_u$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 194,88 N/mm<sup>2</sup> και η τυπική απόκλιση 2,39. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	198,6874
1	197,97
2	197,22
3	196,49
4	195,71
5	194,89
6	194,04
7	193,1
8	192,23
9	191,3
10	190,38
11	189,37
12	188,24
13	187,21
14	185,94

Στο παρακάτω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $\sigma_u$  για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη:



- Μοντέλο του Carlsen



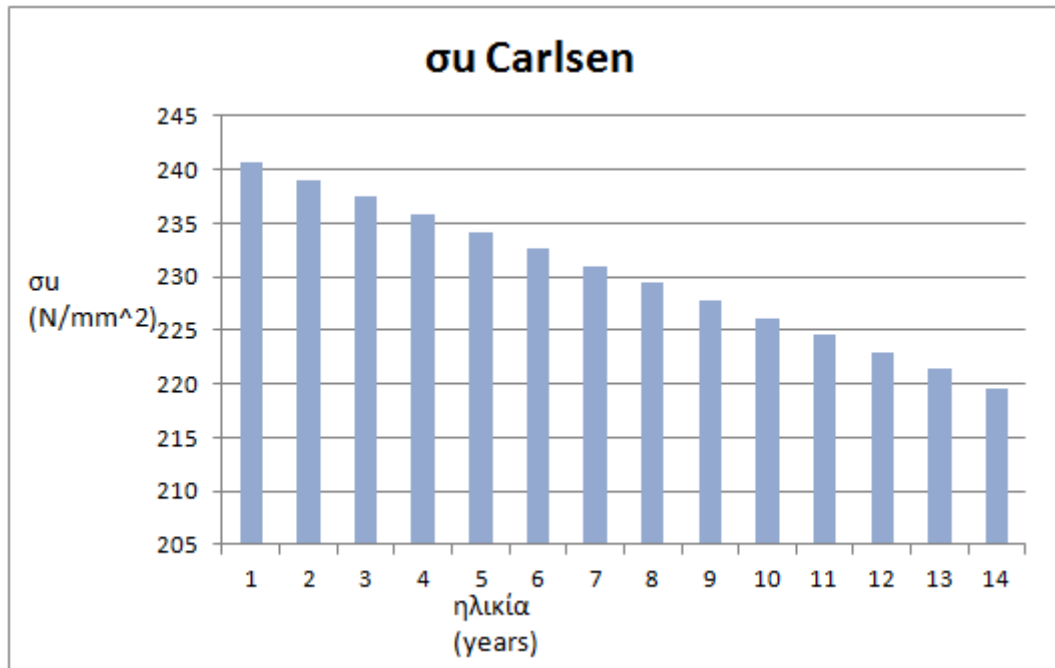
Forecast: ου Carlsen	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Mean	234,22
Median	234,32
Mode	236,90
Standard Deviation	4,81
Variance	23,14
Skewness	-0,0643
Kurtosis	1,72
Coeff. of Variability	0,0205
Minimum	222,25
Maximum	241,14
Mean Std. Error	0,05

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $\sigma_u$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 234,22 N/mm<sup>2</sup> και η τυπική απόκλιση 4,81. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

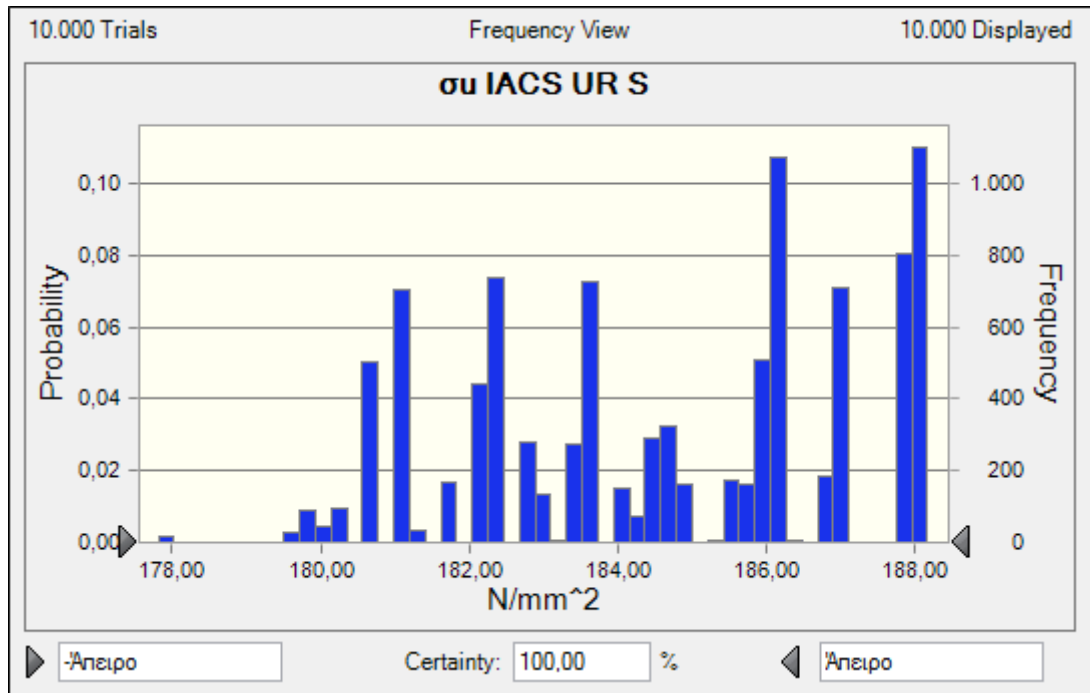
Ηλικίες (years)	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	242,2445
1	240,67
2	239,09
3	237,51
4	235,88
5	234,22
6	232,71
7	231,01
8	229,42
9	227,85
10	226,19
11	224,66
12	222,97
13	221,38
14	219,53



Στο παρακάτω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $\sigma_u$  για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη:



- IACS UR S11.5.2

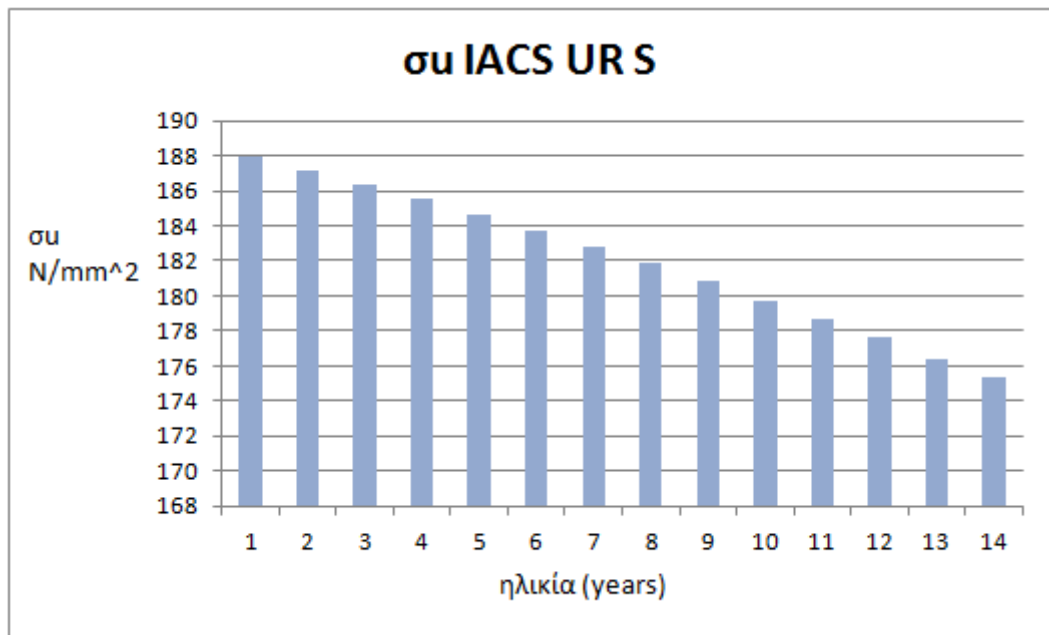


Forecast: ου IACS UR S	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Mean	184,64
Median	184,74
Mode	186,07
Standard Deviation	2,54
Variance	6,44
Skewness	-0,1639
Kurtosis	1,77
Coeff. of Variability	0,0137
Minimum	177,82
Maximum	188,16
Mean Std. Error	0,03

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $\sigma_u$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι  $184,64 \text{ N/mm}^2$  και η τυπική απόκλιση 2,54. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) ,οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$\sigma_u$ ( $\text{N/mm}^2$ )
0	188,68
1	187,92
2	187,15
3	186,32
4	185,51
5	184,64
6	183,74
7	182,85
8	181,86
9	180,86
10	179,74
11	178,67
12	177,59
13	176,36
14	175,35

Στο παρακάτω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $\sigma_u$  για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη:



Με βάση τα παραπάνω παρατηρούμε ότι το μοντέλο του Faulkner υπολογίζει μικρότερες τιμές για το  $\sigma_u$  από τα άλλα δύο μοντέλα ενώ το μοντέλο του Carlsen μεγαλύτερες τιμές από τα άλλα δύο μοντέλα. Οι τιμές του  $\sigma_u$  που υπολογίζει ο κανονισμός IACS UR S11.5.2 είναι μικρότερες από τις τιμές που υπολογίζουν τα τρία μοντέλα λυγισμού. Από τα διαγράμματα των τιμών του  $\sigma_u$  σε σχέση με την ηλικία, που προέκυψαν για κάθε μοντέλο, παρατηρείται ότι σε όλα τα μοντέλα καθώς και στον υπολογισμό με βάση τον κανονισμό υπάρχει ένας σταθερός ρυθμός μείωσης του  $\sigma_u$  για όλες τις ηλικίες.

#### 4.4.1.3 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός του $SM_{DECK}$ της μέσης τομής του πλοίου ανά ηλικία σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους.

Για τον υπολογισμό του  $SM_{DECK}$  ανά ηλικία υποθέτουμε ομοιόμορφη απώλεια πάχους σε όλα τα ελάσματα της μέσης τομής. Θα πρέπει όμως να υπολογιστεί η απαιτούμενη ροπή αντίστασης ( $SM_{req}$ ) όπως αυτή ορίζεται από τους νηογνώμονες ώστε να διαπιστωθεί εάν σε κάποια από τις ηλικίες το  $SM$  είναι μικρότερο από το απαιτούμενο.

Η απαιτούμενη ροπή αντίστασης σύμφωνα με τον ABS δίνεται από τη σχέση :

$$SM_{req} = C_W L^2 B (C_b + 0,7) k, \text{ cm}^3$$

Όπου:

$L, B, C_b$  όπως παραπάνω.

$C_W = C$  για νεόκτιστα πλοία.

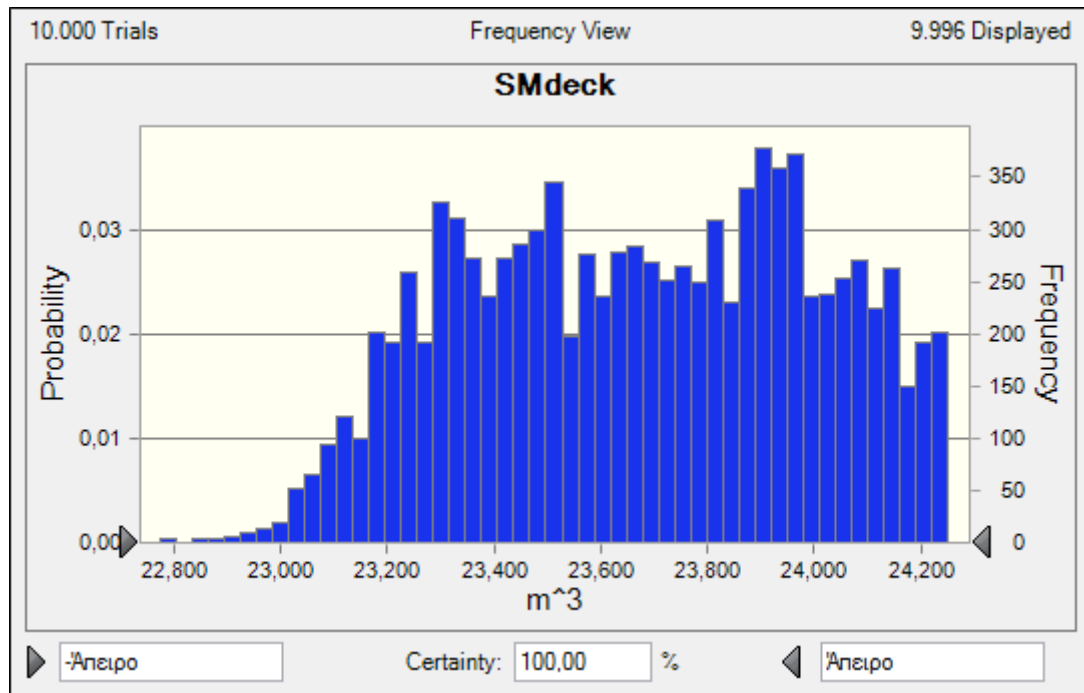
$$k = \begin{cases} 1 & \text{για συνηθισμένο χάλυβα} \\ 0,78 & \text{για χάλυβα με } \sigma_y = 315 \text{ N/mm}^2 \\ 0,72 & \text{για χάλυβα με } \sigma_y = 355 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

[27]

Οπότε υπολογίζεται:

$$SM_{req} = 22630812,48 \text{ cm}^3 = 22,63 \text{ m}^3.$$

Για τον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό του  $SM_{DECK}$  ανά ηλικία θα αφαιρεθεί από το πάχος κάθε ελάσματος της μέσης τομής ο ρυθμός απώλειας πάχους ανά έτος ο οποίος ρυθμός αυτός έχει οριστεί στο Crystal ball με τη μορφή κατανομής. Στα ελάσματα της μέσης τομής που βρίσκονται σε χώρους φορτίου θα αφαιρεθεί η κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους η οποία προέκυψε από τις μετρήσεις στους χώρους φορτίου και αντίστοιχα στα ελάσματα της μέσης τομής που βρίσκονται σε χώρους δεξαμενών θα αφαιρεθεί η κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους η οποία προέκυψε από τις μετρήσεις στις δεξαμενές έρματος ( Οι κατανομές αυτές έχουν ήδη υπολογιστεί παραπάνω με τη χρήση των δεδομένων του Yamamoto ). Η αντίστοιχη προσομοίωση στο Crystal ball θα πραγματοποιηθεί 14 φορές όσες δηλαδή και ηλικίες, αφού για κάθε ηλικία θα αφαιρείται από το πάχος ο ρυθμός μείωσής του.

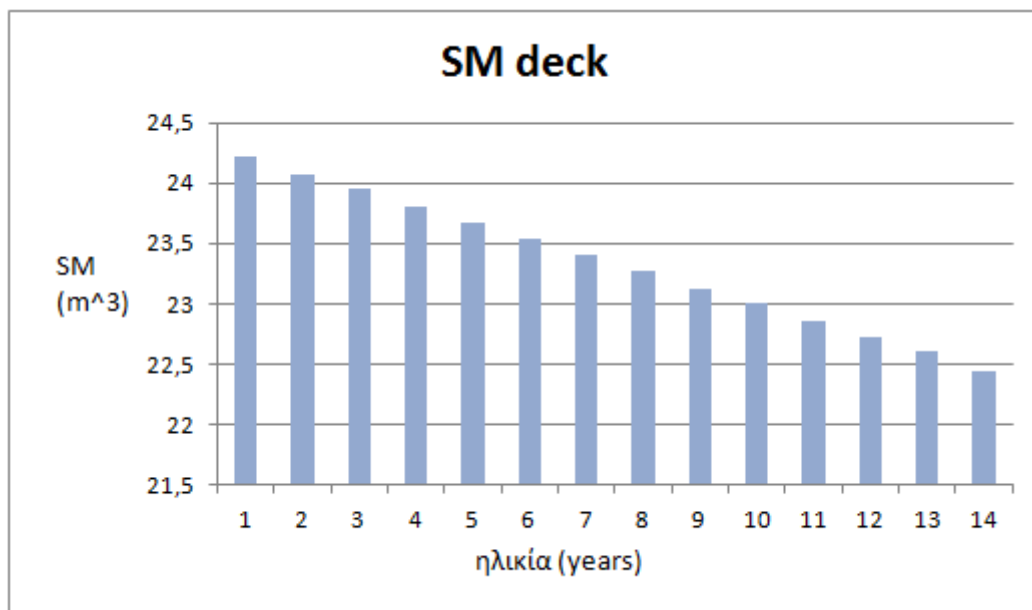


Forecast: SMdeck	
Statistic Forecast values	
Trials	10.000
Mean	23,675
Median	23,684
Mode	23,912
Standard Deviation	0,322
Variance	0,103
Skewness	-0,1031
Kurtosis	1,98
Coeff. of Variability	0,0136
Minimum	22,720
Maximum	24,251
Mean Std. Error	0,003

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $SM_{DECK}$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι  $23,675m^3$  και η τυπική απόκλιση 0,322. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$SM_{DECK}$ ( $m^3$ )
0	24,348
1	24,214
2	24,077
3	23,945
4	23,807
5	23,675
6	23,543
7	23,407
8	23,274
9	23,130
10	23,000
11	22,863
12	22,725
13	22,603
14	22,437

Στο παρακάτω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του SM για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη:



Παρατηρούμε ότι από το 13<sup>ο</sup> έτος και μετά οι τιμές του SM είναι μικρότερες από την τιμή του απαιτούμενου SM ( $SM_{req} = 22,63 \text{ m}^3$ ).

#### 4.4.1.4 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός του περιθωρίου αντοχής $g(t)$ του πλοίου ανά ηλικία σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους.

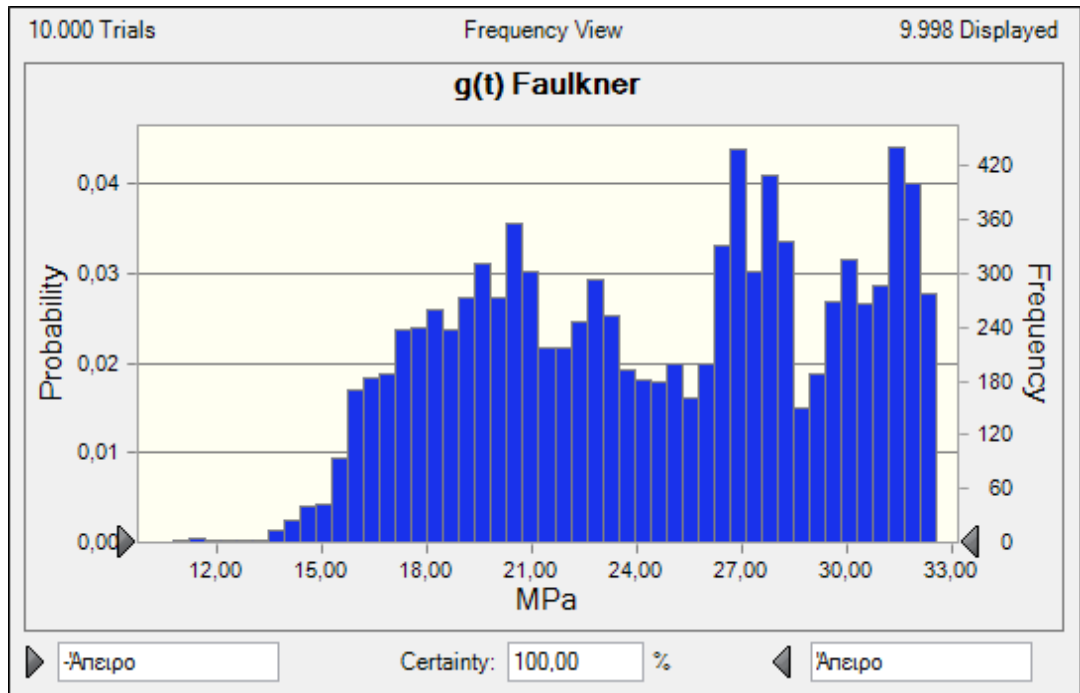
Όπως είδαμε το περιθώριο αντοχής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$g(t) = \sigma_u(t) - \sigma(t) = \sigma_u(t) - \frac{M_T}{SM_{DECK}}$$

Το  $M_T$  είναι σταθερό και ίσο με  $M_T = 3952333 \text{ kN m}$ , για το  $SM_{DECK}$  και το  $\sigma_u$  θα αφαιρούνται και από τα δύο ταυτόχρονα οι αντίστοιχες κατανομές του ρυθμού απώλειας πάχους. Αυτό θα γίνεται για κάθε ηλικία και στη συνέχεια θα ακολουθεί προσομοίωση στο Crystal ball. Συνολικά θα πραγματοποιηθούν 14 προσομοιώσεις όσες δηλαδή και οι ηλικίες. Οι μέσες τιμές των κατανομών που θα προκύπτουν από τις προσομοιώσεις για το  $g(t)$ , θα είναι και αυτές που θα αντιπροσωπεύουν την τιμή του  $g(t)$  ανά ηλικία. Οι τιμές του  $g(t)$  ανά ηλικία θα υπολογιστούν για καθένα από τα τρία μοντέλα λυγισμού:



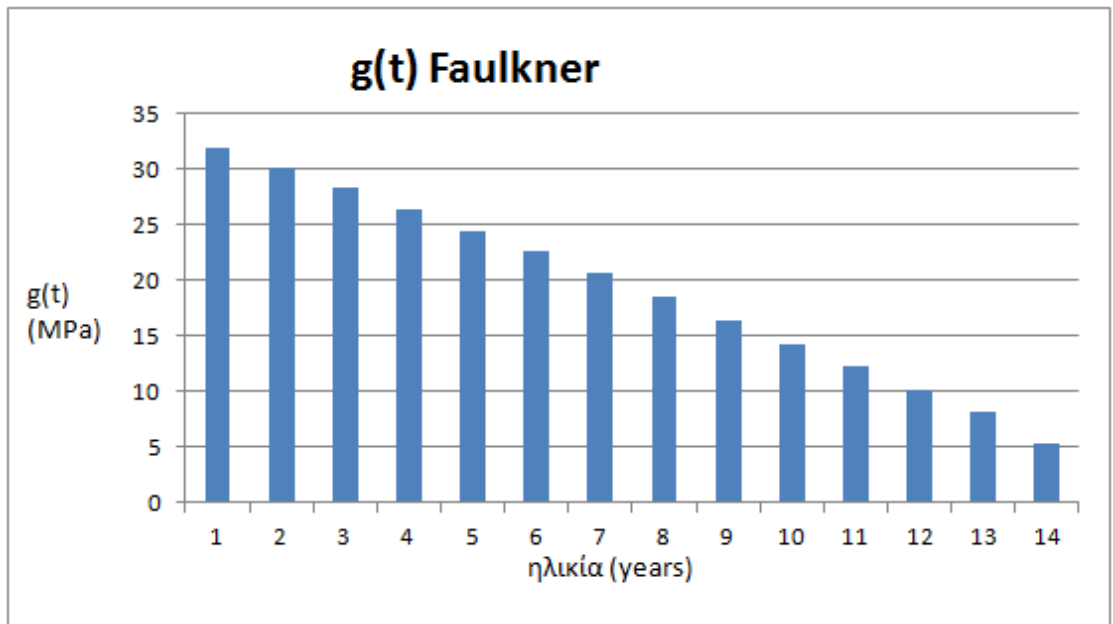
- Μοντέλο του Faulkner



Forecast: g(t) Faulkner	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Mean	24,46
Median	24,76
Mode	27,77
Standard Deviation	5,07
Variance	25,66
Skewness	-0,1210
Kurtosis	1,82
Coeff. of Variability	0,2071
Minimum	10,15
Maximum	32,57
Mean Std. Error	0,05

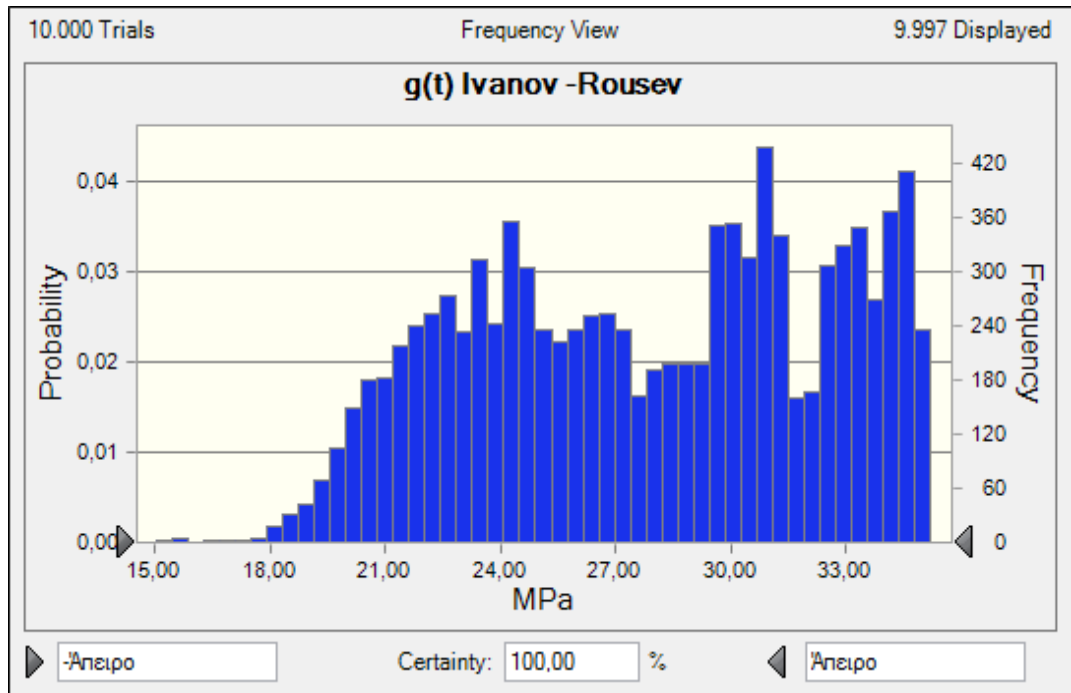
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $g(t)$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 24,5MPa και η τυπική απόκλιση 5,07. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$g(t)$ (MPa)
0	33,9
1	32
2	30,2
3	28,4
4	26,4
5	24,5
6	22,6
7	20,6
8	18,6
9	16,4
10	14,2
11	12,3
12	10,1
13	8,2
14	5,4



Στο παραπάνω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $g(t)$  σε MPa για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη.

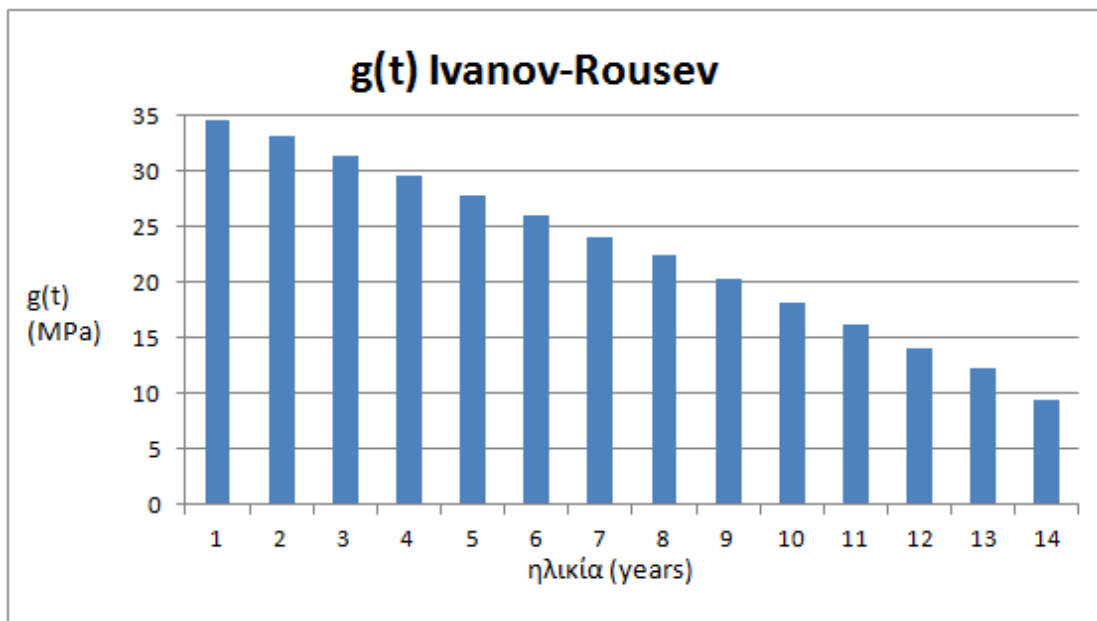
- Μοντέλο των Ivanov και Rousev



Forecast: g(t) Ivanov -Rousev	
Statistic Forecast values	
Trials	10.000
Mean	27,86
Median	28,16
Mode	30,92
Standard Deviation	4,58
Variance	21,00
Skewness	-0,1449
Kurtosis	1,85
Coeff. of Variability	0,1645
Minimum	14,54
Maximum	35,21
Mean Std. Error	0,05

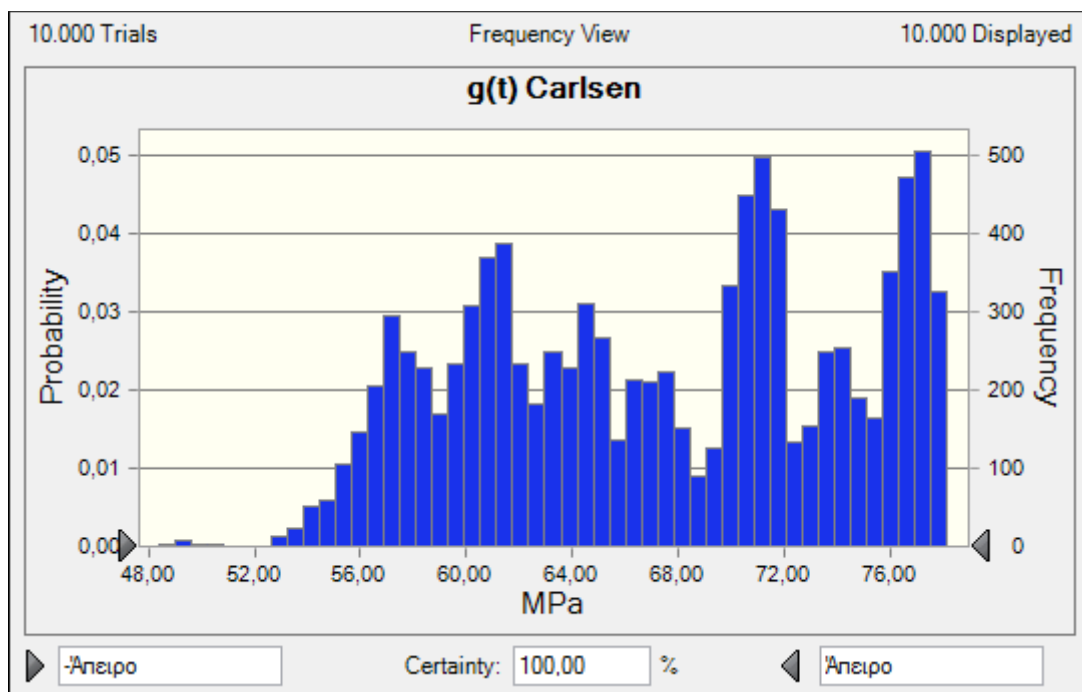
Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $g(t)$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 27,9 MPa και η τυπική απόκλιση 4,58. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$g(t)$ (MPa)
0	36,4
1	34,7
2	33,1
3	31,4
4	29,6
5	27,9
6	26,1
7	24
8	22,4
9	20,3
10	18,2
11	16,2
12	14,1
13	12,2
14	9,4



Στο παραπάνω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $g(t)$  σε MPa για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη.

- Μοντέλο του Carlsen

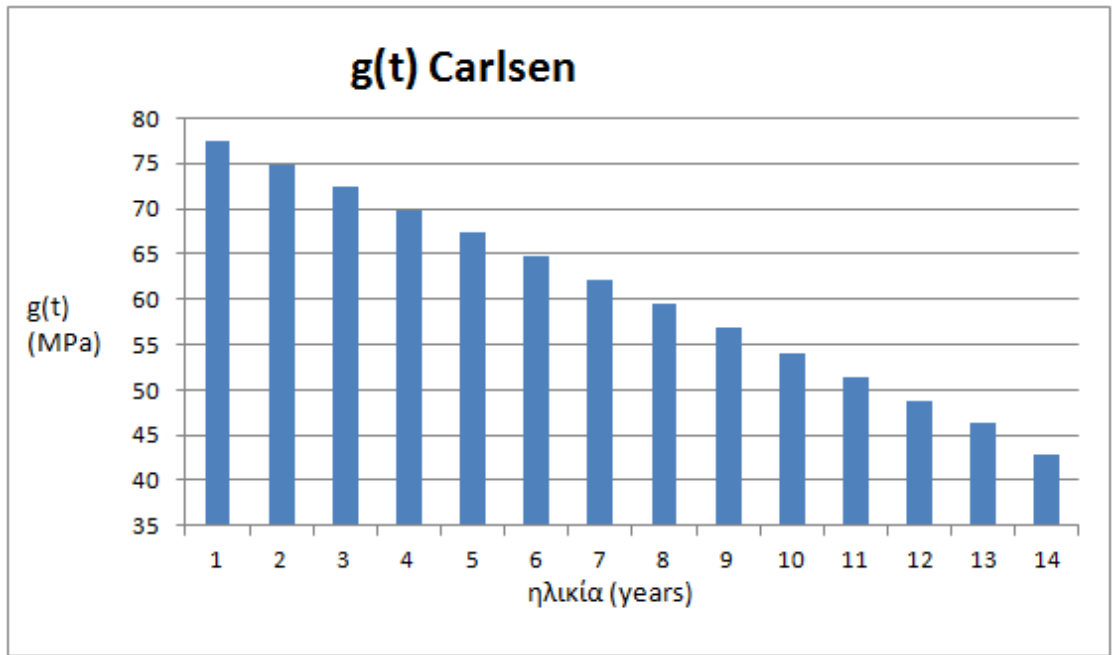


Forecast: g(t) Carlsen	
Statistic Forecast values	
Trials	10.000
Mean	67,28
Median	67,57
Mode	71,61
Standard Deviation	6,95
Variance	48,32
Skewness	-0,1002
Kurtosis	1,79
Coeff. of Variability	0,1033
Minimum	48,38
Maximum	78,17
Mean Std. Error	0,07

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $g(t)$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 67,3 MPa και η τυπική απόκλιση 6,95. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες (συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

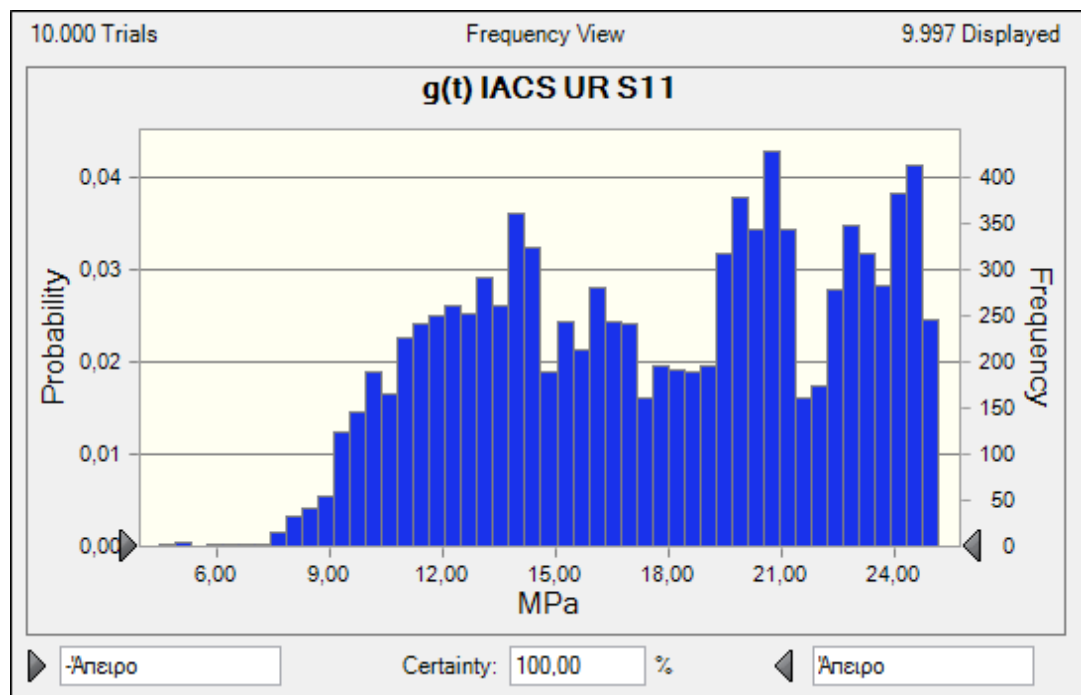
Ηλικίες (years)	g(t) (MPa)
0	79,9
1	77,4
2	74,9
3	72,5
4	69,8
5	67,3
6	64,8
7	62,2
8	59,6
9	56,8
10	54,1
11	51,5
12	48,8
13	46,4
14	42,8





Στο παραπάνω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $g(t)$  σε MPa για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη.

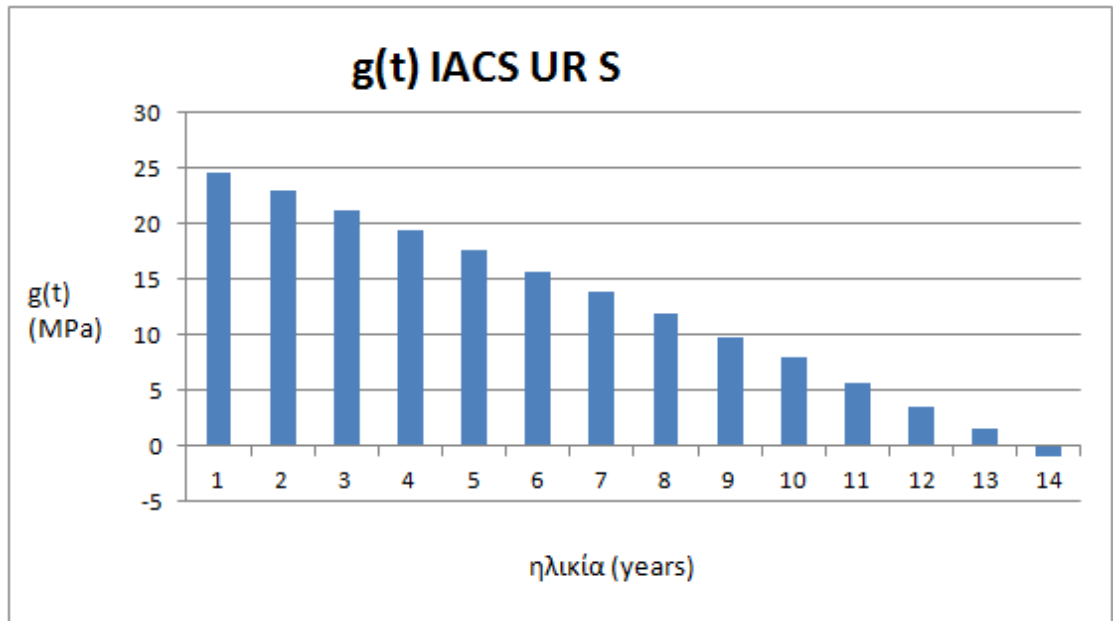
- IACS UR S11.5.2



Forecast: g(t) IACS UR S11	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Mean	17,64
Median	17,96
Mode	20,79
Standard Deviation	4,71
Variance	22,22
Skewness	-0,1466
Kurtosis	1,85
Coeff. of Variability	0,2672
Minimum	3,95
Maximum	25,18
Mean Std. Error	0,05

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $g(t)$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 17,6 MPa και η τυπική απόκλιση 4,71. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$g(t)$ (MPa)
0	26,4
1	24,7
2	23,0
3	21,3
4	19,5
5	17,6
6	15,7
7	13,9
8	11,9
9	9,8
10	8,0
11	5,7
12	3,5
13	1,6
14	-1

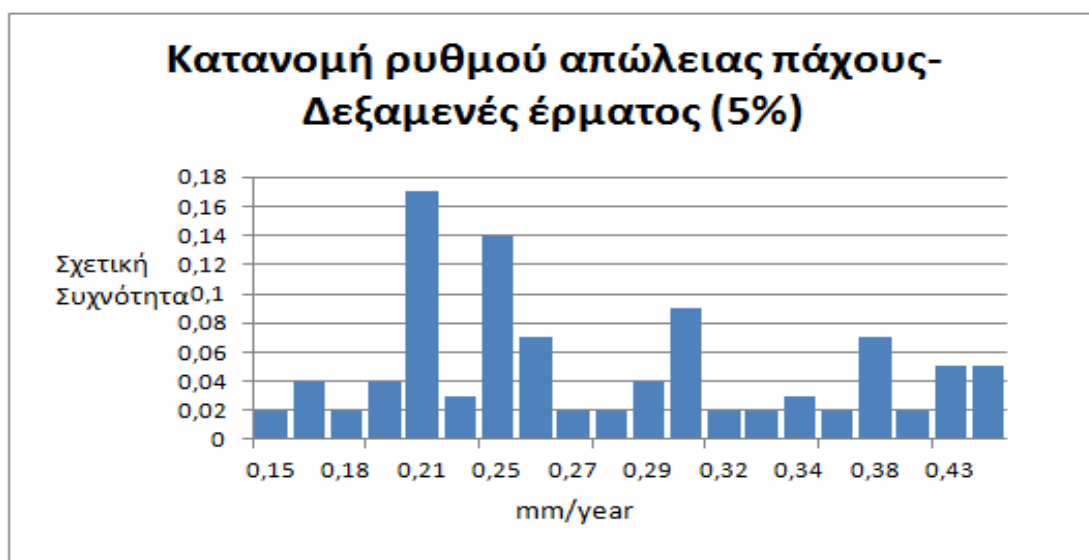
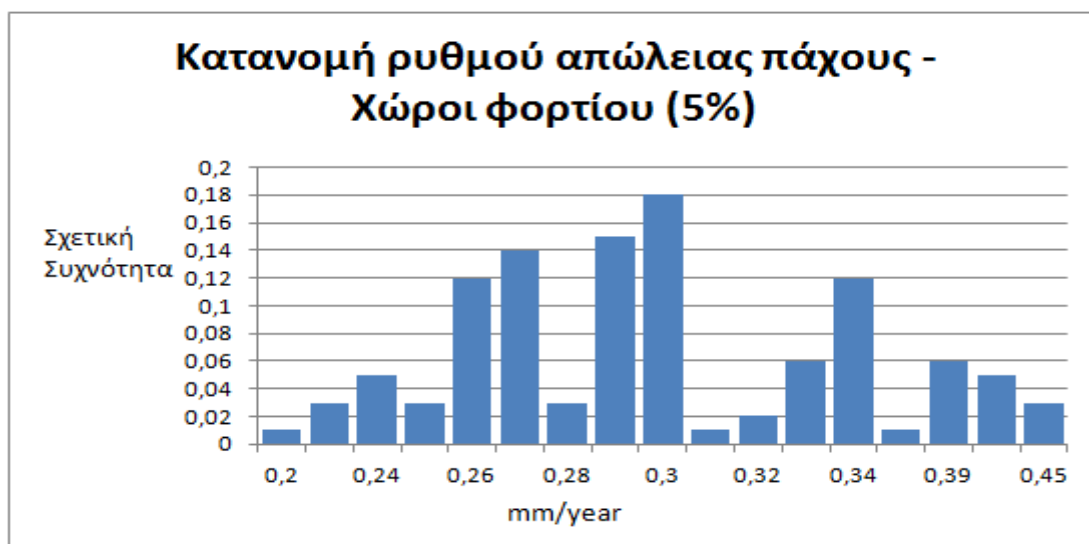


Στο παραπάνω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $g(t)$  σε MPa για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη.

Παρατηρούμε ότι μετά το 13<sup>ο</sup> έτος δεν έχουμε περιθώριο αντοχής δηλαδή οι τάσεις που προκύπτουν από τη ροπή  $M_T$  υπερβαίνουν την κρίσιμη τάση λυγισμού του καταστρώματος.

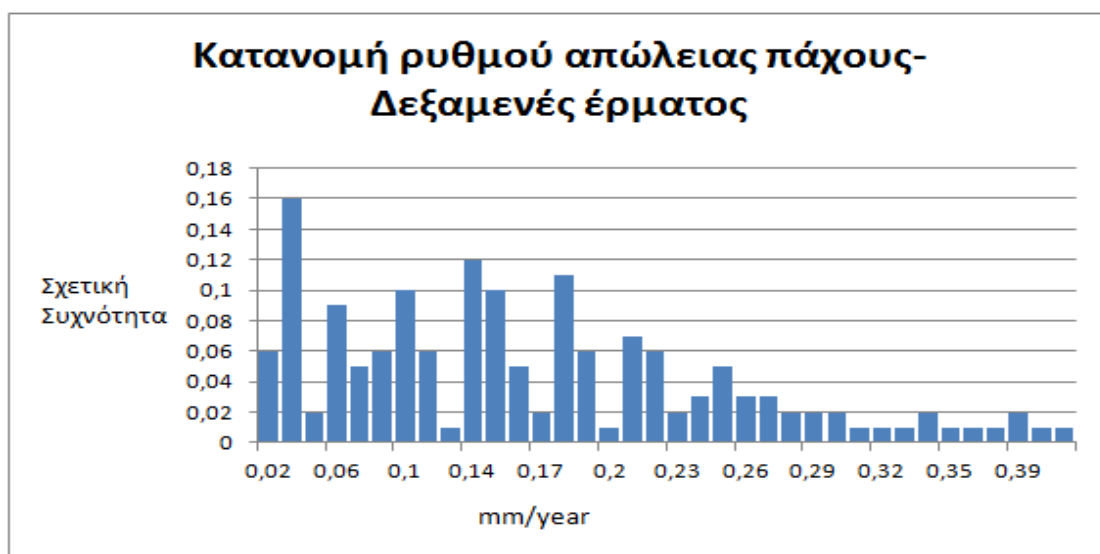
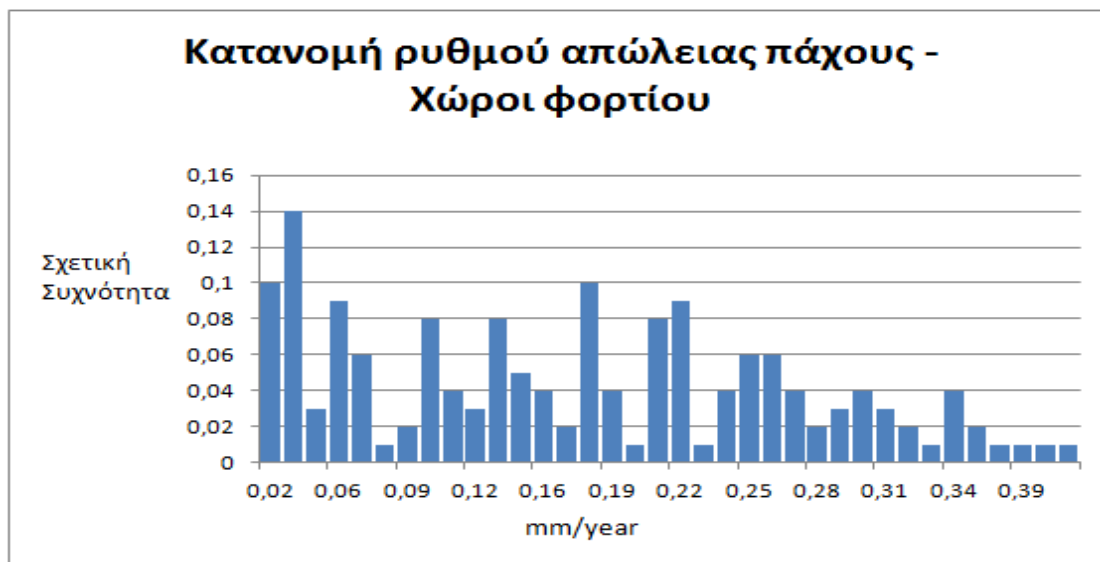
4.4.1.5 Πιθανοθεωρητικός υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του ελάσματος του καταστρώματος, του  $SM_{DECK}$  της μέσης τομής και του περιθωρίου αντοχής  $g(t)$ , σύμφωνα με την κατανομή του ρυθμού απώλειας πάχους που προέκυψε χρησιμοποιώντας το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων.

Στην ενότητα αυτή θα εφαρμόσουμε την προσομοίωση Monte Carlo στο Crystal ball και όπως ακριβώς και στα προηγούμενα θα υπολογίσουμε τις τιμές των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$ , με τη διαφορά ότι για τον υπολογισμό των κατανομών των σχετικών συχνοτήτων των ρυθμών απώλειας πάχους δεν θα χρησιμοποιηθούν όλες οι μετρήσεις απώλειας πάχους που περιλαμβάνονται στους αντίστοιχους πίνακες του Yamamoto [πίνακες 1( δεξαμενές έρματος) και 2(δεξαμενές φορτίου), οι οποίοι παρατίθενται στην ενότητα 2 της παρούσας εργασίας στο κομμάτι της περιγραφής του μοντέλου του Yamamoto], αλλά το 5 % των δυσμενέστερων μετρήσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ηλικία. Τα διαγράμματα των κατανομών αυτώ τόσο για τους χώρους φορτίου, όσο και για τις δεξαμενές έρματος έχουν ως εξής:



Στον οριζόντιο άξονα των παραπάνω διαγραμμάτων έχουμε τις τιμές του ρυθμού απώλειας πάχους σε mm/year και στον κάθετο άξονα τη σχετική συχνότητα εμφάνισης της κάθε τιμής.

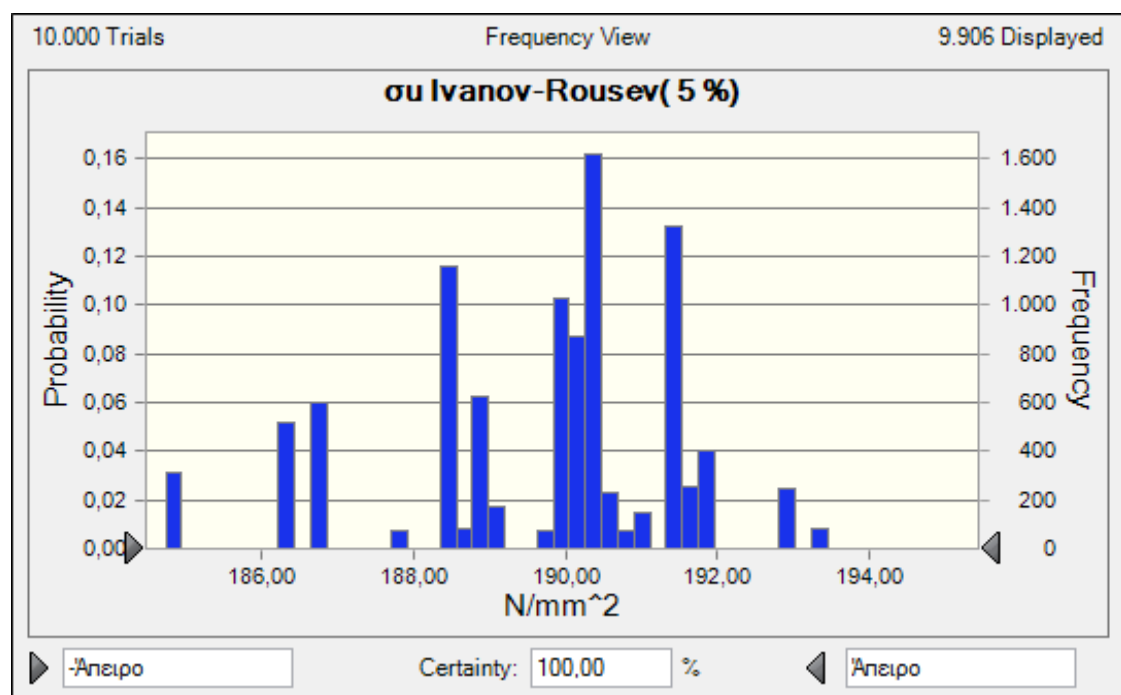
Για λόγους σύγκρισης παραθέτουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας όλες τις μετρήσεις απώλειας πάχους.



Παρατηρούμε ότι οι τιμές του ρυθμού απώλειας πάχους ανά έτος που προέκυψαν από το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων παρουσιάζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από μια μέση τιμή, δηλαδή μικρότερη διασπορά σε σχέση με την περίπτωση που χρησιμοποιούνται όλες οι τιμές των μετρήσεων απώλειας πάχους.

Στη συνέχεια οι κατανομές που προέκυψαν από το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων θα χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα για τον υπολογισμό της κρίσιμης τάσης λυγισμού  $\sigma_u$ , του  $SM_{DECK}$  και του περιθώριο αντοχής  $g(t)$ , μέσω της προσομοίωσης Monte Carlo. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των  $\sigma_u$  και  $g(t)$  θα χρησιμοποιηθεί ο ένας από τους τέσσερις τρόπους υπολογισμού της κρίσιμης τάσης λυγισμού, γιατί αυτό που μας ενδιαφέρει στην παρούσα ενότητα είναι η σύγκριση των τιμών των ανωτέρω μεγεθών ( $\sigma_u$ ,  $g(t)$  και  $SM_{DECK}$ ) όπως αυτές υπολογίζονται είτε χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα από τις μετρήσεις είτε το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ηλικία. ( Το ποιός από τους τέσσερις τρόπους υπολογισμού προβλέπει μικρότερες και μεγαλύτερες τιμές για τα  $\sigma_u$  και  $g(t)$  το είδαμε στην προηγούμενη ενότητα). Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε εδώ το μοντέλο λυγισμού των Ivanov-Rousev γιατί υπολογίζει ενδιάμεσες τιμές μεταξύ των τιμών που υπολογίζουν τα μοντέλα των Faulkner και Carlsen.

#### Υπολογισμός τιμών $\sigma_u$ ανά ηλικία

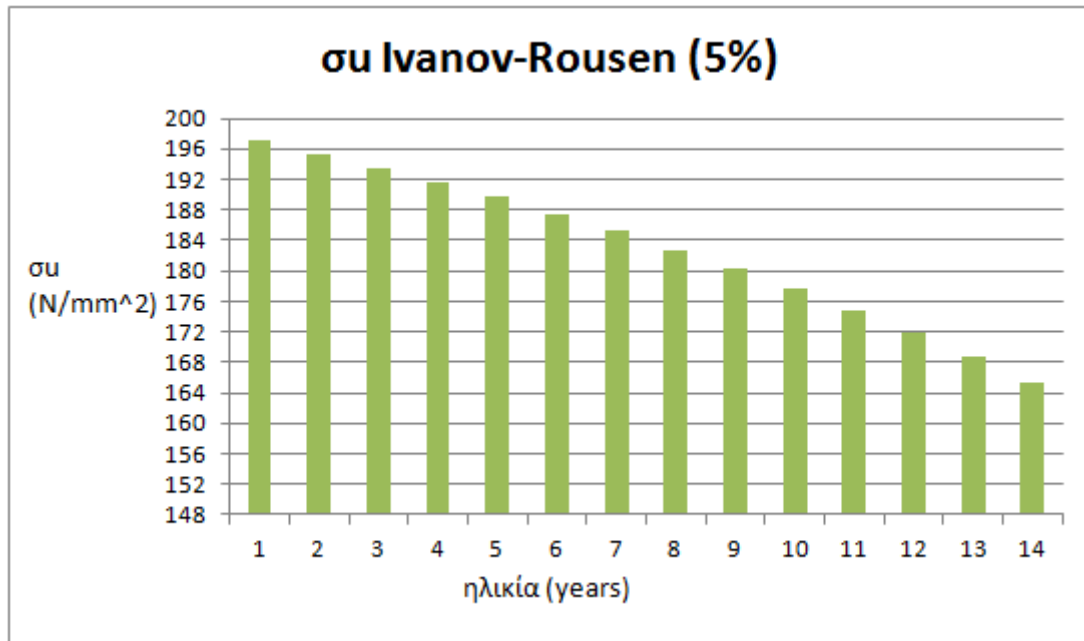


Forecast: ου Ivanov-Rousev( 5 %)	
Statistic	Forecast values
Trials	10.000
Mean	189,70
Median	190,09
Mode	190,26
Standard Deviation	1,94
Variance	3,78
Skewness	-0,1773
Kurtosis	4,67
Coeff. of Variability	0,0102
Minimum	184,74
Maximum	197,18
Mean Std. Error	0,02

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $\sigma_u$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ,για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 189,70 N/mm<sup>2</sup> και η τυπική απόκλιση 1,94. Η κατανομή της τιμής του  $\sigma_u$  στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται όλες οι μετρήσεις παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά από εδώ , καθώς όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα η τιμή της τυπικής απόκλισης ήταν 2,39 δηλαδή μεγαλύτερη από την τιμή που παρουσιάζει εδώ. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες( συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

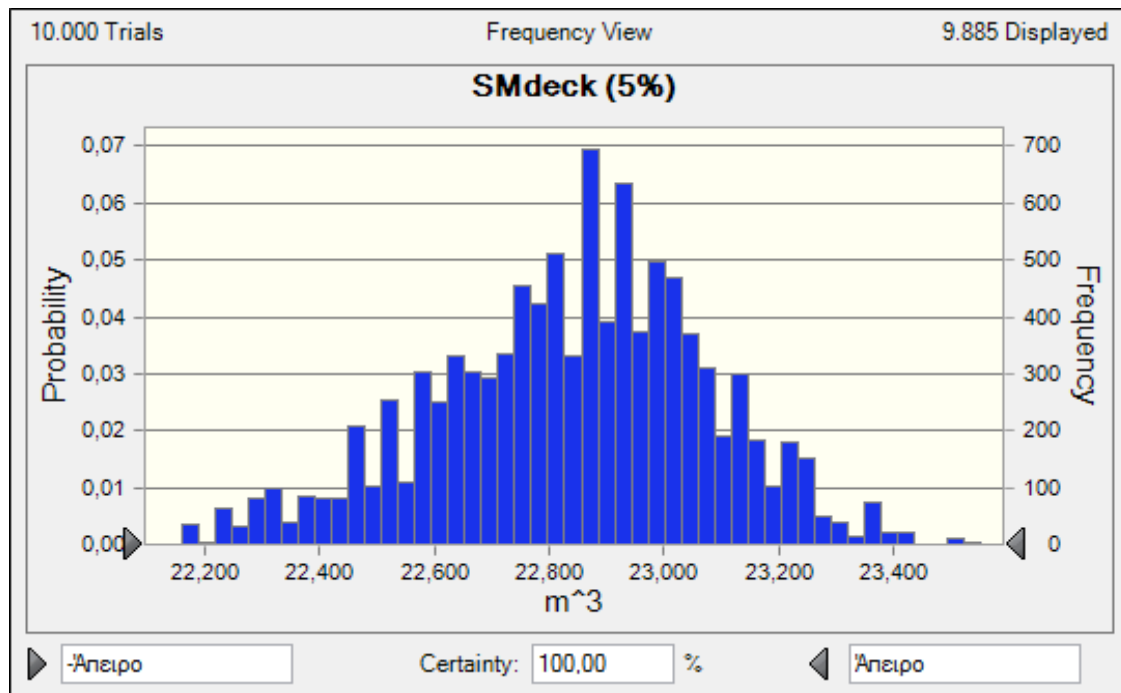


Ηλικίες (years)	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
0	198,687
1	197,08
2	195,36
3	193,55
4	191,68
5	189,7
6	187,5
7	185,18
8	182,8
9	180,31
10	177,59
11	174,78
12	171,79
13	168,69
14	165,2



Στο παραπάνω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $\sigma_u$  σε  $\text{N/mm}^2$  για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη.

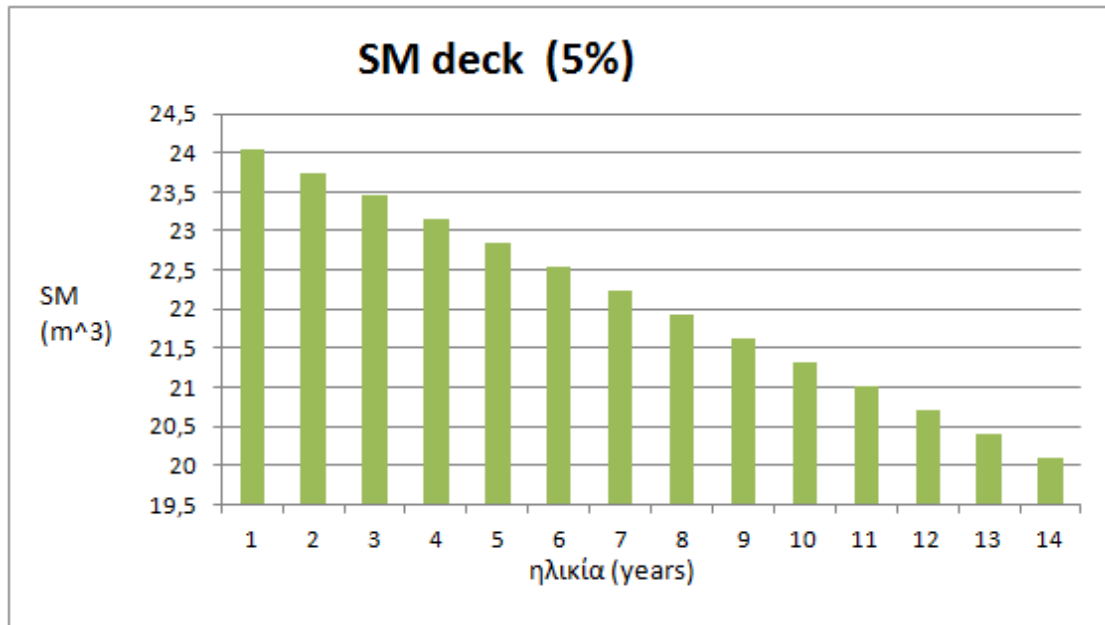
Υπολογισμός τιμών  $SM_{DECK}$  ανά ηλικία



Forecast: SMdeck (5%)	
Statistic Forecast values	
Trials	10.000
Mean	22,842
Median	22,861
Mode	23,001
Standard Deviation	0,254
Variance	0,064
Skewness	-0,0198
Kurtosis	3,88
Coeff. of Variability	0,0111
Minimum	22,083
Maximum	24,098
Mean Std. Error	0,003

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $SM_{DECK}$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι  $22,842m^3$  και η τυπική απόκλιση 0,254. Η κατανομή της τιμής του  $SM_{DECK}$  στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται όλες οι μετρήσεις παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά από εδώ, καθώς όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα η τιμή της τυπικής απόκλισης ήταν 0,322 δηλαδή μεγαλύτερη από την τιμή που παρουσιάζει εδώ. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες (συνολικά 14 φορές), οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

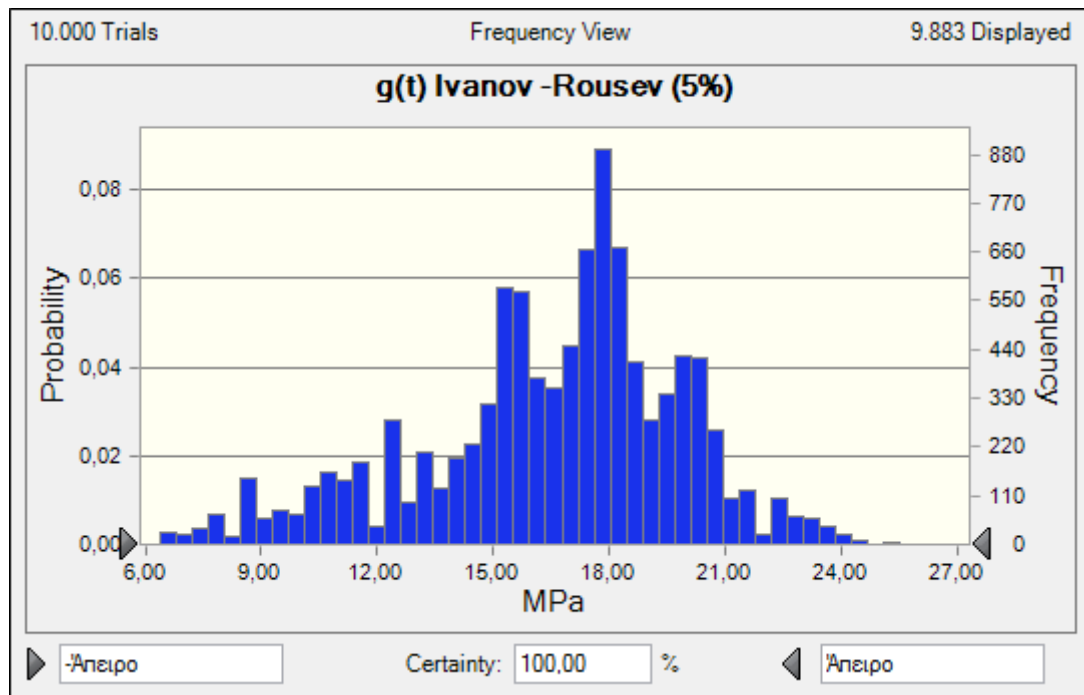
Ηλικίες (years)	$SM_{DECK}$ ( $m^3$ )
0	24,348
1	24,048
2	23,744
3	23,447
4	23,144
5	22,842
6	22,535
7	22,228
8	21,930
9	21,623
10	21,323
11	21,020
12	20,721
13	20,412
14	20,102



Στο παραπάνω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του SM σε m<sup>3</sup> για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη.

Παρατηρούμε ότι από το 6<sup>ο</sup> έτος και μετά οι τιμές του SM είναι μικρότερες από την τιμή του απαιτούμενου SM ( $SM_{req} = 22,63 \text{ m}^3$ ).

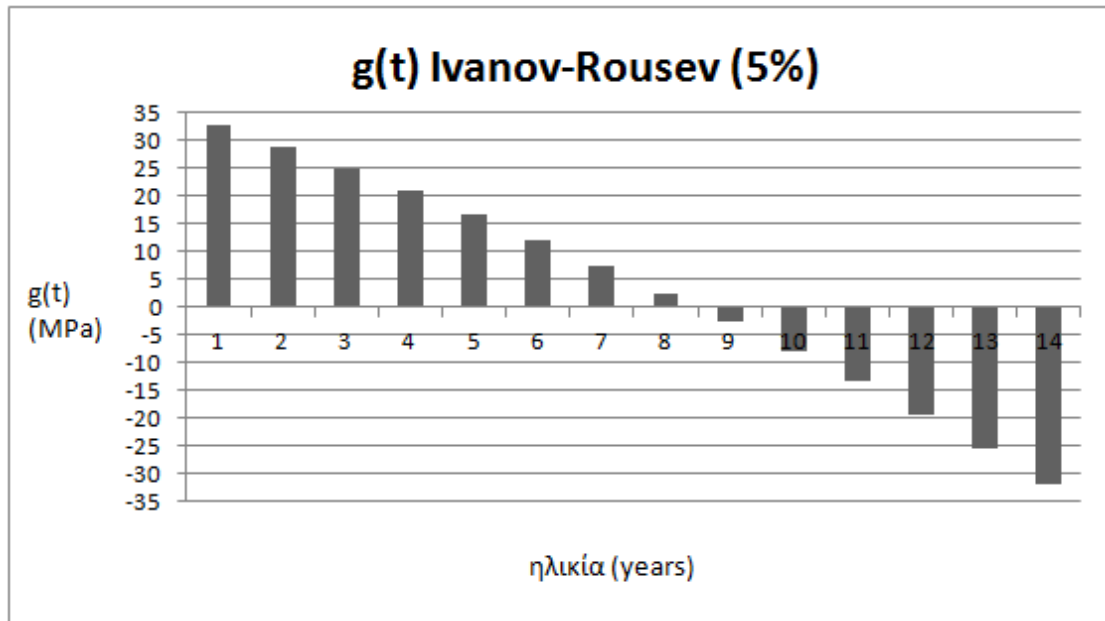
Υπολογισμός τιμών  $g(t)$  ανά ηλικία



Forecast: $g(t)$ Ivanov -Rousev (5%)	
Statistic Forecast values	
Trials	10.000
Mean	16,57
Median	17,19
Mode	17,97
Standard Deviation	3,64
Variance	13,26
Skewness	-0,2137
Kurtosis	4,32
Coeff. of Variability	0,2198
Minimum	5,76
Maximum	33,17
Mean Std. Error	0,04

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή της τιμής του  $g(t)$  και στον πίνακα που ακολουθεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της, για την ηλικία των 5 ετών όπως αυτή προέκυψε από τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo στο Crystal ball. Η μέση τιμή της κατανομής είναι 16,6 MPa και η τυπική απόκλιση 3,64. Η κατανομή της τιμής του  $SM_{DECK}$  στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται όλες οι μετρήσεις παρουσιάζει μεγαλύτερη διασπορά από εδώ, καθώς όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα η τιμή της τυπικής απόκλισης ήταν 4,58 δηλαδή μεγαλύτερη από την τιμή που παρουσιάζει εδώ. Τρέχοντας την προσομοίωση Monte Carlo για όλες τις ηλικίες (συνολικά 14 φορές) οι μέσες τιμές των αντίστοιχων κατανομών που προέκυψαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ηλικίες (years)	$g(t)$ (MPa)
0	36,4
1	32,7
2	28,9
3	25,0
4	20,9
5	16,6
6	12,1
7	7,3
8	2,5
9	-2,6
10	-7,8
11	-13,4
12	-19,3
13	-25,3
14	-31,7



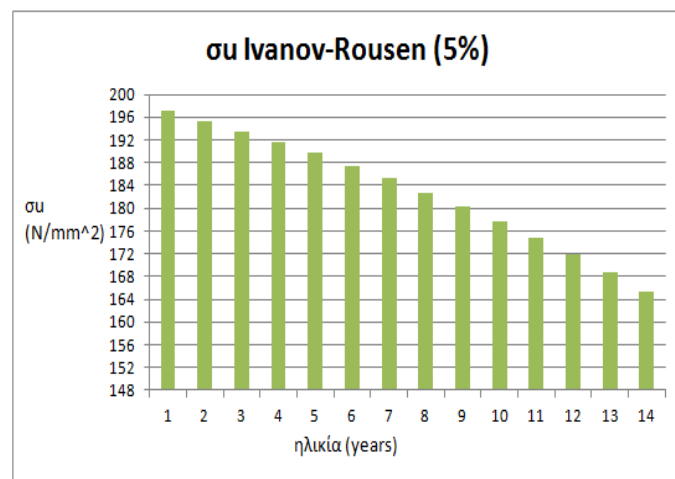
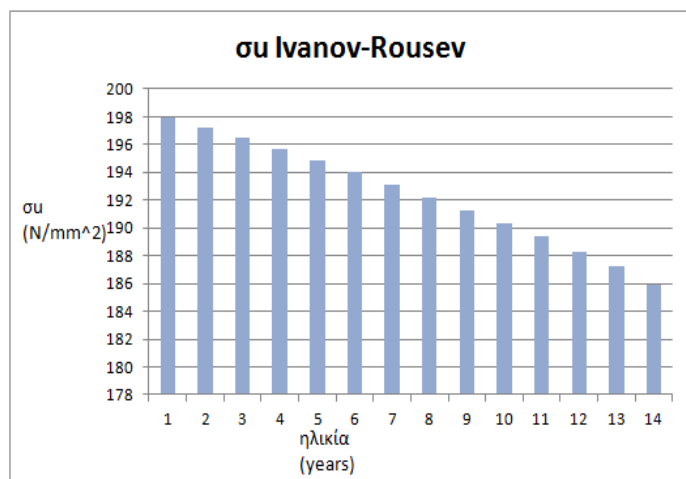
Στο παραπάνω διάγραμμα στον κατακόρυφο άξονα έχουμε τις τιμές του  $g(t)$  σε MPa για τις αντίστοιχες ηλικίες από 0 έως 14 έτη.

Παρατηρούμε ότι μετά το 8<sup>ο</sup> έτος δεν έχουμε περιθώριο αντοχής δηλαδή οι τάσεις που προκύπτουν από τη ροπή  $M_T$  υπερβαίνουν την κρίσιμη τάση λυγισμού του καταστρώματος.



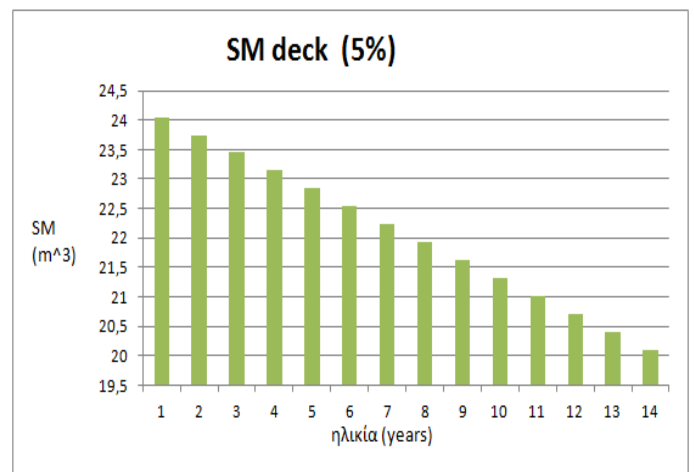
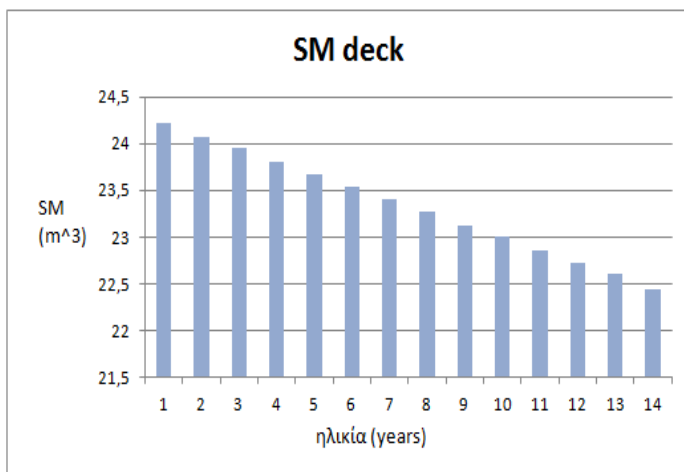
Σύγκριση των τιμών των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  που προέκυψαν ανά ηλικία χρησιμοποιώντας το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων απώλειας πάχους, με τις αντίστοιχες που προέκυψαν χρησιμοποιώντας όλες τις μετρήσεις.

### Κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_u$



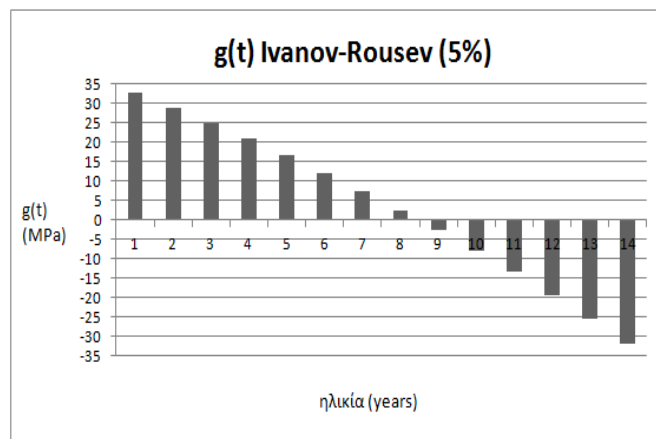
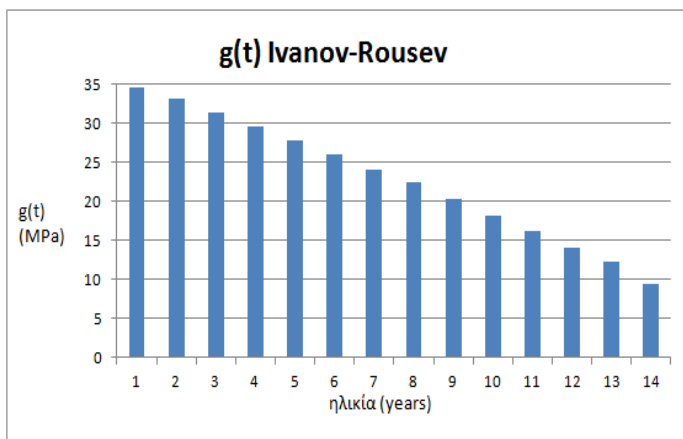
Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ο ρυθμός μείωσης της κρίσιμης τάσης λυγισμού  $\sigma_u$  είναι σχεδόν σταθερός αλλά οι τιμές του στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται το 5% των μετρήσεων ανά ηλικία είναι μικρότερες από την περίπτωση που χρησιμοποιούνται το σύνολο των μετρήσεων. Αυτό είναι λογικό διότι το 5% περιλαμβάνει τις δυσμενέστερες μετρήσεις απώλειας πάχους( δηλ τις μετρήσεις ανά ηλικία με τη μεγαλύτερη τιμή απώλειας πάχους). Κατά συνέπεια προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές του ρυθμού απώλειας πάχους ανά έτος και επομένως μικρότερες τιμές του  $\sigma_u$ .

## SM<sub>DECK</sub>



Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ο ρυθμός μείωσης του  $SM_{DECK}$  είναι σχεδόν σταθερός αλλά οι τιμές του στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται το 5% των μετρήσεων ανά ηλικία είναι μικρότερες από την περίπτωση που χρησιμοποιούνται το σύνολο των μετρήσεων. Αυτό είναι λογικό διότι το 5% περιλαμβάνει τις δυσμενέστερες μετρήσεις απώλειας πάχους (δηλ τις μετρήσεις ανά ηλικία με τη μεγαλύτερη τιμή απώλειας πάχους). Κατά συνέπεια προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές του ρυθμού απώλειας πάχους ανά έτος επομένως μεγαλύτερη απώλεια πάχους ανά έτος σε κάθε έλασμα και τελικά μεγαλύτερη μείωση του  $SM_{DECK}$ . Επίσης παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το σύνολο των μετρήσεων οι τιμές του  $SM$  είναι μικρότερες από την τιμή του απαιτούμενου  $SM$  ( $SM_{req} = 22,63 \text{ m}^3$ ) από το 13<sup>ο</sup> έτος και μετά, ενώ στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων, από το 6<sup>ο</sup> έτος και μετά.

## Περιθώριο αντοχής $g(t)$



Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ο ρυθμός μείωσης του  $g(t)$  είναι σχεδόν σταθερός αλλά οι τιμές του στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το 5% των μετρήσεων ανά ηλικία είναι μικρότερες από την περίπτωση που χρησιμοποιούνται το σύνολο των μετρήσεων. Αυτό είναι λογικό διότι το 5% περιλαμβάνει τις δυσμενέστερες μετρήσεις απώλειας πάχους (δηλ τις μετρήσεις ανά ηλικία με τη μεγαλύτερη τιμή απώλειας πάχους). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη μείωση των  $\sigma_u$  και  $SM_{DECK}$  που απαρτίζουν το  $g(t)$ . Επίσης παρατηρούμε ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το 5% των μετρήσεων ανά ηλικία, μετά το 8<sup>ο</sup> έτος δεν έχουμε περιθώριο αντοχής δηλαδή οι τάσεις που προκύπτουν από τη ροπή  $M_T$  υπερβαίνουν την κρίσιμη τάση λυγισμού του καταστρώματος.

## Συμπέρασμα

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ναι μεν οι κατανομές των τιμών των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  ανά ηλικία παρουσιάζουν μικρότερη διασπορά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται το 5% των δυσμενέστερων μετρήσεων ανά ηλικία των δεδομένων του Yamamoto από την περίπτωση που χρησιμοποιούνται όλες οι μετρήσεις, οι τιμές όμως ανά ηλικία που προκύπτουν για τα αντίστοιχα μεγέθη είναι μικρότερες και αυτό είναι λογικό, μπορεί όμως με αυτόν τον τρόπο να υπερεκτιμάται η απώλεια πάχους ανά έτος και αυτό φαίνεται εντονότερα τόσο στον υπολογισμό του  $g(t)$  όπου πολύ νωρίς (δηλ μετά το 8<sup>ο</sup> έτος) έχει χαθεί το περιθώριο αντοχής και το  $g(t)$  λαμβάνει αρνητικές τιμές, όσο και στον υπολογισμό του  $SM_{DECK}$  που από το 6<sup>ο</sup> έτος και μετά παίρνει τιμές μικρότερες από το απαιτούμενο ( $SM_{req}$ ).

4.4.2 Υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του καταστρώματος  $\sigma_u$ , του  $SM_{DECK}$  και του περιθωρίου αντοχής  $g(t)$ , ανά έτος σύμφωνα με τις απώλειες πάχους που προβλέπονται από την εφαρμογή μοντέλου διάβρωσης.

Όπως είδαμε στα προηγούμενα ο υπολογισμός των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  ανά ηλικία πραγματοποιήθηκε πιθανοθεωρητικά με τη χρήση της προσομοίωσης Monte Carlo και αξιοποιώντας κατανομές ρυθμών απώλειας πάχους που προέκυψαν από τους πίνακες δεδομένων από μετρήσεις σε δεξαμενές έρματος και φορτίου του Yamamoto. Στην ενότητα αυτή ο υπολογισμός των τιμών των ανωτέρω μεγεθών θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση μοντέλου διάβρωσης. Όπως είδαμε στη δεύτερη ενότητα της παρούσας εργασίας, από την εφαρμογή και την σύγκριση των μοντέλων για ομοιόμορφη διάβρωση, το μη γραμμικό μοντέλο των Qin & Cui παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία και από αυτό με κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους του προκύπτουν και άλλα από τα μοντέλα διάβρωσης που περιγράφηκαν στη σχετική ενότητα. Για το λόγο αυτό το μοντέλο των Qin & Cui θα χρησιμοποιηθεί εδώ αρχικά για τον υπολογισμό της μέσης απώλειας πάχους ανά ηλικία τόσο στις δεξαμενές φορτίου όσο και στις δεξαμενές έρματος και θα χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή του τα δεδομένα του Yamamoto με βάση τα οποία έγιναν οι πιθανοθεωρητικοί υπολογισμοί στην προηγούμενη ενότητα. Στη συνέχεια αφού υπολογιστούν οι απώλειες πάχους ανά ηλικία, με βάση τις τιμές του πάχους που προκύπτουν θα γίνει ο υπολογισμός των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  ανά ηλικία.

Όπως είδαμε το μοντέλο των Qin & Cui έχει την παρακάτω μορφή:

$$d(t) = \begin{cases} 0 & \text{για } 0 \leq t \leq T_{st} \\ d^\infty \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{t-T_{st}}{\eta}\right)^\beta\right)\right] & \text{για } T_{st} \leq t \leq T_L \end{cases}$$

Για  $\eta=9.19$ ,  $\beta= 1.99$  (έχουν υπολογιστεί εμπειρικά),  $T_{st}= 5$  years (διάρκεια ζωής προστατευτικού επιστρώματος),  $d^\infty = 2,05$  στις δεξαμενές φορτίου και  $d^\infty = 2,57$  στις δεξαμενές έρματος (τιμές απώλειας πάχους που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες ηλικίες των μετρήσεων) έχουμε:

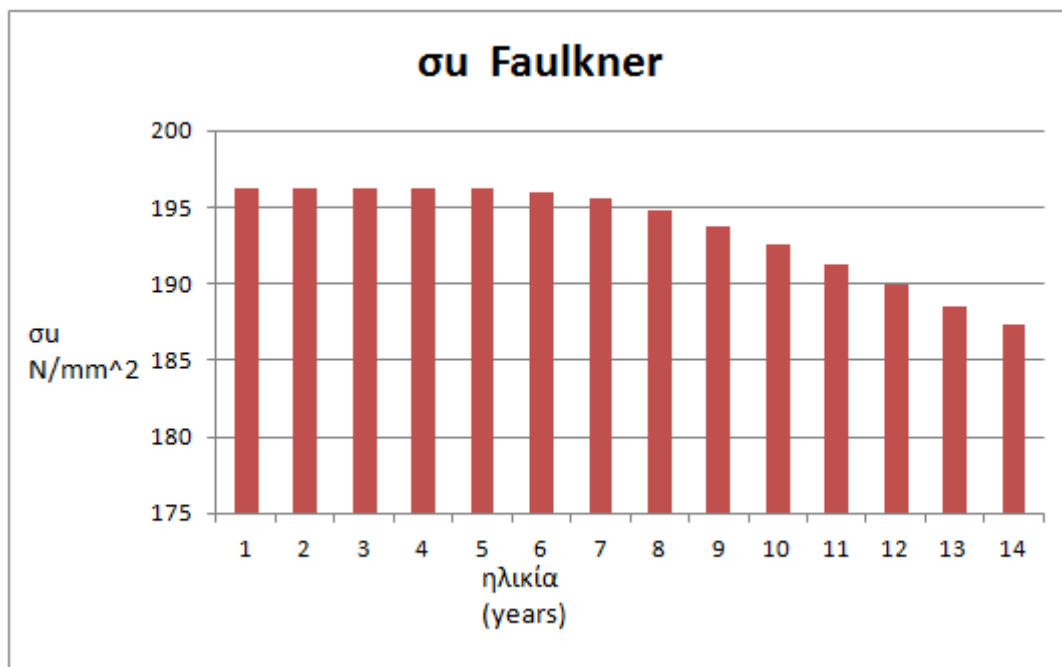
Ηλικίες (years)	Μέση τιμή απωλειών πάχους(mm) (Δεξαμενές φορτίου)	Μέση τιμή απωλειών πάχους(mm) (Δεξαμενές έρματος)
0~5	0	0
6	0,024668	0,030925
7	0,096251	0,120666
8	0,209429	0,262552
9	0,356479	0,446903
10	0,528007	0,66194
11	0,713891	0,894976
12	0,904232	1,133598
13	1,090173	1,366704
14	1,264503	1,585255

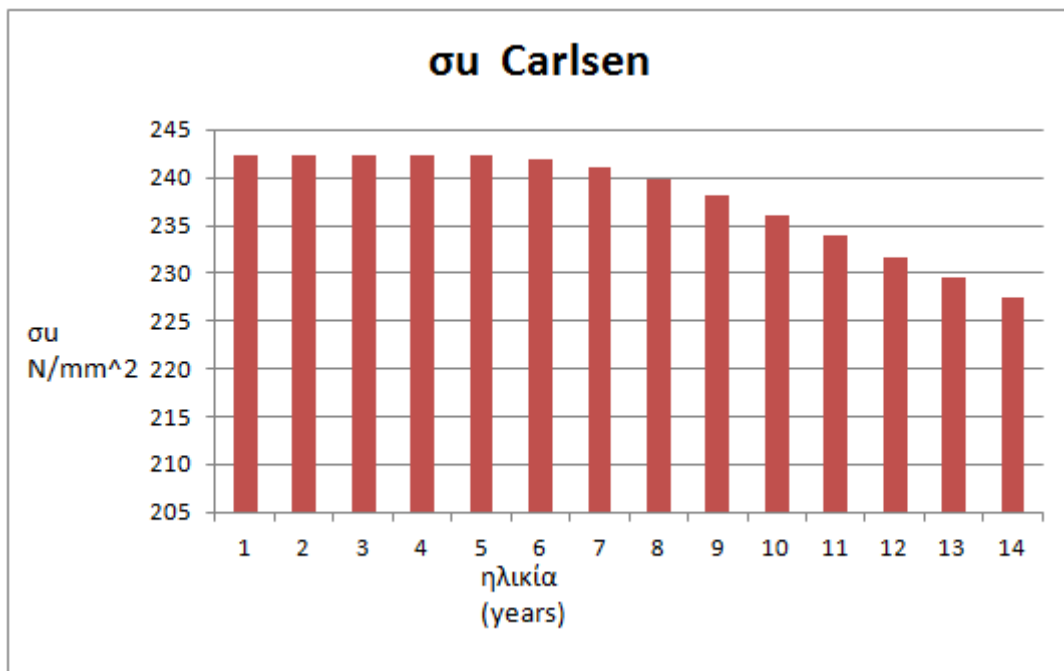
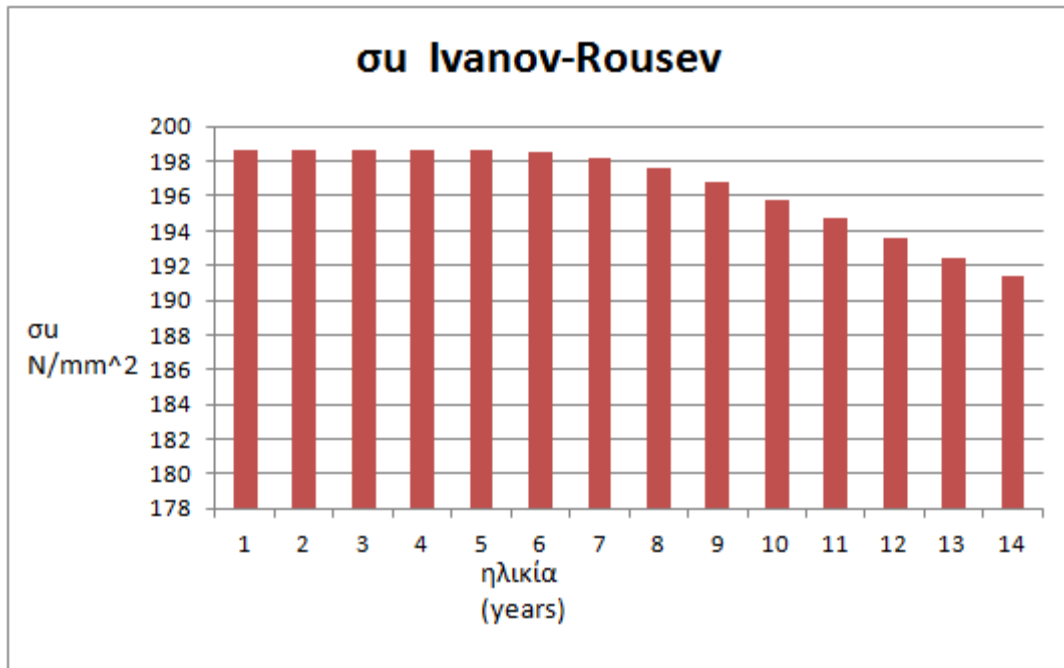
Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα από 0 έως 5 έτη δεν έχουμε απώλειες πάχους λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος.

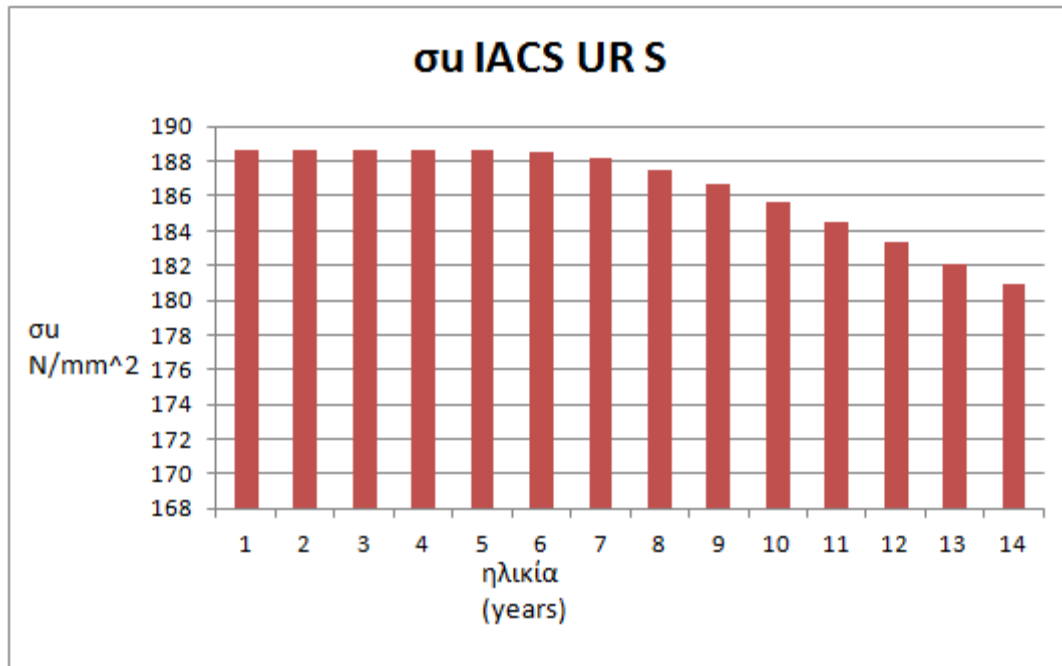
Άρα οι τιμές του  $\sigma_u$  του καταστρώματος ανά ηλικία για καθένα από τα τρία μοντέλα υπολογισμού κρίσιμης τάσης λυγισμού και για τον κανονισμό IACS UR S11.5.2, έχουν ως εξής:

Ηλικίες (years)	$\sigma_u$ Faulkner (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ Ivanov- Rousev (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ Carlsen (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ IACS UR S (N/mm <sup>2</sup> )
0~5	196,1839	198,6874	242,2445	188,6827
6	196,0192	198,5596	241,9588	188,548
7	195,5393	198,1854	241,129	188,1538
8	194,7745	197,584	239,8149	187,5201
9	193,7699	196,7843	238,1035	186,6774
10	192,5824	195,8245	236,1014	185,6658
11	191,2765	194,7505	233,9245	184,5332
12	189,9187	193,6129	231,6876	183,3325
13	188,5723	192,4634	229,4946	182,1178
14	187,292	191,35	227,4314	180,9395

Και τα αντίστοιχα διαγράμματα έχουν ως εξής:







Στα παραπάνω διαγράμματα στον οριζόντιο άξονα φαίνεται η ηλικία του πλοίου και στον κατακόρυφο η κρίσιμη τάση λυγισμού που αντιστοιχεί σε κάθε ηλικία. Παρατηρούμε ότι στα πέντε πρώτα έτη η κρίσιμη τάση λυγισμού έχει σταθερή τιμή γιατί λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος δεν έχουμε απώλειες πάχους και μειώνεται από το 6<sup>ο</sup> έτος όπου από εκεί και πέρα η μείωση στα επόμενα έτη γίνεται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Παρατηρούμε και εδώ ότι το μοντέλο του Faulkner προβλέπει μικρότερες τιμές της κρίσιμης τάσης λυγισμού για κάθε ηλικία από τα άλλα μοντέλα και το μοντέλο του Carlsen μεγαλύτερες ενώ ο κανονισμός IACS UR S11.5.2 προβλέπει μικρότερες τιμές και από τα τρία μοντέλα.

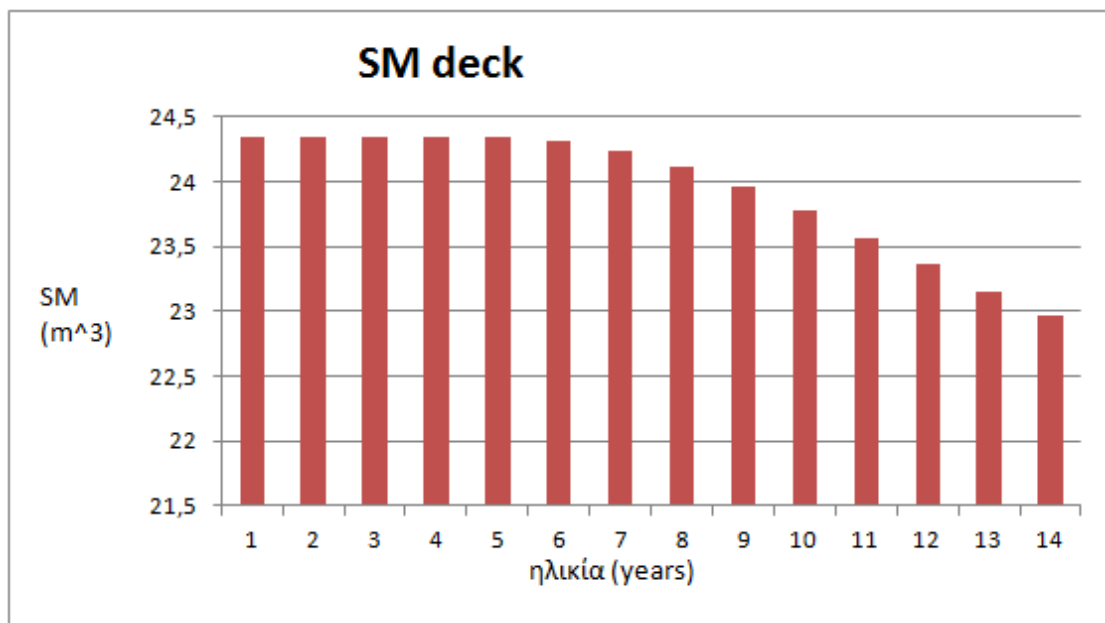
Υπολογισμός του  $SM_{DECK}$  με βάση τις μέσες τιμές απώλειας πάχους ανά ηλικία που προβλέφθηκαν από το μοντέλο των Qin & Cui

Επειδή τα ελάσματα της μέσης τομής που συμμετέχουν στον υπολογισμό του  $SM_{DECK}$  είναι ελάσματα που ανήκουν και σε δεξαμενές φορτίου αλλά και σε δεξαμενές έρματος, χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς οι τιμές απώλειας πάχους που προβλέφθηκαν από το μοντέλο των Qin & Cui και για τα δύο αυτά είδη ελασμάτων αφαιρώντας κάθε φορά την απώλεια πάχους που αντιστοιχεί στο κάθε είδος ελάσματος. Από τους υπολογισμούς προέκυψαν οι παρακάτω τιμές του  $SM$  ανά ηλικία:



Ηλικίες (years)	SM (m <sup>3</sup> )
0~5	24,348
6	24,321
7	24,243
8	24,119
9	23,958
10	23,771
11	23,567
12	23,359
13	23,155
14	22,964

Και το αντίστοιχο διάγραμμα έχει ως εξής :



Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος έχουμε τις τιμές των ηλικιών και στον κατακόρυφο τις αντίστοιχες τιμές του SM.

Παρατηρούμε ότι στα πέντε πρώτα έτη η τιμή του SM είναι σταθερή γιατί λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος δεν έχουμε απώλειες πάχους, από το 6<sup>ο</sup> έτος μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος ακολουθεί μείωσή τους με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό και μετά το 8<sup>ο</sup> έχουμε μείωση με μεγαλύτερο και σχεδόν σταθερό ρυθμό.

Παρατηρούμε ότι για όλα τα έτη οι τιμές του SM είναι μεγαλύτερες από την τιμή του απαιτούμενου SM ( $SM_{req} = 22,63 \text{ m}^3$ ) (υπολογίστηκε σε προηγούμενη ενότητα).

Υπολογισμός του περιθωρίου αντοχής g(t) με βάση τις τιμές των  $\sigma_u$  και  $SM_{DECK}$  που προέκυψαν με βάση την εφαρμογή του μοντέλου των Qin & Cui στις προβλέψεις απώλειας πάχους.

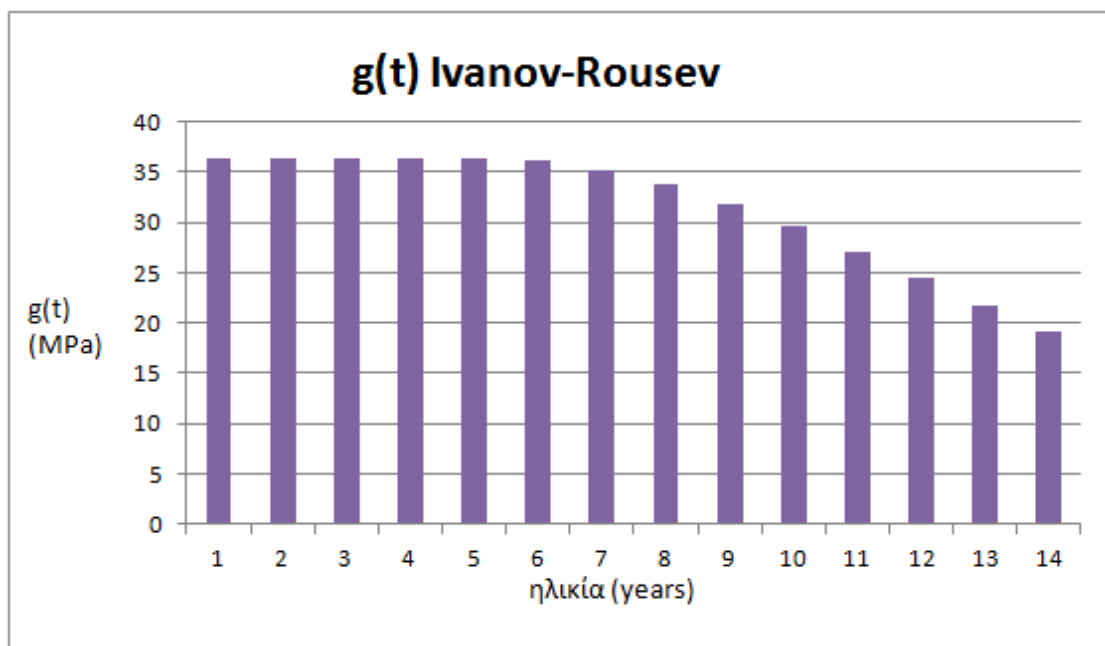
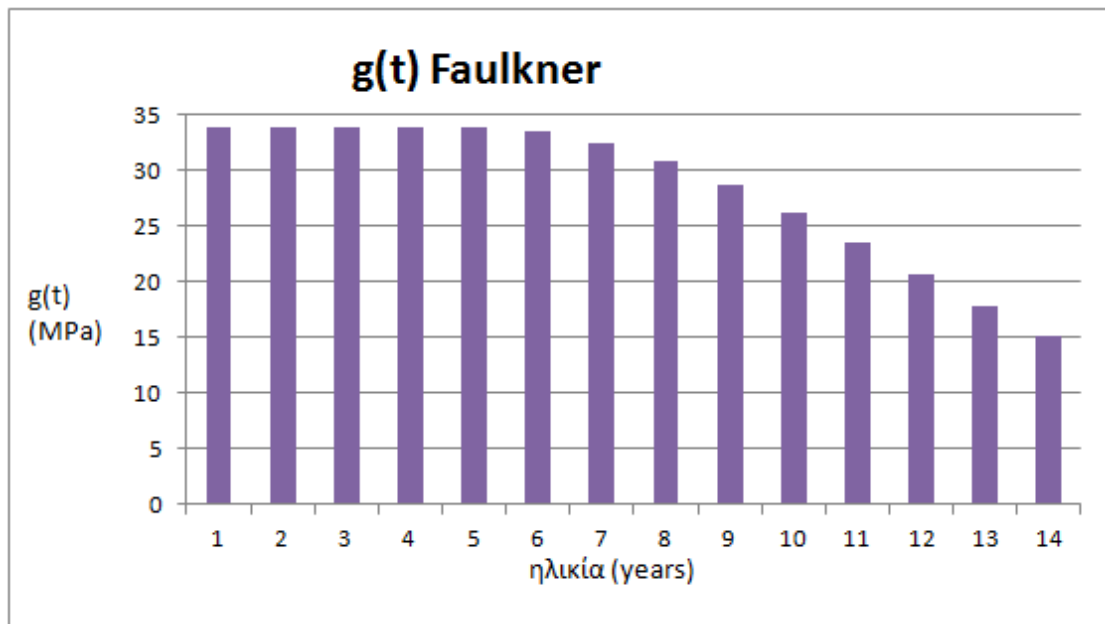
Όπως είδαμε το περιθώριο αντοχής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

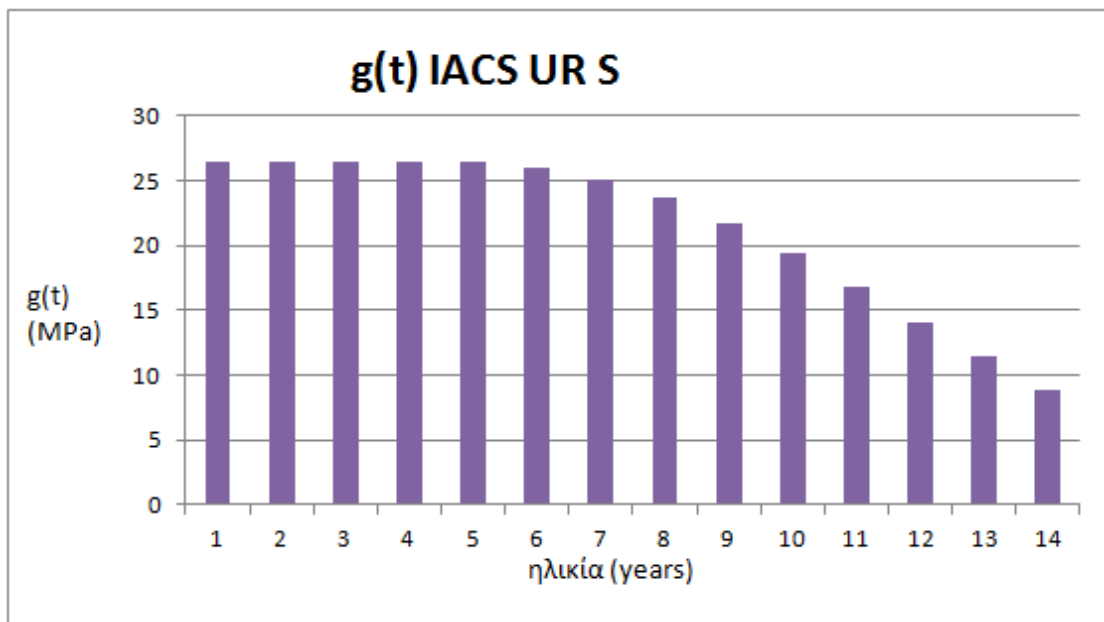
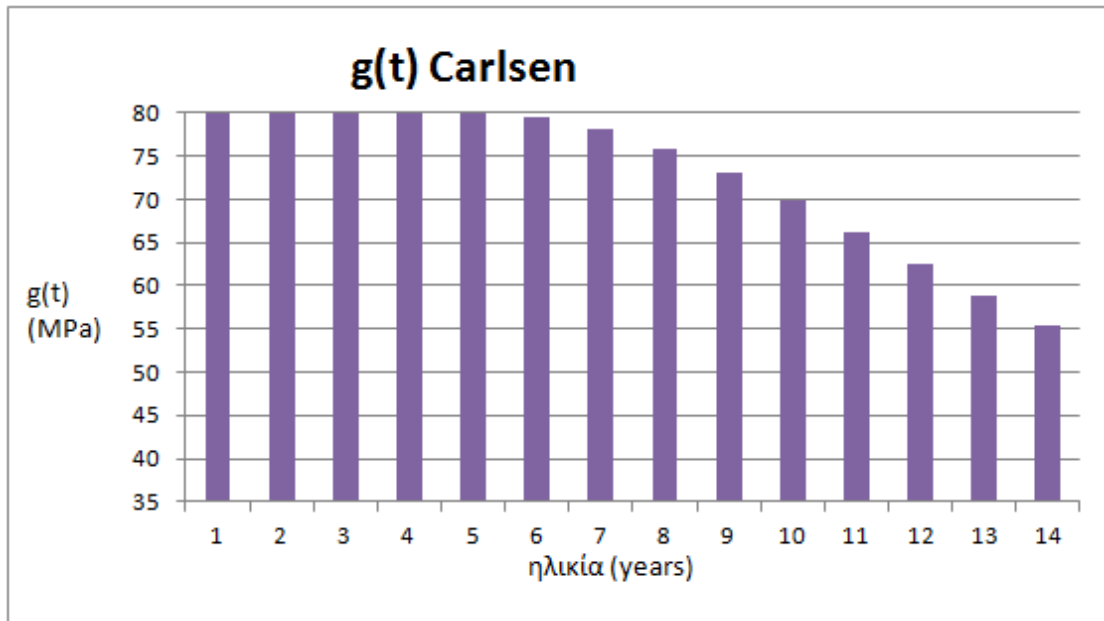
$$g(t) = \sigma_u(t) - \sigma(t) = \sigma_u(t) - \frac{M_T}{SM_{DECK}}$$

Το  $M_T$  είναι σταθερό και ίσο με  $M_T = 3952333 \text{ kN m}$ , το  $SM_{DECK}$  υπολογίστηκε ανάλογα με την ηλικία και το  $\sigma_u$  παίρνει τιμές ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ανά ηλικία.

Ηλικίες (years)	g(t) Faulkner (MPa)	g(t) Ivanov-Rousev (MPa)	g(t) Carlsen (MPa)	g(t) IACS UR S (MPa)
0~5	33,9	36,4	79,9	26,4
6	33,5	36,1	79,5	26,0
7	32,5	35,2	78,1	25,1
8	30,9	33,7	75,9	23,7
9	28,8	31,8	73,1	21,7
10	26,3	29,6	69,8	19,4
11	23,6	27,0	66,2	16,8
12	20,7	24,4	62,5	14,1
13	17,9	21,8	58,8	11,4
14	15,2	19,2	55,32	8,8

Τα αντίστοιχα διαγράμματα έχουν ως εξής:





Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος έχουμε τις τιμές των ηλικιών και στον κατακόρυφο τις αντίστοιχες τιμές του  $g(t)$  σε MPa. Παρατηρούμε ότι στα πέντε πρώτα έτη η τιμή του  $g(t)$  είναι σταθερή γιατί λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος δεν έχουμε απώλειες πάχους και μειώνεται από το 6<sup>ο</sup> έτος και μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος ακολουθεί μείωσή τους με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό και μετά το 8<sup>ο</sup> έχουμε μείωση με μεγαλύτερο και σχεδόν σταθερό ρυθμό.

4.4.3 Υπολογισμός της κρίσιμης τάσης λυγισμού του καταστρώματος  $\sigma_u$ , του  $SM_{DECK}$  και του περιθωρίου αντοχής  $g(t)$ , αφαιρώντας από όλα τα ελάσματα την προσθήκη  $t_c$  λόγω διάβρωσης.

Σύμφωνα με IACS CSR for bulk carriers, Chapter 3, Section 3( corrosion additions), η προσθήκη για τη διάβρωση  $t_c$  ισούται με:

$$t_c = \text{Roundup}_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + t_{\text{reserve}} \text{ (mm)}$$

όπου

$t_{c1}, t_{c2}$  : οι προσθήκες για τη διάβρωση για καθεμία από τις δύο πλευρές του ελάσματος σε mm

$t_{\text{reserve}}$  : επιπλέον προσθήκη για τη διάβρωση , η οποία ισούται με  $t_{\text{reserve}} = 0,5$  mm

Τα  $t_{c1}, t_{c2}$  για τους διαφόρους τύπους ελασμάτων δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Table 1: Corrosion addition on one side of structural members

Compartment Type	Structural member		Corrosion addition, $t_{c1}$ or $t_{c2}$ in mm	
			BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other
Ballast water tank <sup>(2)</sup>	Face plate of primary members	Within 3m below the top of tank <sup>(3)</sup>	2.0	
		Elsewhere	1.5	
	Other members	Within 3 m below the top of tank <sup>(3)</sup>	1.7	
		Elsewhere	1.2	
Dry bulk cargo hold <sup>(1)</sup>	Transverse bulkhead	Upper part <sup>(4)</sup>	2.4	1.0
		Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate	5.2	2.6
		Other parts	3.0	1.5
	Other members	Upper part <sup>(4)</sup>	1.8	1.0
		Webs and flanges of the upper end brackets of side frames of single side bulk carriers		
		Webs and flanges of lower brackets of side frames of single side bulk carriers	2.2	1.2
		Other parts	2.0	1.2
	Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating	Continuous wooden ceiling	2.0	1.2
No continuous wooden ceiling		3.7	2.4	
Exposed to atmosphere	Horizontal member and weather deck <sup>(5)</sup>	1.7		
	Non horizontal member	1.0		
Exposed to sea water <sup>(7)</sup>			1.0	
Fuel oil tanks and lubricating oil tanks <sup>(2)</sup>			0.7	
Fresh water tanks			0.7	
Void spaces <sup>(6)</sup>	Spaces not normally accessed, e.g. access only through bolted manholes openings, pipe tunnels, etc.		0.7	
Dry spaces	Internal of deck houses, machinery spaces, stores spaces, pump rooms, steering spaces, etc.		0.5	
Other compartments than above			0.5	

[29]

Με βάση τον παραπάνω πίνακα οι τιμές των  $t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  για κάθε έλασμα της μέσης τομής που εξετάζουμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Έλασμα	Πάχος μαζί με το περιθώριο διάβρωσης (mm)	$t_{c1}$ (mm)	$t_{c2}$ (mm)	$t_{reserve}$ (mm)	$t_c$ (mm)	$0,5 t_c$ (mm)	Καθαρό πάχος (mm)
Πυθμένα	21	2	1	0,5	4	2	19
Εσωτ πυθμένα	16	1,2	2	0,5	4	2	14
Κεντρικής σταθμίδας	18	2	2	0,5	4	2	16
Πλευρικής σταθμίδας	13	2	2	0,5	5	2,5	10,5
Κυρτού γάστρας	21	2	1	0,5	4	2	19
Παρατροπιδίων	21	1	1	0,5	3	1,5	19,5
Τρόπιδας	23	1	1	0,5	3	1,5	21,5
Πλευρικό έλασμα	20	1,5	1	0,5	3	1,5	18,5
Καταστρώματος	17	1,7	1	0,5	3	1,5	15,5
Υδροροής	17	2	1	0,5	4	2	15
Ζωστήρα	20	1	1	0,5	3	1,5	18,5
Διαγώνιο κάτω πλευρ Δ	15	1,2	1,5	0,5	3	1,5	13,5
Διαγώνιο άνω πλευρ Δ	14	1	2	0,5	4	2	12
Στομίων	12	1	1	0,5	3	1,5	10,5

Το πάχος χωρίς την προσθήκη του περιθωρίου διάβρωσης αποτελεί το  $t_{renewal}$  δηλ το πάχος κάτω από το οποίο το αντίστοιχο κατασκευαστικό στοιχείο χρειάζεται αντικατάσταση, σύμφωνα με IACS, Common structural rules for bulk carriers renewal criteria:

$$t_{gauged} < t_{renewal}$$

όπου

$$t_{renewal} < t_{as-built} - t_c$$

$t_{as-built}$ : το πάχος του κατασκευαστικού στοιχείου μαζί με τις προσθήκες

$t_c$ : προσθήκη πάχους

για τη διάβρωση

[25]

Σύμφωνα όμως με IACS CSR for bulk carriers 3.4.2 το πάχος των κατασκευαστικών στοιχείων που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της ολικής αντοχής του πλοίου, είναι το αρχικό πάχος  $t_{as-built}$  αφαιρώντας  $0,5 t_c$  και όχι ολόκληρο το  $t_c$

[25]. Επομένως στον παραπάνω πίνακα το καθαρό πάχος των ελασμάτων

λαμβάνεται αφαιρώντας  $0,5 t_c$  από τα αρχικά πάχη των ελασμάτων.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του πάχους των ελασμάτων χωρίς τις προσθήκες,

υπολογίζονται η κρίσιμη τάση λυγισμού  $\sigma_u$  του καταστρώματος, το  $SM_{DECK}$  και το

περιθώριο αντοχής  $g(t)$ . Οι τιμές τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

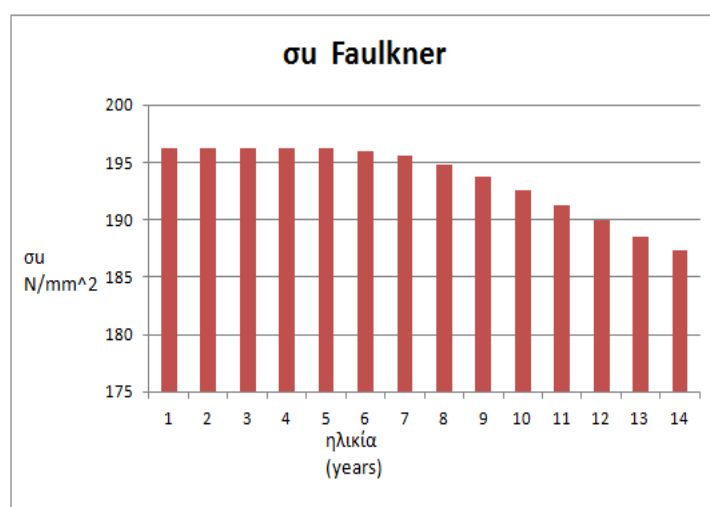
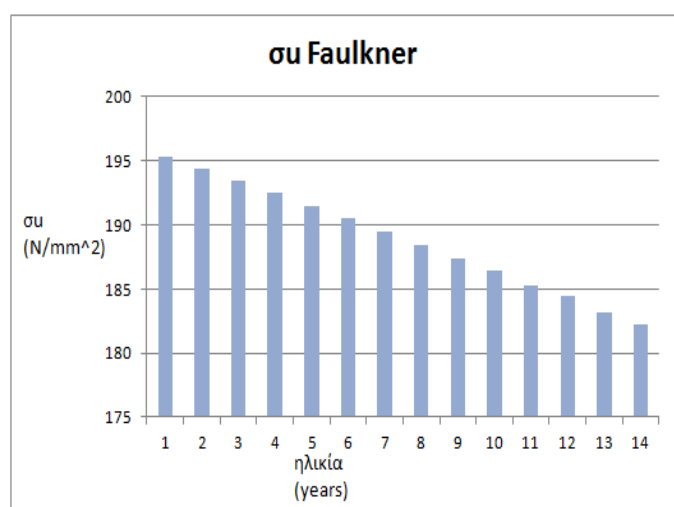
$\sigma_u$ Faulkner (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ Ivanov- Rousev (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ Carlsen (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ IACS UR S11 (N/mm <sup>2</sup> )	$SM_{DECK}$ (m <sup>3</sup> )	$g(t)$ Faulkner (MPa)	$g(t)$ Ivanov- Rousev (MPa)	$g(t)$ Carlsen (MPa)	$g(t)$ IACS UR S11 (Mpa)
185,53	189,79	224,63	179,28	22,631	10,9	15,1	50	4,6

Παρατηρούμε ότι μετά την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης  $t_c$  ο υπολογισμός του οποίου έγινε με βάση τον IACS CSR for bulk carriers, η τιμή του SM είναι σχεδόν ίδια με την τιμή του απαιτούμενου SM ( $SM_{req} = 22,63 \text{ m}^3$ ).

4.4.4 Σύγκριση των τιμών των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  που υπολογίστηκαν πιθανοθεωρητικά με αυτές που υπολογίστηκαν με τη χρήση του μοντέλου διάβρωσης Qin & Cui και με αυτές που υπολογίστηκαν με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης από τα ελάσματα

Η σύγκριση αυτή φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα( Τα διαγράμματα με μπλε χρώμα αντιστοιχούν στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό των μεγεθών, ενώ αυτά με κόκκινο χρώμα στο υπολογισμό των μεγεθών με το μοντέλο διάβρωσης):

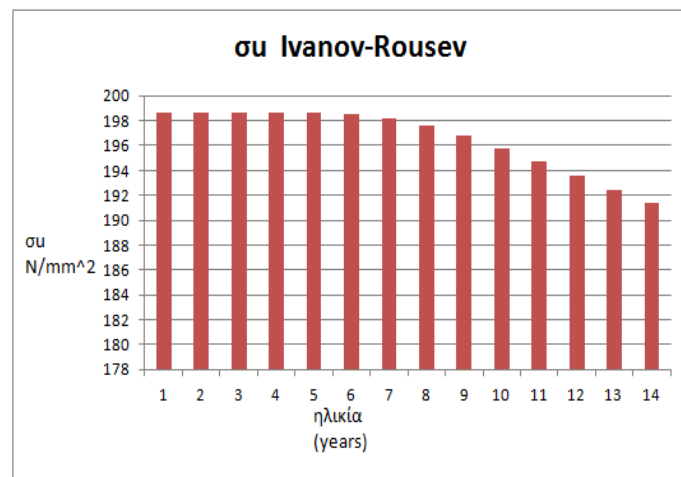
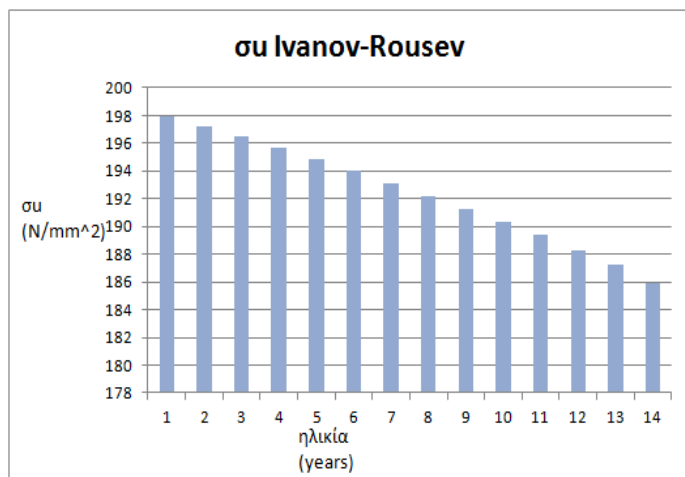
Μοντέλο λυγισμού Faulkner



Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $\sigma_u$  μειώνονται με σχεδόν σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 14 έτη, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος και μειώνονται από το 6<sup>ο</sup> έτος όπου από εκεί και πέρα η μείωση στα επόμενα έτη γίνεται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό, είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο. Η αντίστοιχη τιμή του  $\sigma_u$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος, είναι 185,53 N/mm<sup>2</sup>, μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 12<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός.

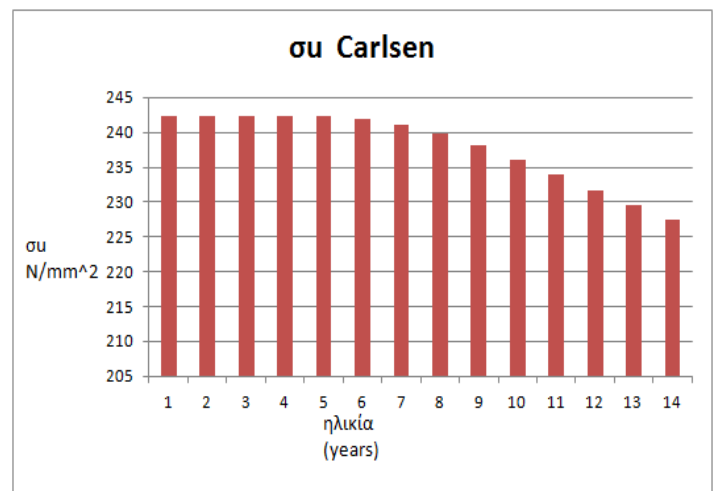
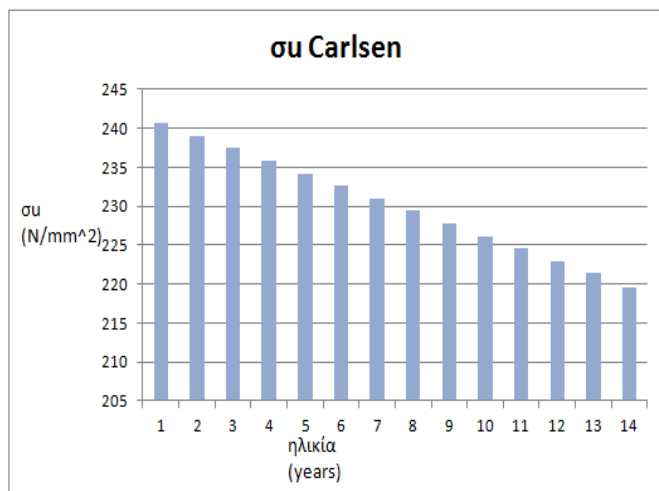


## Μοντέλο λυγισμού Ivanov-Rousev



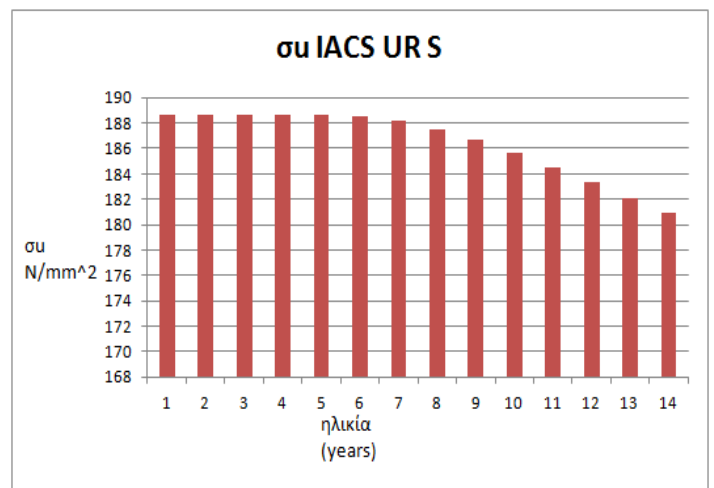
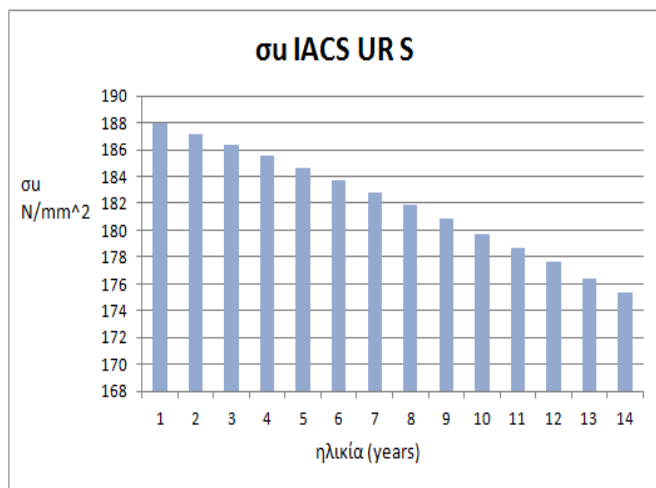
Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $\sigma_u$  μειώνονται με σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 14 έτη, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος και μειώνονται από το 6<sup>ο</sup> έτος όπου από εκεί και πέρα η μείωση στα επόμενα έτη γίνεται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό, είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο. Η αντίστοιχη τιμή του  $\sigma_u$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος, είναι  $189,79 \text{ N/mm}^2$ , μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 12<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός. Γενικά οι τιμές που προβλέπει για το  $\sigma_u$  το μοντέλο των Ivanov-Rousev είναι μεγαλύτερες από αυτές που προβλέπει το μοντέλο του Faulkner.

## Μοντέλο λυγισμού Carlsen



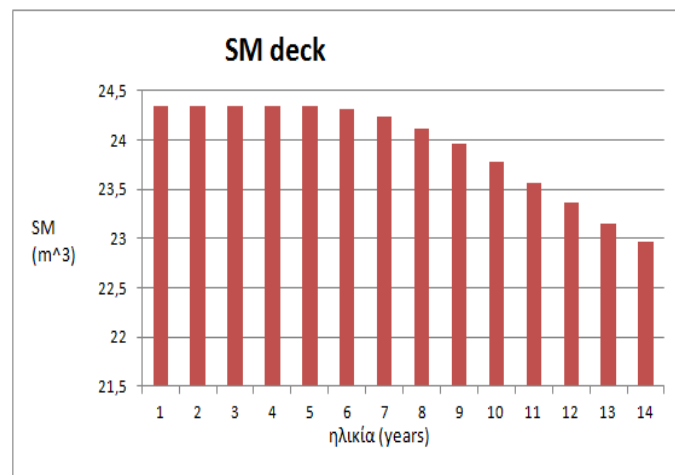
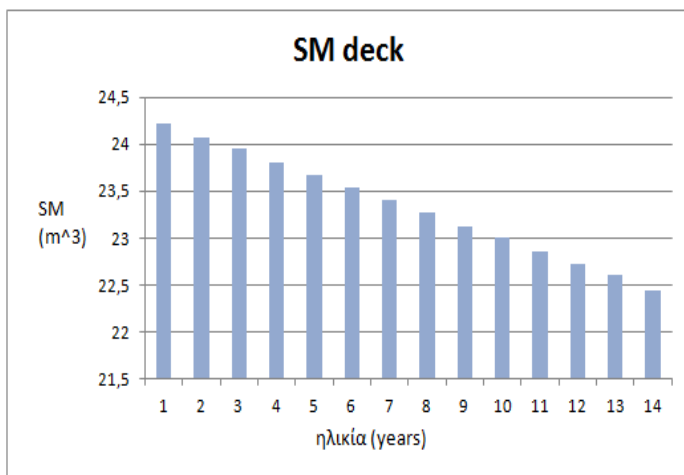
Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $\sigma_u$  μειώνονται με σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 14 έτη, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος και μειώνονται από το 6<sup>ο</sup> έτος όπου από εκεί και πέρα η μείωση στα επόμενα έτη γίνεται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό, είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο. Η αντίστοιχη τιμή του  $\sigma_u$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος, είναι 224,63 N/mm<sup>2</sup>, μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη τόσο ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός όσο και ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης. Γενικά οι τιμές που προβλέπει για το  $\sigma_u$  το μοντέλο του Carlsen είναι μεγαλύτερες από αυτές που προβλέπουν τα μοντέλα των Faulkner και Ivanov-Rousev.

## IACS UR S11.5.2



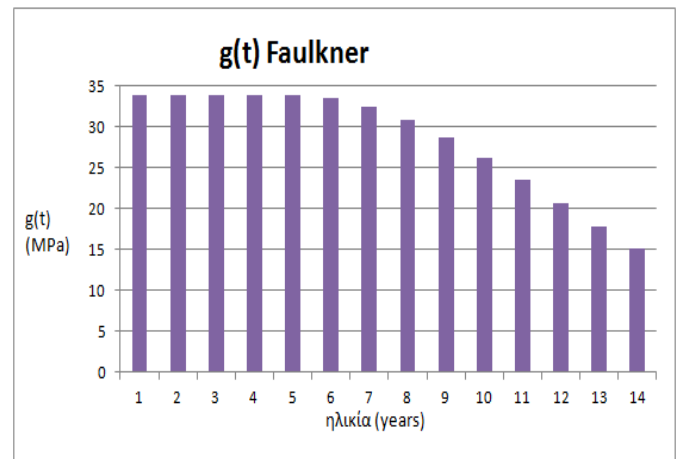
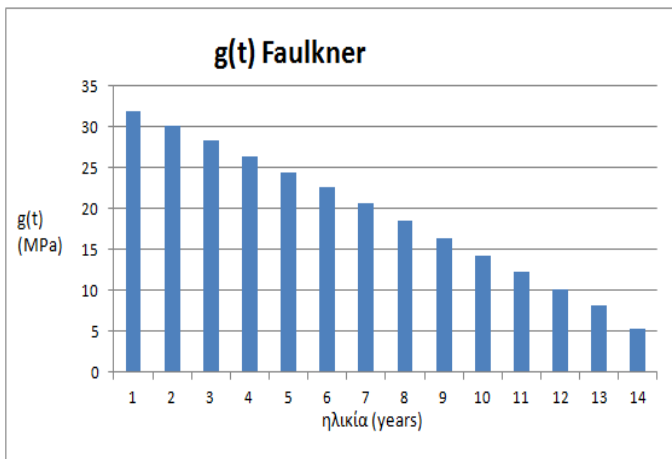
Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $\sigma_u$  μειώνονται με σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 14 έτη, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος και μειώνονται από το 6<sup>ο</sup> έτος όπου από εκεί και πέρα η μείωση στα επόμενα έτη γίνεται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό, είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο. Η αντίστοιχη τιμή του  $\sigma_u$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος, είναι  $179,28 \text{ N/mm}^2$ , μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 11<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός. Γενικά οι τιμές που προβλέπει για το  $\sigma_u$  ο κανονισμός IACS UR S11.5.2 είναι μικρότερες από αυτές που προβλέπουν τα μοντέλα των Faulkner, Ivanov-Rousev και Carlsen.

## SM<sub>DECK</sub>



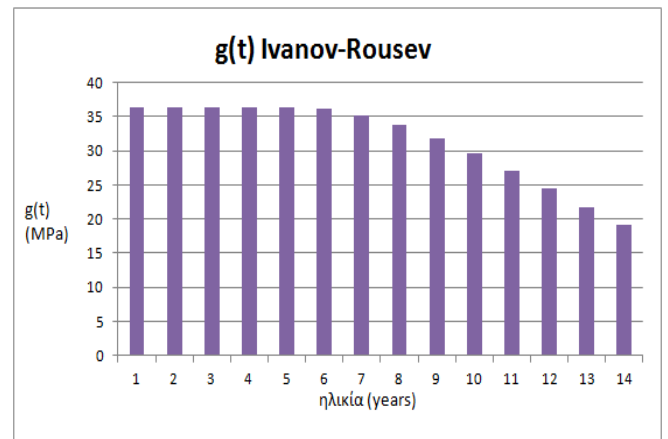
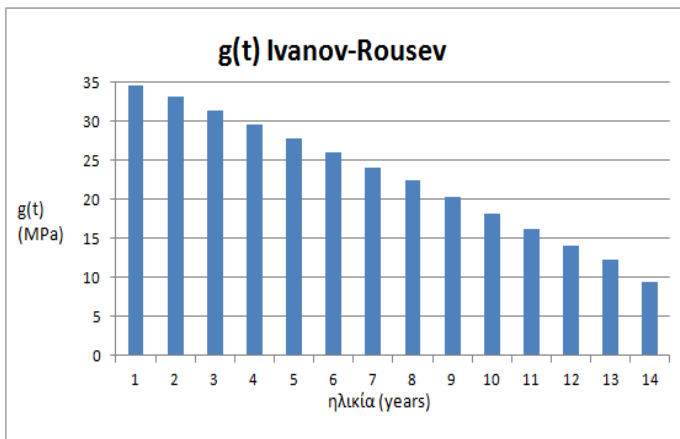
Παρατηρούμε ότι οι τιμές του SM στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό μειώνονται με σχεδόν σταθερό ρυθμό, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης είναι σταθερές τα 5 πρώτα έτη, από το 6<sup>ο</sup> έτος μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος ακολουθεί μείωσή τους με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό και μετά το 8<sup>ο</sup> έτος έχουμε μείωση με μεγαλύτερο και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Οι τιμές του SM που προβλέπονται για όλα τα έτη με βάση το μοντέλο διάβρωσης είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές που προβλέπονται πιθανοθεωρητικά. Η αντίστοιχη τιμή του SM που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στα ελάσματα της μέσης τομής, είναι 22,631 m<sup>3</sup>, μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 13<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός.

## g(t) Faulkner



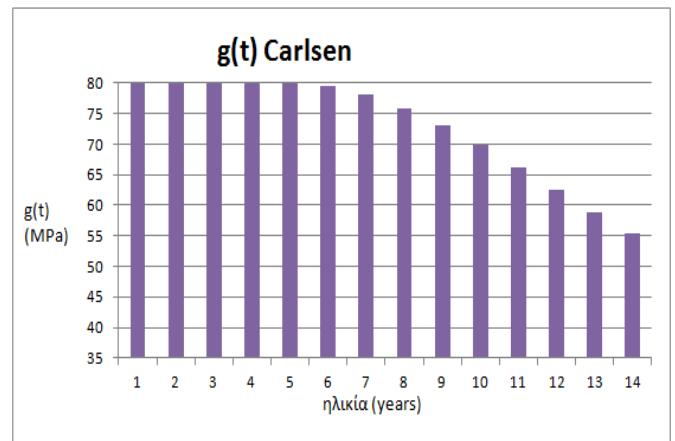
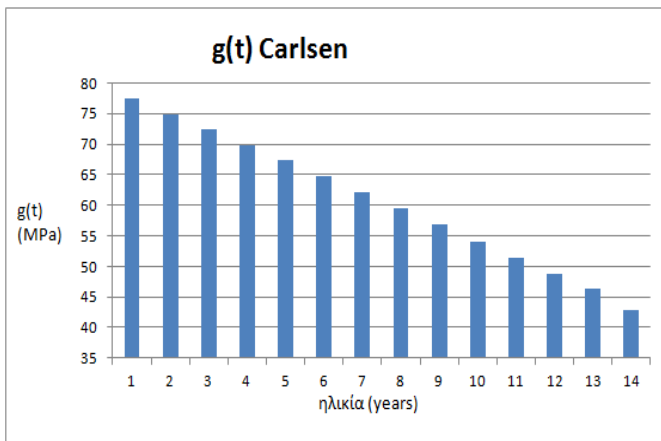
Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $g(t)$  μειώνονται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 14 έτη, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος, από το 6<sup>ο</sup> έτος μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος ακολουθεί μείωσή τους με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό και μετά το 8<sup>ο</sup> έτος έχουμε μείωση με μεγαλύτερο και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από τον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης. Η αντίστοιχη τιμή του  $g(t)$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος, είναι 10,9 MPa, μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 12<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός.

## g(t) Ivanov-Rousev



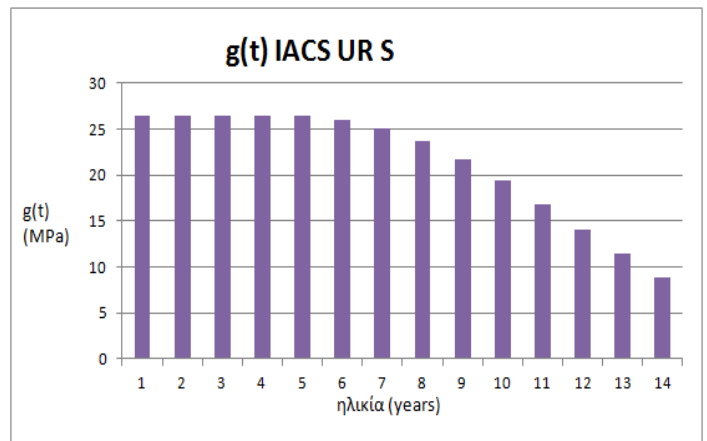
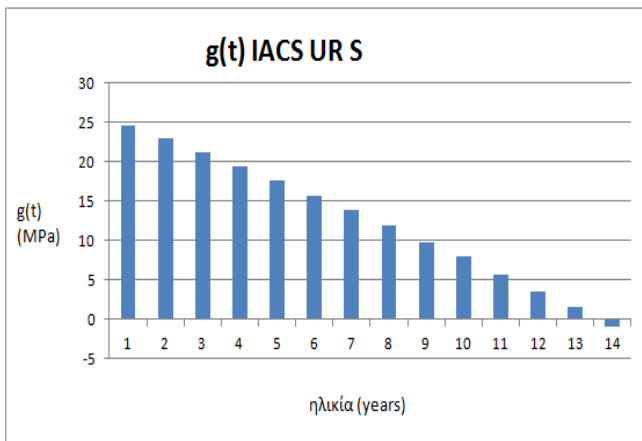
Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $g(t)$  μειώνονται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 14 έτη, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος, από το 6<sup>ο</sup> έτος μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος ακολουθεί μείωσή τους με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό και μετά το 8<sup>ο</sup> έτος έχουμε μείωση με μεγαλύτερο και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από τον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης. Η αντίστοιχη τιμή του  $g(t)$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος, είναι 15,1 Mpa, μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 12<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός. Γενικά οι τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο υπολογισμού του Ivanov και για τους δύο τρόπους υπολογισμού είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο υπολογισμού του Faulkner.

## g(t) Carlsen



Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $g(t)$  μειώνονται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 14 έτη, ενώ στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος, από το 6<sup>ο</sup> έτος μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος ακολουθεί μείωσή τους με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό και μετά το 8<sup>ο</sup> έτος έχουμε μείωση με μεγαλύτερο και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από τον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης. Η αντίστοιχη τιμή του  $g(t)$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος, είναι 50 MPa, μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 12<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός. Γενικά οι τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο υπολογισμού του Carlsen και για τους δύο τρόπους υπολογισμού είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που προβλέπονται από τα μοντέλα των Faulkner και Ivanov-Rousev.

## g(t) IACS UR S11.5.2



Παρατηρούμε ότι στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό οι τιμές του  $g(t)$  μειώνονται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό από 0 μέχρι τα 13 έτη ενώ στα επόμενα έτη το  $g(t)$  παίρνει αρνητικές τιμές δηλαδή δεν υπάρχει περιθώριο αντοχής. Στον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης οι τιμές είναι σταθερές μέχρι το 5<sup>ο</sup> έτος λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος, από το 6<sup>ο</sup> έτος μέχρι το 8<sup>ο</sup> έτος ακολουθεί μείωσή τους με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό και μετά το 8<sup>ο</sup> έτος έχουμε μείωση με μεγαλύτερο και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Επίσης οι τιμές που προβλέπονται στον πιθανοθεωρητικό υπολογισμό είναι μικρότερες από τις τιμές που προβλέπονται από τον υπολογισμό με βάση το μοντέλο διάβρωσης. Η αντίστοιχη τιμή του  $g(t)$  που υπολογίστηκε με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης, με βάση τον IACS, στο έλασμα του καταστρώματος είναι 4,6 Mpa, μικρότερη δηλαδή από τις τιμές που προέβλεψε για όλα τα έτη ο υπολογισμός με βάση το μοντέλο διάβρωσης και μεγαλύτερη από τις τιμές που προέβλεψε από το 12<sup>ο</sup> έτος και μετά ο πιθανοθεωρητικός υπολογισμός. Γενικά οι τιμές που προβλέπει για το  $g(t)$  ο κανονισμός IACS UR S11.5.2 είναι μικρότερες από αυτές που προβλέπουν τα μοντέλα των Faulkner, Ivanov-Rousev και Carlsen.



4.4.5 Σύγκεντρικοί πίνακες των τιμών των  $\sigma_u$ ,  $SM_{DECK}$  και  $g(t)$  που υπολογίστηκαν για όλα τα έτη πιθανοθεωρητικά, με τη χρήση μοντέλου διάβρωσης καθώς και με την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης σύμφωνα με IACS CSR

1. Σύγκεντρικός πίνακας των τιμών του  $\sigma_u$

ΗΛΙΚΙΑ (years)	ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ (N/mm <sup>2</sup> )					ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (N/mm <sup>2</sup> )				IACS CSR (N/mm <sup>2</sup> )			
	Faulkner	Ivanov- Rousev	Carlsen	IACS UR S	Ivanov- Rousev(5%)	Faulkner	Ivanov- Rousev	Carlsen	IACS UR S	Faulkner	Ivanov- Rousev	Carlsen	IACS UR S
0	196,18	198,69	242,24	188,68	198,687	196,184	198,69	242,24	188,683	185,53	189,79	224,63	179,28
1	195,27	197,97	240,67	187,92	197,08	196,184	198,69	242,24	188,683				
2	194,36	197,22	239,09	187,15	195,36	196,184	198,69	242,24	188,683				
3	193,43	196,49	237,51	186,32	193,55	196,184	198,69	242,24	188,683				
4	192,47	195,71	235,88	185,51	191,68	196,184	198,69	242,24	188,683				
5	191,46	194,89	234,22	184,64	189,7	196,184	198,69	242,24	188,683				
6	190,5	194,04	232,71	183,74	187,5	196,019	198,56	241,959	188,548				
7	189,48	193,1	231,01	182,85	185,18	195,539	198,185	241,129	188,154				
8	188,48	192,23	229,42	181,86	182,8	194,774	197,584	239,815	187,520				
9	187,4	191,3	227,85	180,86	180,31	193,77	196,784	238,103	186,677				

10	186,42	190,38	226,19	179,74	177,59	192,582	195,824	236,101	185,666				
11	185,26	189,37	224,66	178,67	174,78	191,276	194,75	233,924	184,533				
12	184,4	188,24	222,97	177,59	171,79	189,919	193,613	231,688	183,332				
13	183,12	187,21	221,38	176,36	168,69	188,572	192,463	229,495	182,118				
14	182,22	185,94	219,53	175,35	165,2	187,292	191,35	227,431	180,94				

## 2. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών του $SM_{DECK}$

Ηλικία (years)	ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ (5%) (m <sup>3</sup> )	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (m <sup>3</sup> )	IACS CSR (N/mm <sup>2</sup> )
0	24,348	24,348	24,348	22,631
1	24,214	24,048	24,348	
2	24,077	23,744	24,348	
3	23,945	23,447	24,348	
4	23,807	23,144	24,348	
5	23,675	22,842	24,348	
6	23,543	22,535	24,321	
7	23,407	22,228	24,243	

8	23,274	21,930	24,119	
9	23,130	21,623	23,958	
10	23,000	21,323	23,771	
11	22,863	21,020	23,567	
12	22,725	20,721	23,359	
13	22,603	20,412	23,155	
14	22,437	20,102	22,964	

### 3. Συγκεντρωτικός πίνακας των τιμών του g(t)

ΗΛΙΚΙΑ (years)	ΠΙΘΑΝΟΘΕΩΡΗΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ (MPa)					ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕ ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ (MPa)				IACS CSR (MPa)			
	Faulkner	Ivanov- Rousev	Carlsen	IACS UR S	Ivanov- Rousev(5%)	Faulkner	Ivanov- Rousev	Carlsen	IACS UR S	Faulkner	Ivanov- Rousev	Carlsen	IACS UR S
0	33,9	36,4	79,9	26,4	36,4	33,9	36,4	79,9	26,4	10,9	15,1	50	4,6
1	32	34,7	77,4	24,7	32,7	33,9	36,4	79,9	26,4				
2	30,2	33,1	74,9	23,0	28,9	33,9	36,4	79,9	26,4				
3	28,4	31,4	72,5	21,3	25,0	33,9	36,4	79,9	26,4				
4	26,4	29,6	69,8	19,5	20,9	33,9	36,4	79,9	26,4				

5	24,5	27,9	67,3	17,6	16,6	33,9	36,4	79,9	26,4				
6	22,6	26,1	64,8	15,7	12,1	33,5	36,1	79,5	26,0				
7	20,6	24	62,2	13,9	7,3	32,5	35,2	78,1	25,1				
8	18,6	22,4	59,6	11,9	2,5	30,9	33,7	75,9	23,7				
9	16,4	20,3	56,8	9,8	-2,6	28,8	31,8	73,1	21,7				
10	14,2	18,2	54,1	8,0	-7,8	26,3	29,6	69,8	19,4				
11	12,3	16,2	51,5	5,7	-13,4	23,6	27,0	66,2	16,8				
12	10,1	14,1	48,8	3,5	-19,3	20,7	24,4	62,5	14,1				
13	8,2	12,2	46,4	1,6	-25,3	17,9	21,8	58,8	11,4				
14	5,4	9,4	42,8	-1	-31,7	15,2	19,2	55,32	8,8				

## **5.ΕΠΙΛΟΓΟΣ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Ο υπολογισμός της αντοχής μέσης τομής ενός πλοίου προϋποθέτει τη γνώση του πάχους των ελασμάτων που την απαρτίζουν. Για το λόγο αυτό η εκτίμηση της εξέλιξής της με το χρόνο προϋποθέτει την εκτίμηση της απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης των ελασμάτων αυτών. Η διάβρωση όμως όποια μορφή και να έχει δηλαδή είτε ομοιόμορφη είτε τοπική, αποτελεί τυχαίο φαινόμενο γι' αυτό η πρόβλεψη της εξέλιξής της πραγματοποιείται με μοντέλα διάβρωσης τα οποία είτε αξιοποιούν άμεσα μετρήσεις απώλειας πάχους, είτε έχουν προκύψει πειραματικά από διάφορους ερευνητές. Από την εφαρμογή των μοντέλων αυτών προέκυψε ότι αυτά που αξιοποιούν άμεσα μετρήσεις απώλειας πάχους και ιδιαίτερα αυτά που είναι μη γραμμικά περιγράφουν καλύτερα την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης. Τα δεδομένα όμως από μετρήσεις που χρησιμοποιούνται στα μοντέλα, αποτελούν τυχαίες μεταβλητές και η εύρεση συσχέτισης της απώλειας πάχους σε σχέση με το χρόνο, χρησιμοποιώντας κοινές στατιστικές μεθόδους συσχέτισης δεν είναι εφικτή τις περισσότερες φορές λόγω και του αριθμού των δεδομένων που είναι διαθέσιμα αλλά και λόγω της μεγάλης διασποράς που παρουσιάζουν οι μετρήσεις αυτές ανά ηλικία πλοίου. Έτσι λόγω της τυχαιότητας των μετρήσεων απώλειας πάχους ανά ηλικία, μια πιθανοθεωρητική μέθοδος πρόβλεψης της αντοχής της μέσης τομής η οποία αξιοποιεί τις τυχαίες αυτές μετρήσεις αποτελεί μια ικανοποιητική λύση. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε η πιθανοθεωρητική μέθοδος Monte Carlo, η προσομοίωση της οποίας πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα Crystal ball. Η εκτίμηση της εξέλιξης της αντοχής μέσης τομής πραγματοποιήθηκε για τρία μοντέλα που δίνουν την κρίσιμη λυγισμό (Faulkner, Ivanov-Rousev, Carlsen) καθώς και για τη σχέση του IACS UR S11 που δίνει την κρίσιμη τάση λυγισμού. Το μοντέλο του Carlsen προβλέπει τις μεγαλύτερες τιμές από όλα τα παραπάνω για την κρίσιμη τάση λυγισμού και κατ' επέκταση για το περιθώριο αντοχής ενώ ο IACS UR S11 προβλέπει τις μικρότερες τιμές. Οι ρυθμοί μείωσης του περιθωρίου αντοχής είναι και για τις τέσσερις περιπτώσεις σχεδόν σταθεροί. Στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα της μεθόδου Monte Carlo μόνο το 5% των μετρήσεων απώλειας πάχους ανά ηλικία και μεν η διασπορά των τιμών που προέκυπταν ήταν μικρότερη αλλά υπερεκτιμούταν η μείωση της αντοχής. Στη σύγκριση των τιμών της αντοχής ανά ηλικία που προέκυψαν από την πιθανοθεωρητική μέθοδο, με αυτές που προέκυψαν από την εφαρμογή μοντέλου διάβρωσης, προέκυψε ότι οι τιμές από το μοντέλο είναι μεγαλύτερες για όλα τα έτη από τις αντίστοιχες τιμές της πιθανοθεωρητικής μεθόδου. Αυτό οφείλεται και στο ότι στα 5 πρώτα έτη το μοντέλο θεωρεί ότι υπάρχει απουσία διάβρωσης λόγω της αποτελεσματικότητας του προστατευτικού επιστρώματος ενώ στα επόμενα έτη ακολουθεί σχεδόν σταθερός ρυθμός μείωσης.

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η χρήση μεθόδων που χρησιμοποιούν άμεσα πραγματικά δεδομένα (όπως μετρήσεις απώλειας πάχους) είτε αυτές είναι πιθανοθεωρητικές, είτε μοντέλα που ανέπτυξαν διάφοροι ερευνητές, προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά τυχαία φαινόμενα όπως αυτό της διάβρωσης και κατ' επέκταση οτιδήποτε εξαρτάται άμεσα από τα φαινόμενα αυτά όπως η αντοχή μέσης τομής ενός πλοίου.

## **References**

- [1] Shengping Qin , Weicheng Cui, Effect of corrosion models on the time-dependent reliability of steel plated elements, *Marine Structures* 16 (2003) 15-34, Elsevier Ltd.
- [2] Jeom Kee Paik, Jae Myung Lee, Joon Sung Hwang , Young Il Park , Time-dependent corrosion wastage model for the structures of single and double hull tankers and FSOs and FPSOs, *Marine technology and Sname news* ,Vol. 40, No 3 , July 2003, pp 201-217.
- [3] Πέτρος Α. Καρύδης, Επιθεώρηση, συντήρηση και επισκευή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Ε.Μ.Π , Αθήνα 2002, ISBN 960-254-548-8.
- [4] Jeom Kee Paik, Ge Wang , Anil K. Thayamballi, Jae Myung Lee, Young Il Park, Time dependent risk assessment of aging ships accounting for general / pit corrosion , fatigue cracking and local denting damage, *ABS technical papers* 2003.
- [5] IACS req 2010 ,Requirements concerning survey and certification.
- [6] "OIL TANKER –HULL INSPECTION " (1170 ) course , DNV Piraeus, 7 April 2005.
- [7] Jeom Kee Paik , Anil K. Thayamballi , Young Il Park, Joon Sung Hwang, A time dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships, *Corrosion Science* 46 (2004) 471-486, Elsevier Ltd.
- [8] Shengping Qin , Weicheng Cui, A new corrosion model for the deterioration of steel structures in marine environments.
- [9] Robert E. Melchers, Tony Wells , Models for the anaerobic phases of marine immersion corrosion , *Corrosion Science* 48 (2006) 1791-1811 ,Elsevier Ltd.
- [10] Introduction to life prediction of Industrial plant materials: Application of the extreme value statistical method for corrosion analysis, Dr Masamichi Kowaka , Allerton Press, Inc. I New York.
- [11] Ship structure committee 1997, Strength assessment of pitted plate panels, , SSC -394.
- [12] Yasser Sharifi and Jeom Kee Paik , Ultimate strength reliability analysis of steel box girder bridges with pitting corrosion, *Probabilistic engineering Mechanics* , Manuscript number :PREM-D -10-00086.
- [13] Robert E. Melchers , The effect of corrosion on the structural reliability of steel offshore structures , *Corrosion Science* 47 (2005) 2391-2410, Elsevier Ltd.

- [14] N. Yamamoto, K. Ikegami, A study on the degradation of coating and corrosion of ship's hull based on probabilistic approach, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, August 1998, Vol. 120/121.
- [15] Ship structure committee 1991, Corrosion experience data requirements, SSC - 348.
- [16] [www.education.ydad.teimes.gr](http://www.education.ydad.teimes.gr) , Πίνακες συνάφειας- Ο έλεγχος  $\chi^2$  σε τετράπτυχους πίνακες.
- [17] Δημήτρης Λ. Καραγεώργος, Στατιστική Περιγραφική και Επαγωγική , Εκδόσεις Σαββάλα , Ιούνιος 2001, ISBN : 960-460-623-9.
- [18] Ευστάθιος Δ. Δημητριάδης, Περιγραφική στατιστική , 2002, Εκδόσεις Κριτική ΑΕ, ISBN 960-218-259-8.
- [19] 17<sup>th</sup> International ship and offshore structures congress 16-21 August 2009, Seoul Korea , Volume 1, ISSC Committee III.1, Ultimate strength.
- [20] Πέτρος Α. Καρύδης, Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου , Θέματα τοπικής αντοχής , Αθήνα 2000 , ISBN 960-91390-0-0.
- [21] C. Guedes Soares , Uncertainty modeling in plate buckling , Structural Safety 5 (1988) 17-34 , Elsevier Science Publishers B.V Amsterdam.
- [22] IACS UR S11, Longitudinal Strength Standard
- [23] Unyime O. Akpan , T.S. Koko, B. Ayyub, and T.E Dunbar, Reliability assessment of corroding ship hull structure , Naval Engineers journal , Fall 2003.
- [24] Jinting Guo , Ge Wang , Lyuben Ivanov , Anastassios N. Perakis, Time –varying ultimate strength of aging tanker deck plate considering corrosion effect , Marine Structures 21 (2008) 402-419, Elsevier Ltd.
- [25] IACS , Common structural rules for bulk carriers , July 2010.
- [26] [www.visionengineer.com](http://www.visionengineer.com) , Monte Carlo simulation , Article by Duane Bong.
- [27] [www.oracle.com](http://www.oracle.com)
- [28] <http://decisioneering.com/> , Risk analysis overview , What is Monte Carlo simulation.
- [29] IACS , Common structural rules for bulk carriers, Chapter3, Section3, Corrosion addition.
- [30] ABS , Rules for building and classing , Steel vessels 2010 Specific vessel types , Common Structural rules for bulk carriers.

- [31] A.Valor, F. Caleyó, L. Alfonso, D. Rivas, J.M. Hallen , Stochastic modeling of pitting corrosion : A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits, Corrosion Science 49 (2007) 559-579, Elsevier Ltd.
- [32] Robert E. Melchers , R.J Jeffrey Probabilistic models for steel corrosion loss and pitting of marine infrastructure, Reliability Engineering and System Safety 93 (2008) 423-432, Elsevier Ltd.
- [33] Robert E. Melchers, Corrosion uncertainty modeling for steel structures, Journal Of Constructional Steel Research 52 (1999) 3-19, Elsevier Ltd.
- [34] Jack R. Kayser and Andrzej S. Nowak , Reliability of corroded steel girder bridges , Structural Safety 6 (1989) 53-63 Elsevier Science publishers B.V. Amsterdam.
- [35] Lyuben Ivanov, Ge Wang , Ah Kuan Seah- American Bereau of Shipping, Evaluating corrosion wastage and structural safety of aging ships, ABS technical papers 2004.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### 1. Επεξεργασία των δεδομένων της Loyds register με σκοπό την στατιστική ανάλυσή τους

AGE	DEFECT TYPE	No of hull defects	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)		sum
0,05	HOLED (CORROSION)	1	0	0	1		1
4,82	PITTED	5	0	5	0		5
4,82	PITTED	5	0	5	0		5
13,26	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0		1
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0		2
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0		2
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0		3
13,86	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0		1
14,78	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0		2
18,24	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0		2
18,24	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0		1
18,24	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0		1
19,24	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0		1
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0		3
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0		3
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0		2
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0		3
20,3	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0		3
			30	10	1		41

LOCATION 1	DEFECT TYPE	No of hull defects	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	sum
FRESH WATER TANK	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0	1
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0	2
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0	2
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0	3
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0	2
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0	3
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0	1
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0	3
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0	3
HOLD	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0	2
SIDE TANK	HOLED (CORROSION)	1	0	0	1	1
SIDE TANK	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0	1
SIDE TANK	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	0	2
SIDE TANK	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0	1
SIDE TANK	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	0	1
UPPER DECK	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	0	3
WING BALLAST TANK	PITTED	5	0	5	0	5
	PITTED	5	0	5	0	5
			30	10	1	41

## 2. Συσχέτιση τύπου πλοίου και είδους διάβρωσης με τη μέθοδο του $\chi^2$

Τυπος πλοίου

BARGE CONTAINER

LOCATION 1	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	sum
UPPER DECK	3	0	0	3
DOUBLE BOTTOM TANK	6	0	0	6
UPPER DECK	1	0	0	1
WING CARGO TANK	4	0	0	4
	14	0	0	14

O	E	O-E	(O-E) <sup>2</sup>	(O-E) <sup>2</sup> /E	O-E-0,5	(O-E-0,5) <sup>2</sup>	(O-E-0,5) <sup>2</sup> /E
3	3	0	0	0	-0,5	0,25	0,083333
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
6	6	0	0	0	-0,5	0,25	0
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
1	1	0	0	0	-0,5	0,25	0
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
4	4	0	0	0	-0,5	0,25	0,0625
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
0	0	0	0	0	-0,5	0,25	0
				0			0,145833
ΕΙΝΑΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ							

Τυπος πλοίου

BULK CARRIER

LOCATION 1	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	CORRODED	sum
AUXILIARY MACHINERY SPACE	0	0	1	0	1
BRIDGE DECK	4	0	0	0	4
BRIDGE SPACE	1	0	0	0	1
CHAIN LOCKER	101	1	5	0	107
COFFERDAM (ABOVE DB)	6	0	2	0	8
CONVEYOR TUNNEL	2	0	0	0	2
DECKHOUSE	6	0	2	0	8
DEEP TANK	9	1	0	0	10
DOUBLE BOTTOM TANK	271	32	29	2	334
ENGINE ROOM TANK (NOT DB)	20	0	4	0	24
ENGINE/BOILER ROOM	36	1	5	0	42
EQUIPMENT	75	0	0	0	75
FORECASTLE DECK	44	1	7	0	52
FORECASTLE SPACE	10	0	4	0	14
FRESH WATER TANK	11	0	0	0	11
HOLD	1175	16	40	4	1235
HOLD - FLOODABLE	29	0	0	0	29
HOPPER SIDE TANK	249	14	20	0	283
MASTHOUSE	3	0	2	0	5
NOZZLE RUDDER	1	0	0	0	1
OIL FUEL BUNKER (EX ER)	3	0	2	0	5
PEAK SPACE	4	0	0	0	4
PEAK TANK	696	17	27	3	743

POOP DECK	15	0	6	0	21
PUMP ROOM	7	0	1	0	8
RUDDER	22	2	2	4	30
RUDDER TRUNK	9	0	0	0	9
SEA INLET	0	0	1	0	1
SIDE TANK	101	1	8	0	110
SLOP TANK	4	4	0	0	8
STABILISER TANK	3	0	0	0	3
STEERING GEAR SPACE	1	0	1	0	2
STERNFRAME	2	3	0	0	5
SUPERSTRUCTURE (MAIN)	61	0	27	0	88
TOPSIDE TANK	995	6	63	3	1067
TRANSOM SPACE	1	0	0	0	1
TRANSVERSE THRUSTER SPACE	3	0	0	0	3
TWEEN DECK	2	0	0	0	2
TWEEN DECK SPACE	1	0	1	0	2
UPPER DECK	1517	7	151	2	1677
WING BALLAST TANK	4	1	1	0	6
	5504	107	412	18	6041

O	E	O-E	(O-E)^2	(O-E)^2/E	O-E-0,5	(O-E-0,5)^2	(O-E-0,5)^2/E
0	0,91110	-0,91111	0,83011	0,911107	-1,41111	1,99122	2,18549
0	0,01771	-0,01771	0,00031	0,017712	-0,51771	0,26802	15,1322
1	0,068201	0,931799	0,86825	12,73082	0,43179	0,18645	2,73385
0	0,00298	-0,00298	8,88E-06	0,00298	-0,50298	0,25298	84,9057
4	3,64443	0,35557	0,12643	0,034691	-0,14443	0,02086	0,00572
0	0,070849	-0,07085	0,00502	0,070849	-0,57085	0,325869	4,599471
0	0,272803	-0,2728	0,074421	0,272803	-0,7728	0,597224	2,189216
0	0,011919	-0,01192	0,000142	0,011919	-0,51192	0,262061	21,98761
1	0,911107	0,088893	0,007902	0,008673	-0,41111	0,169009	0,185499
0	0,017712	-0,01771	0,000314	0,017712	-0,51771	0,268026	15,1322
0	0,068201	-0,0682	0,004651	0,068201	-0,5682	0,322852	4,733856
0	0,00298	-0,00298	8,88E-06	0,00298	-0,50298	0,252989	84,90576
101	97,4885	3,511505	12,33067	0,126483	3,011505	9,069161	0,093028
1	1,895216	-0,89522	0,801412	0,42286	-1,39522	1,946628	1,027127
5	7,297467	-2,29747	5,278356	0,723313	-2,79747	7,825823	1,072403
0	0,318821	-0,31882	0,101647	0,318821	-0,81882	0,670468	2,102959
6	7,288859	-1,28886	1,661159	0,227904	-1,78886	3,200018	0,439029
0	0,141698	-0,1417	0,020078	0,141698	-0,6417	0,411777	2,906009
2	0,545605	1,454395	2,115265	3,876916	0,954395	0,91087	1,669467
0	0,023837	-0,02384	0,000568	0,023837	-0,52384	0,274405	11,51168
2	1,822215	0,177785	0,031608	0,017346	-0,32221	0,103822	0,056976
0	0,035425	-0,03542	0,001255	0,035425	-0,53542	0,28668	8,092668

0	0,136401	-0,1364	0,018605	0,136401	-0,6364	0,405007	2,969229
0	0,005959	-0,00596	3,55E-05	0,005959	-0,50596	0,255995	42,95735
6	7,288859	-1,28886	1,661159	0,227904	-1,78886	3,200018	0,439029
0	0,141698	-0,1417	0,020078	0,141698	-0,6417	0,411777	2,906009
2	0,545605	1,454395	2,115265	3,876916	0,954395	0,91087	1,669467
0	0,023837	-0,02384	0,000568	0,023837	-0,52384	0,274405	11,51168
9	9,111074	-0,11107	0,012338	0,001354	-0,61107	0,373412	0,040984
1	0,177123	0,822877	0,677127	3,822917	0,322877	0,10425	0,588572
0	0,682006	-0,68201	0,465133	0,682006	-1,18201	1,397139	2,048572
0	0,029796	-0,0298	0,000888	0,029796	-0,5298	0,280684	9,420074
271	304,3099	-33,3099	1109,548	3,646113	-33,8099	1143,108	3,756395
32	5,915908	26,08409	680,3799	115,0085	25,58409	654,5458	110,6416
29	22,77901	6,22099	38,70072	1,698964	5,72099	32,72973	1,436837
2	0,995199	1,004801	1,009624	1,014494	0,504801	0,254824	0,256053
20	21,86658	-1,86658	3,484115	0,159335	-2,36658	5,600693	0,25613
0	0,425095	-0,4251	0,180706	0,425095	-0,9251	0,855801	2,013199
4	1,636815	2,363185	5,584643	3,411896	1,863185	3,471458	2,120861
0	0,071511	-0,07151	0,005114	0,071511	-0,57151	0,326625	4,56746
36	38,26651	-2,26651	5,137077	0,134245	-2,76651	7,65359	0,200008
1	0,743917	0,256083	0,065579	0,088153	-0,24392	0,059495	0,079976
5	2,864426	2,135574	4,560675	1,592177	1,635574	2,675101	0,933905
0	0,125145	-0,12514	0,015661	0,125145	-0,62514	0,390806	3,12283
75	68,33306	6,666943	44,44812	0,650463	6,166943	38,03118	0,556556
0	1,328422	-1,32842	1,764706	1,328422	-1,82842	3,343129	2,516616

0	5,115047	-5,11505	26,16371	5,115047	-5,61505	31,52875	6,163923
0	0,223473	-0,22347	0,04994	0,223473	-0,72347	0,523413	2,342177
44	47,37759	-3,37759	11,40809	0,240791	-3,87759	15,03568	0,317358
1	0,92104	0,07896	0,006235	0,006769	-0,42104	0,177274	0,192472
7	3,546433	3,453567	11,92713	3,363134	2,953567	8,72356	2,459813
0	0,154941	-0,15494	0,024007	0,154941	-0,65494	0,428948	2,768456
10	12,7555	-2,7555	7,592803	0,595257	-3,2555	10,59831	0,830881
0	0,247972	-0,24797	0,06149	0,247972	-0,74797	0,559462	2,25615
4	0,954809	3,045191	9,273189	9,71209	2,545191	6,477998	6,784602
0	0,041715	-0,04171	0,00174	0,041715	-0,54171	0,293455	7,034771
11	10,02218	0,977818	0,956129	0,095401	0,477818	0,22831	0,02278
0	0,194835	-0,19484	0,037961	0,194835	-0,69484	0,482796	2,47797
0	0,750207	-0,75021	0,56281	0,750207	-1,25021	1,563017	2,083448
0	0,032776	-0,03278	0,001074	0,032776	-0,53278	0,28385	8,660301
1175	1125,218	49,78232	2478,279	2,202489	49,28232	2428,747	2,158469
16	21,87469	-5,87469	34,51198	1,577713	-6,37469	40,63667	1,857703
40	84,22778	-44,2278	1956,096	23,22389	-44,7278	2000,574	23,75195
4	3,679854	0,320146	0,102493	0,027853	-0,17985	0,032348	0,00879
29	26,42212	2,577884	6,645488	0,251512	2,077884	4,317604	0,163409
0	0,513657	-0,51366	0,263843	0,513657	-1,01366	1,0275	2,000363
0	1,977818	-1,97782	3,911765	1,977818	-2,47782	6,139583	3,10422
0	0,08641	-0,08641	0,007467	0,08641	-0,58641	0,343876	3,979609
249	257,8434	-8,8434	78,20578	0,303307	-9,3434	87,29919	0,338574
14	5,012581	8,987419	80,77371	16,1142	8,487419	72,03629	14,3711
20	19,30078	0,699222	0,488911	0,025331	0,199222	0,039689	0,002056
0	0,843238	-0,84324	0,71105	0,843238	-1,34324	1,804288	2,139714



3	4,555537	-1,55554	2,419696	0,531155	-2,05554	4,225233	0,927494
0	0,088561	-0,08856	0,007843	0,088561	-0,58856	0,346405	3,911459
2	0,341003	1,658997	2,752271	8,0711	1,158997	1,343274	3,939183
0	0,014898	-0,0149	0,000222	0,014898	-0,5149	0,26512	17,79545
1	0,911107	0,088893	0,007902	0,008673	-0,41111	0,169009	0,185499
0	0,017712	-0,01771	0,000314	0,017712	-0,51771	0,268026	15,1322
0	0,068201	-0,0682	0,004651	0,068201	-0,5682	0,322852	4,733856
0	0,00298	-0,00298	8,88E-06	0,00298	-0,50298	0,252989	84,90576
3	4,555537	-1,55554	2,419696	0,531155	-2,05554	4,225233	0,927494
0	0,088561	-0,08856	0,007843	0,088561	-0,58856	0,346405	3,911459
2	0,341003	1,658997	2,752271	8,0711	1,158997	1,343274	3,939183
0	0,014898	-0,0149	0,000222	0,014898	-0,5149	0,26512	17,79545
4	3,64443	0,35557	0,12643	0,034691	-0,14443	0,02086	0,005724
0	0,070849	-0,07085	0,00502	0,070849	-0,57085	0,325869	4,599471
0	0,272803	-0,2728	0,074421	0,272803	-0,7728	0,597224	2,189216
0	0,011919	-0,01192	0,000142	0,011919	-0,51192	0,262061	21,98761
696	676,9528	19,04718	362,795	0,535924	18,54718	343,9978	0,508156
17	13,16024	3,839762	14,74377	1,120327	3,339762	11,15401	0,847554
27	50,67307	-23,6731	560,4141	11,05941	-24,1731	584,3372	11,53151
3	2,213872	0,786128	0,617997	0,279148	0,286128	0,081869	0,03698
15	19,13326	-4,13326	17,08381	0,892885	-4,63326	21,46706	1,121976
0	0,371958	-0,37196	0,138353	0,371958	-0,87196	0,760311	2,044077
6	1,432213	4,567787	20,86468	14,56814	4,067787	16,54689	11,55337
0	0,062572	-0,06257	0,003915	0,062572	-0,56257	0,316488	5,057943
7	7,288859	-0,28886	0,08344	0,011448	-0,78886	0,622299	0,085377
0	0,141698	-0,1417	0,020078	0,141698	-0,6417	0,411777	2,906009

1	0,545605	0,454395	0,206475	0,378433	-0,04561	0,00208	0,003812
0	0,023837	-0,02384	0,000568	0,023837	-0,52384	0,274405	11,51168
22	27,33322	-5,33322	28,44327	1,040612	-5,83322	34,02649	1,244877
2	0,531369	1,468631	2,156877	4,059095	0,968631	0,938246	1,765715
2	2,046019	-0,04602	0,002118	0,001035	-0,54602	0,298137	0,145715
4	0,089389	3,910611	15,29288	171,082	3,410611	11,63227	130,1306
9	8,199967	0,800033	0,640053	0,078056	0,300033	0,09002	0,010978
0	0,159411	-0,15941	0,025412	0,159411	-0,65941	0,434822	2,727687
0	0,613806	-0,61381	0,376757	0,613806	-1,11381	1,240563	2,021101
0	0,026817	-0,02682	0,000719	0,026817	-0,52682	0,277536	10,34935
0	0,911107	-0,91111	0,830117	0,911107	-1,41111	1,991224	2,185499
0	0,017712	-0,01771	0,000314	0,017712	-0,51771	0,268026	15,1322
1	0,068201	0,931799	0,86825	12,73082	0,431799	0,186451	2,733856
0	0,00298	-0,00298	8,88E-06	0,00298	-0,50298	0,252989	84,90576
101	100,2218	0,778182	0,605568	0,006042	0,278182	0,077385	0,000772
1	1,948353	-0,94835	0,899373	0,461607	-1,44835	2,097726	1,076666
8	7,502069	0,497931	0,247935	0,033049	-0,00207	4,28E-06	5,71E-07
0	0,32776	-0,32776	0,107427	0,32776	-0,82776	0,685187	2,090513
4	7,288859	-3,28886	10,8166	1,48399	-3,78886	14,35546	1,969506
4	0,141698	3,858302	14,88649	105,0576	3,358302	11,27819	79,59293
0	0,545605	-0,54561	0,297685	0,545605	-1,04561	1,09329	2,003812
0	0,023837	-0,02384	0,000568	0,023837	-0,52384	0,274405	11,51168
3	2,733322	0,266678	0,071117	0,026019	-0,23332	0,054439	0,019917
0	0,053137	-0,05314	0,002824	0,053137	-0,55314	0,30596	5,757966
0	0,204602	-0,2046	0,041862	0,204602	-0,7046	0,496464	2,426487
0	0,008939	-0,00894	7,99E-05	0,008939	-0,50894	0,259019	28,97653

1	1,822215	-0,82221	0,676037	0,370998	-1,32221	1,748252	0,959411
0	0,035425	-0,03542	0,001255	0,035425	-0,53542	0,28668	8,092668
1	0,136401	0,863599	0,745803	5,467712	0,363599	0,132204	0,969229
0	0,005959	-0,00596	3,55E-05	0,005959	-0,50596	0,255995	42,95735
2	4,555537	-2,55554	6,53077	1,433589	-3,05554	9,336307	2,049442
3	0,088561	2,911439	8,476474	95,71286	2,411439	5,815036	65,66099
0	0,341003	-0,341	0,116283	0,341003	-0,841	0,707286	2,074134
0	0,014898	-0,0149	0,000222	0,014898	-0,5149	0,26512	17,79545
61	80,17745	-19,1775	367,7747	4,58701	-19,6775	387,2022	4,829315
0	1,558682	-1,55868	2,429491	1,558682	-2,05868	4,238173	2,719074
27	6,001655	20,99834	440,9305	73,46814	20,49834	420,1821	70,01104
0	0,262208	-0,26221	0,068753	0,262208	-0,76221	0,580961	2,215649
995	972,1516	22,84837	522,048	0,537003	22,34837	499,4496	0,513757
6	18,89902	-12,899	166,3848	8,803884	-13,399	179,5338	9,499635
63	72,77007	-9,77007	95,45429	1,311725	-10,2701	105,4744	1,44942
3	3,179275	-0,17927	0,03214	0,010109	-0,67927	0,461414	0,145132
1	0,911107	0,088893	0,007902	0,008673	-0,41111	0,169009	0,185499
0	0,017712	-0,01771	0,000314	0,017712	-0,51771	0,268026	15,1322
0	0,068201	-0,0682	0,004651	0,068201	-0,5682	0,322852	4,733856
0	0,00298	-0,00298	8,88E-06	0,00298	-0,50298	0,252989	84,90576
3	2,733322	0,266678	0,071117	0,026019	-0,23332	0,054439	0,019917
0	0,053137	-0,05314	0,002824	0,053137	-0,55314	0,30596	5,757966
0	0,204602	-0,2046	0,041862	0,204602	-0,7046	0,496464	2,426487
0	0,008939	-0,00894	7,99E-05	0,008939	-0,50894	0,259019	28,97653
2	1,822215	0,177785	0,031608	0,017346	-0,32221	0,103822	0,056976
0	0,035425	-0,03542	0,001255	0,035425	-0,53542	0,28668	8,092668

0	0,136401	-0,1364	0,018605	0,136401	-0,6364	0,405007	2,969229
0	0,005959	-0,00596	3,55E-05	0,005959	-0,50596	0,255995	42,95735
1	1,822215	-0,82221	0,676037	0,370998	-1,32221	1,748252	0,959411
0	0,035425	-0,03542	0,001255	0,035425	-0,53542	0,28668	8,092668
1	0,136401	0,863599	0,745803	5,467712	0,363599	0,132204	0,969229
0	0,005959	-0,00596	3,55E-05	0,005959	-0,50596	0,255995	42,95735
1517	1527,927	-10,9272	119,4029	0,078147	-11,4272	130,5801	0,085462
7	29,70353	-22,7035	515,4501	17,35316	-23,2035	538,4036	18,12592
151	114,3725	36,62755	1341,577	11,7299	36,12755	1305,2	11,41183
2	4,996855	-2,99685	8,981139	1,797358	-3,49685	12,22799	2,447138
4	5,466645	-1,46664	2,151046	0,393486	-1,96664	3,867691	0,707507
1	0,106274	0,893726	0,798747	7,515931	0,393726	0,15502	1,458688
1	0,409204	0,590796	0,34904	0,852974	0,090796	0,008244	0,020146
0	0,017878	-0,01788	0,00032	0,017878	-0,51788	0,268197	15,00167
				812,7164			1726,217
				EINAI ANEEAPHTHA			

Τυπος πλοίου BULK ( GREAT  
CARRIER LAKES)

LOCATION 1	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	sum
CHAIN LOCKER	7	0	1	8
DOUBLE BOTTOM TANK	15	3	0	18
EQUIPMENT	5	0	0	5
HOLD	62	0	0	62
HOPPER SIDE TANK	6	1	0	7
PEAK TANK	27	0	0	27
RUDDER	0	1	0	1
RUDDER TRUNK	1	0	0	1
SEA INLET	1	0	0	1
SIDE TANK	7	1	0	8
TOPSIDE TANK	90	0	4	94
UNDERDECK PASSAGE	1	0	0	1
UPPER DECK	131	3	1	135
	353	9	6	368

O	E	O-E	(O-E)^2	(O-E)^2/E	O-E-0,5	(O-E-0,5)^2	(O-E-0,5)^2/E
7	7,673913	-0,67391	0,454159	0,059182	-1,17391	1,378072	0,179579
0	0,195652	-0,19565	0,03828	0,195652	-0,69565	0,483932	2,47343
1	0,130435	0,869565	0,756144	5,797101	0,369565	0,136578	1,047101
15	17,2663	-2,2663	5,136135	0,297466	-2,7663	7,65244	0,443201
3	0,440217	2,559783	6,552487	14,88466	2,059783	4,242704	9,637748
0	0,293478	-0,29348	0,086129	0,293478	-0,79348	0,629608	2,14533
5	4,796196	0,203804	0,041536	0,00866	-0,2962	0,087732	0,018292
0	0,122283	-0,12228	0,014953	0,122283	-0,62228	0,387236	3,166727
0	0,081522	-0,08152	0,006646	0,081522	-0,58152	0,338168	4,148188

62	59,47283	2,527174	6,386608	0,107387	2,027174	4,109434	0,069098
0	1,516304	-1,5163	2,299179	1,516304	-2,0163	4,065483	2,681179
0	1,01087	-1,01087	1,021857	1,01087	-1,51087	2,282727	2,258181
6	6,714674	-0,71467	0,510759	0,076066	-1,21467	1,475433	0,219733
1	0,171196	0,828804	0,686917	4,012465	0,328804	0,108112	0,631513
0	0,11413	-0,11413	0,013026	0,11413	-0,61413	0,377156	3,304607
27	25,89946	1,100543	1,211196	0,046765	0,600543	0,360652	0,013925
0	0,660326	-0,66033	0,436031	0,660326	-1,16033	1,346357	2,038927
0	0,440217	-0,44022	0,193791	0,440217	-0,94022	0,884009	2,008119
0	0,959239	-0,95924	0,92014	0,959239	-1,45924	2,129379	2,219862
1	0,024457	0,975543	0,951685	38,91335	0,475543	0,226142	9,246679
0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
1	0,959239	0,040761	0,001661	0,001732	-0,45924	0,210901	0,219862
0	0,024457	-0,02446	0,000598	0,024457	-0,52446	0,275055	11,24668
0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
1	0,959239	0,040761	0,001661	0,001732	-0,45924	0,210901	0,219862
0	0,024457	-0,02446	0,000598	0,024457	-0,52446	0,275055	11,24668
0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
7	7,673913	-0,67391	0,454159	0,059182	-1,17391	1,378072	0,179579
1	0,195652	0,804348	0,646975	3,306763	0,304348	0,092628	0,47343
0	0,130435	-0,13043	0,017013	0,130435	-0,63043	0,397448	3,047101
90	90,16848	-0,16848	0,028385	0,000315	-0,66848	0,446863	0,004956
0	2,298913	-2,29891	5,285001	2,298913	-2,79891	7,833914	3,40766
4	1,532609	2,467391	6,08802	3,972325	1,967391	3,870629	2,525516
1	0,959239	0,040761	0,001661	0,001732	-0,45924	0,210901	0,219862
0	0,024457	-0,02446	0,000598	0,024457	-0,52446	0,275055	11,24668

0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
131	129,4973	1,502717	2,25816	0,017438	1,002717	1,005442	0,007764
3	3,30163	-0,30163	0,090981	0,027556	-0,80163	0,642611	0,194635
1	2,201087	-1,20109	1,44261	0,655408	-1,70109	2,893697	1,314667
				80,20924			158,9049
				EINAI ANEΞΑΡΤΗΤΑ			

Τυπος πλοίου

BUOY SHIP

LOCATION 1	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	sum
DOUBLE BOTTOM TANK	2	0	0	2
ENGINE/BOILER ROOM	1	0	0	1
EQUIPMENT	4	0	0	4
FORECASTLE DECK	1	0	0	1
PEAK SPACE	1	0	0	1
PEAK TANK	2	1	1	4
RUDDER	0	1	0	1
SIDE TANK	2	0	0	2
UPPER DECK	1	0	0	1
	14	2	1	17

O	E	O-E	(O-E)^2	(O-E)^2/E	O-E-0,5	(O-E-0,5)^2	(O-E-0,5)^2/E
2	1,647059	0,352941	0,124567	0,07563	-0,14706	0,021626	0,01313
0	0,235294	-0,23529	0,055363	0,235294	-0,73529	0,540657	2,297794
0	0,117647	-0,11765	0,013841	0,117647	-0,61765	0,381488	3,242647
1	0,823529	0,176471	0,031142	0,037815	-0,32353	0,104671	0,127101
0	0,117647	-0,11765	0,013841	0,117647	-0,61765	0,381488	3,242647

0	0,058824	-0,05882	0,00346	0,058824	-0,55882	0,312284	5,308824
4	3,294118	0,705882	0,49827	0,151261	0,205882	0,042388	0,012868
0	0,470588	-0,47059	0,221453	0,470588	-0,97059	0,942042	2,001838
0	0,235294	-0,23529	0,055363	0,235294	-0,73529	0,540657	2,297794
1	0,823529	0,176471	0,031142	0,037815	-0,32353	0,104671	0,127101
0	0,117647	-0,11765	0,013841	0,117647	-0,61765	0,381488	3,242647
0	0,058824	-0,05882	0,00346	0,058824	-0,55882	0,312284	5,308824
1	0,823529	0,176471	0,031142	0,037815	-0,32353	0,104671	0,127101
0	0,117647	-0,11765	0,013841	0,117647	-0,61765	0,381488	3,242647
0	0,058824	-0,05882	0,00346	0,058824	-0,55882	0,312284	5,308824
2	3,294118	-1,29412	1,67474	0,508403	-1,79412	3,218858	0,977153
1	0,470588	0,529412	0,280277	0,595588	0,029412	0,000865	0,001838
1	0,235294	0,764706	0,584775	2,485294	0,264706	0,070069	0,297794
0	0,823529	-0,82353	0,678201	0,823529	-1,32353	1,751173	2,127101
1	0,117647	0,882353	0,778547	6,617647	0,382353	0,146194	1,242647
0	0,058824	-0,05882	0,00346	0,058824	-0,55882	0,312284	5,308824
2	1,647059	0,352941	0,124567	0,07563	-0,14706	0,021626	0,01313
0	0,235294	-0,23529	0,055363	0,235294	-0,73529	0,540657	2,297794
0	0,117647	-0,11765	0,013841	0,117647	-0,61765	0,381488	3,242647
1	0,823529	0,176471	0,031142	0,037815	-0,32353	0,104671	0,127101
0	0,117647	-0,11765	0,013841	0,117647	-0,61765	0,381488	3,242647
0	0,058824	-0,05882	0,00346	0,058824	-0,55882	0,312284	5,308824
				13,66071			60,08929
			EINAI ANEΞAPHTHA				



Τυπος πλοίου

CEMENT CARRIER

LOCATION 1	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	sum
CHAIN LOCKER	2	0	1	3
COFFERDAM (ABOVE DB)	0	0	1	1
DECKHOUSE	0	0	1	1
DEEP TANK	1	0	0	1
DOUBLE BOTTOM TANK	2	1	1	4
ENGINE/BOILER ROOM	2	0	0	2
FORECASTLE DECK	1	0	0	1
HOLD	6	0	1	7
HOPPER AND WELL	2	0	0	2
PEAK TANK	10	1	1	12
RUDDER	1	0	0	1
SIDE TANK	18	0	4	22
TRANSVERSE THRUSTER SPACE	0	1	0	1
UPPER DECK	12	0	1	13
WING BALLAST TANK	2	0	0	2
	59	3	11	73

O	E	O-E	(O-E)^2	(O-E)^2/E	O-E-0,5	(O-E-0,5)^2	(O-E-0,5)^2/E
2	2,424658	-0,42466	0,180334	0,074375	-0,92466	0,854992	0,352624
0	0,123288	-0,12329	0,0152	0,123288	-0,62329	0,388488	3,151065
1	0,452055	0,547945	0,300244	0,664176	0,047945	0,002299	0,005085
0	0,808219	-0,80822	0,653218	0,808219	-1,30822	1,711437	2,117541
0	0,041096	-0,0411	0,001689	0,041096	-0,5411	0,292785	7,124429
1	0,150685	0,849315	0,721336	4,787049	0,349315	0,122021	0,809776
0	0,808219	-0,80822	0,653218	0,808219	-1,30822	1,711437	2,117541
0	0,041096	-0,0411	0,001689	0,041096	-0,5411	0,292785	7,124429
1	0,150685	0,849315	0,721336	4,787049	0,349315	0,122021	0,809776
1	0,808219	0,191781	0,03678	0,045507	-0,30822	0,094999	0,117541
0	0,041096	-0,0411	0,001689	0,041096	-0,5411	0,292785	7,124429
0	0,150685	-0,15068	0,022706	0,150685	-0,65068	0,423391	2,809776
2	3,232877	-1,23288	1,519985	0,470165	-1,73288	3,002862	0,928851
1	0,164384	0,835616	0,698255	4,247717	0,335616	0,112638	0,685217
1	0,60274	0,39726	0,157816	0,261831	-0,10274	0,010555	0,017512
2	1,616438	0,383562	0,14712	0,091015	-0,11644	0,013558	0,008388
0	0,082192	-0,08219	0,006755	0,082192	-0,58219	0,338947	4,123858
0	0,30137	-0,30137	0,090824	0,30137	-0,80137	0,642194	2,130915
1	0,808219	0,191781	0,03678	0,045507	-0,30822	0,094999	0,117541
0	0,041096	-0,0411	0,001689	0,041096	-0,5411	0,292785	7,124429
0	0,150685	-0,15068	0,022706	0,150685	-0,65068	0,423391	2,809776
6	5,657534	0,342466	0,117283	0,02073	-0,15753	0,024817	0,004387
0	0,287671	-0,28767	0,082755	0,287671	-0,78767	0,620426	2,156719

1	1,054795	-0,05479	0,003002	0,002846	-0,55479	0,307797	0,291808
2	1,616438	0,383562	0,14712	0,091015	-0,11644	0,013558	0,008388
0	0,082192	-0,08219	0,006755	0,082192	-0,58219	0,338947	4,123858
0	0,30137	-0,30137	0,090824	0,30137	-0,80137	0,642194	2,130915
10	9,69863	0,30137	0,090824	0,009365	-0,19863	0,039454	0,004068
1	0,493151	0,506849	0,256896	0,520928	0,006849	4,69E-05	9,51E-05
1	1,808219	-0,80822	0,653218	0,361249	-1,30822	1,711437	0,946477
1	0,808219	0,191781	0,03678	0,045507	-0,30822	0,094999	0,117541
0	0,041096	-0,0411	0,001689	0,041096	-0,5411	0,292785	7,124429
0	0,150685	-0,15068	0,022706	0,150685	-0,65068	0,423391	2,809776
18	17,78082	0,219178	0,048039	0,002702	-0,28082	0,078861	0,004435
0	0,90411	-0,90411	0,817414	0,90411	-1,40411	1,971524	2,180625
4	3,315068	0,684932	0,469131	0,141515	0,184932	0,0342	0,010316
0	0,808219	-0,80822	0,653218	0,808219	-1,30822	1,711437	2,117541
1	0,041096	0,958904	0,919497	22,37443	0,458904	0,210593	5,124429
0	0,150685	-0,15068	0,022706	0,150685	-0,65068	0,423391	2,809776
12	10,50685	1,493151	2,229499	0,212195	0,993151	0,986348	0,093877
0	0,534247	-0,53425	0,285419	0,534247	-1,03425	1,069666	2,002195
1	1,958904	-0,9589	0,919497	0,469394	-1,4589	2,128401	1,086526
2	1,616438	0,383562	0,14712	0,091015	-0,11644	0,013558	0,008388
0	0,082192	-0,08219	0,006755	0,082192	-0,58219	0,338947	4,123858
0	0,30137	-0,30137	0,090824	0,30137	-0,80137	0,642194	2,130915
				46,05016			93,02184
				ΕΙΝΑΙ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΑ			

Τυπος πλοίου BULK/CONTAINER ship

LOCATION 1	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	HOLED (CORROSION)	sum
CHAIN LOCKER	7	0	1	8
DOUBLE BOTTOM TANK	15	3	0	18
EQUIPMENT	5	0	0	5
HOLD	62	0	0	62
HOPPER SIDE TANK	6	1	0	7
PEAK TANK	27	0	0	27
RUDDER	0	1	0	1
RUDDER TRUNK	1	0	0	1
SEA INLET	1	0	0	1
SIDE TANK	7	1	0	8
TOPSIDE TANK	90	0	4	94
UNDERDECK PASSAGE	1	0	0	1
UPPER DECK	131	3	1	135
	353	9	6	368

O	E	O-E	(O-E)^2	(O-E)^2/E	O-E-0,5	(O-E-0,5)^2	(O-E-0,5)^2/E
7	7,673913	-0,67391	0,454159	0,059182	-1,17391	1,378072	0,179579
0	0,195652	-0,19565	0,03828	0,195652	-0,69565	0,483932	2,47343
1	0,130435	0,869565	0,756144	5,797101	0,369565	0,136578	1,047101
15	17,2663	-2,2663	5,136135	0,297466	-2,7663	7,65244	0,443201
3	0,440217	2,559783	6,552487	14,88466	2,059783	4,242704	9,637748
0	0,293478	-0,29348	0,086129	0,293478	-0,79348	0,629608	2,14533
5	4,796196	0,203804	0,041536	0,00866	-0,2962	0,087732	0,018292
0	0,122283	-0,12228	0,014953	0,122283	-0,62228	0,387236	3,166727

0	0,081522	-0,08152	0,006646	0,081522	-0,58152	0,338168	4,148188
62	59,47283	2,527174	6,386608	0,107387	2,027174	4,109434	0,069098
0	1,516304	-1,5163	2,299179	1,516304	-2,0163	4,065483	2,681179
0	1,01087	-1,01087	1,021857	1,01087	-1,51087	2,282727	2,258181
6	6,714674	-0,71467	0,510759	0,076066	-1,21467	1,475433	0,219733
1	0,171196	0,828804	0,686917	4,012465	0,328804	0,108112	0,631513
0	0,11413	-0,11413	0,013026	0,11413	-0,61413	0,377156	3,304607
27	25,89946	1,100543	1,211196	0,046765	0,600543	0,360652	0,013925
0	0,660326	-0,66033	0,436031	0,660326	-1,16033	1,346357	2,038927
0	0,440217	-0,44022	0,193791	0,440217	-0,94022	0,884009	2,008119
0	0,959239	-0,95924	0,92014	0,959239	-1,45924	2,129379	2,219862
1	0,024457	0,975543	0,951685	38,91335	0,475543	0,226142	9,246679
0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
1	0,959239	0,040761	0,001661	0,001732	-0,45924	0,210901	0,219862
0	0,024457	-0,02446	0,000598	0,024457	-0,52446	0,275055	11,24668
0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
1	0,959239	0,040761	0,001661	0,001732	-0,45924	0,210901	0,219862
0	0,024457	-0,02446	0,000598	0,024457	-0,52446	0,275055	11,24668
0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
7	7,673913	-0,67391	0,454159	0,059182	-1,17391	1,378072	0,179579
1	0,195652	0,804348	0,646975	3,306763	0,304348	0,092628	0,47343
0	0,130435	-0,13043	0,017013	0,130435	-0,63043	0,397448	3,047101
90	90,16848	-0,16848	0,028385	0,000315	-0,66848	0,446863	0,004956
0	2,298913	-2,29891	5,285001	2,298913	-2,79891	7,833914	3,40766
4	1,532609	2,467391	6,08802	3,972325	1,967391	3,870629	2,525516
1	0,959239	0,040761	0,001661	0,001732	-0,45924	0,210901	0,219862

0	0,024457	-0,02446	0,000598	0,024457	-0,52446	0,275055	11,24668
0	0,016304	-0,0163	0,000266	0,016304	-0,5163	0,26657	16,34964
131	129,4973	1,502717	2,25816	0,017438	1,002717	1,005442	0,007764
3	3,30163	-0,30163	0,090981	0,027556	-0,80163	0,642611	0,194635
1	2,201087	-1,20109	1,44261	0,655408	-1,70109	2,893697	1,314667
				80,20924			158,9049
				EINAI ANEΞΑΡΤΗΤΑ			

### 3.Συσχέτιση είδους διάβρωσης και χρόνου με χρήση του δείκτη biserial

τύπος πλοίου BUOY SHIP

AGE	DEFECT TYPE	No of hull defects	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	x1	x1^2	x2	x2^2
2,22	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	2,22	4,9284	0	0
2,22	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	2,22	4,9284	0	0
5,98	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	5,98	35,7604	0	0
7,55	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	7,55	57,0025	0	0
10,56	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	10,56	111,5136	0	0
11,19	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	11,19	125,2161	0	0
15,6	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
15,6	PITTED	1	0	1	0	0	15,6	243,36
15,6	PITTED	1	0	1	0	0	15,6	243,36
15,99	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	15,99	255,6801	0	0
16,65	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,65	277,2225	0	0
16,65	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,65	277,2225	0	0
18,28	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,28	334,1584	0	0
18,28	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,28	334,1584	0	0
18,28	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,28	334,1584	0	0
18,28	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,28	334,1584	0	0
18,28	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,28	334,1584	0	0

			14	2	180,41	2820,267	31,2	486,72
					12,88643		15,6	
x			S	rbis				
13,22563	206,6867	174,9172	5,636444	0,159219				

ΑΣΘΕΝΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

τύπος πλοίου CEMENT CARRIER

AGE	DEFECT TYPE	No of hull defects	EXCESSIVE WASTAGE	PITTED	x1	x1^2	x2	x2^2
3,55	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	3,55	12,6025	0	0
9,52	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	9,52	90,6304	0	0
9,72	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
9,72	PITTED	1	0	1	0	0	9,72	94,4784
11,72	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	11,72	137,3584	0	0
14,13	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,13	199,6569	0	0
14,13	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,13	199,6569	0	0
14,13	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,13	199,6569	0	0
14,13	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,13	199,6569	0	0
14,13	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,13	199,6569	0	0
14,47	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	43,41	628,1427	0	0
14,47	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,47	209,3809	0	0
14,47	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	43,41	628,1427	0	0
14,47	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	43,41	628,1427	0	0
14,56	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
14,56	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,56	211,9936	0	0
14,6	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
14,64	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
14,64	PITTED	1	0	1	0	0	14,64	214,3296

14,85	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,85	220,5225	0	0
14,85	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
14,91	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,91	222,3081	0	0
14,92	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	14,92	222,6064	0	0
14,92	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
15,07	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	15,07	227,1049	0	0
15,07	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	15,07	227,1049	0	0
15,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	15,75	248,0625	0	0
16,75	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
16,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,75	280,5625	0	0
16,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,75	280,5625	0	0
16,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,75	280,5625	0	0
16,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,75	280,5625	0	0
16,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,75	280,5625	0	0
16,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,75	280,5625	0	0
16,75	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,75	280,5625	0	0
16,95	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,95	287,3025	0	0
16,95	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,95	287,3025	0	0
16,95	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,95	287,3025	0	0
16,95	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,95	287,3025	0	0
16,95	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,95	287,3025	0	0
16,95	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,95	287,3025	0	0
16,99	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	16,99	288,6601	0	0
17,02	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0
17,08	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	17,08	291,7264	0	0
17,08	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	17,08	291,7264	0	0
17,08	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	17,08	291,7264	0	0
17,58	HOLED (CORROSION)	1	0	0	0	0	0	0



17,69	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	53,07	938,8083	0	0
17,69	HOLED (CORROSION)	2	0	0	0	0	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,1	327,61	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,1	327,61	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,1	327,61	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	3	3	0	54,3	982,83	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	18,1	327,61	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	36,2	655,22	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	36,2	655,22	0	0
18,1	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	36,2	655,22	0	0
19,2	EXCESSIVE WASTAGE	2	2	0	38,4	737,28	0	0
21,15	EXCESSIVE WASTAGE	1	1	0	21,15	447,3225	0	0
21,15	PITTED	1	0	1	0	0	21,15	447,3225
			59	3	946,67	15578,46	45,51	756,1305
					16,04525		15,17	
x			S	rbis				
16,0029	263,4611	256,0929	2,714434	0,069191				

ΟΧΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ

**4.Συσχέτιση απώλειας πάχους λόγω διάβρωσης και χρόνο με τη χρήση των δεδομένων του Yamamoto**

**Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις ελασμάτων σε δεξαμενές έρματος (δεδομένα Yamamoto) [16]**

Ηλικία (years)			Βάθος διάβρωσης(mm)									
			0	~0,5	~1,0	~1,5	~2,0	~2,5	~3,0	~3,5	~4,0	
			0	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	
4	4,25	4,125	0	0	3	0	0	0	0	0	0	
4,25	4,5	4,375	5	3	1	0	0	0	0	0	0	
7,25	7,5	7,375	0	0	2	4	0	0	0	0	0	
7,75	8	7,875	0	0	0	2	4	3	0	0	0	
8	8,25	8,125	20	9	15	20	7	1	2	0	0	
8,25	8,5	8,375	0	0	0	0	3	0	1	1	1	
8,5	8,75	8,625	22	39	42	36	10	1	0	0	0	
8,75	9	8,875	0	0	4	1	0	0	0	0	0	
9	9,25	9,125	0	0	0	1	3	1	0	0	0	
9,25	9,5	9,375	18	23	0	0	0	0	0	0	0	
10,75	11	10,87	0	1	1	0	1	0	0	1	0	
11	11,2	11,12	3	18	8	2	3	8	0	0	2	
11,75	12	11,87	1	24	10	17	6	17	17	1	1	
12	12,2	12,12	0	0	0	1	4	1	0	0	0	
12,25	12,5	12,37	3	1	2	8	10	3	5	10	4	
12,5	12,7	12,62	1	4	13	20	42	31	11	3	2	
12,75	13	12,87	6	15	20	30	22	18	24	9	4	
13	13,2	13,12	6	22	25	8	17	18	17	27	1	
		fyj	85	159	146	150	132	102	77	52	15	SUM
		fyj*yj	0	39,75	109,5	187,5	231	229,5	211,75	169	56,25	1234,25

		$f_{yj} \cdot y_j^2$	0	9,93	82,1	234,37	404	516,37	582,31	549	210,9	2589,5
		$\Sigma f_{ij} x_{ij}$	0	419,78	1158,2	2019	2715	2810,2	2638,3	2154	682	14597,5

	$f_{xi}$	$f_{xi} \cdot x_i$	$f_{xi} \cdot x_i^2$		
	3	12,375	51,04688		
	9	39,375	172,2656		
	6	44,25	326,3438		
	9	70,875	558,1406		
	74	601,25	4885,156		
	6	50,25	420,8438		
	150	1293,75	11158,59		
	5	44,375	393,8281		
	5	45,625	416,3281		
	41	384,375	3603,516		
	4	43,5	473,0625		
	44	489,5	5445,688		
	94	1116,25	13255,47		
	6	72,75	882,0938		
	46	569,25	7044,469		
	127	1603,375	20242,61		
	148	1905,5	24533,31		
	141	1850,625	24289,45		
<b>SUM</b>	<b>918</b>	<b>10237,25</b>	<b>118152,2</b>		
<b>b1</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>A</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b><math>\sigma_y^2</math></b>
0,00711	11,15169	1,344499	1,265214	1,006742	1,013197
<b>R</b>	0,006371				

Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις ελασμάτων σε χώρους φορτίου( δεδομένα Yamamoto) [16]

Ηλικία (years)			Βάθος διάβρωσης(mm)									
			0	~0,5	~1,0	~1,5	~2,0	~2,5	~3,0	~3,5	~4,0	
			0	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	
4	4,25	4,125	0	0	0	3	0	0	0	0	0	
4,25	4,5	4,375	5	4	0	0	0	0	0	0	0	
7,25	7,5	7,375	9	5	9	2	3	0	0	0	0	
7,75	8	7,875	0	0	0	5	0	1	0	0	0	
8	8,25	8,125	18	28	20	17	39	10	4	0	0	
8,25	8,5	8,375	0	0	0	0	1	2	0	0	0	
8,5	8,75	8,625	15 8	136	42	52	39	18	2	0	0	
9	9,25	9,125	0	0	0	1	2	0	0	0	0	
9,25	9,5	9,375	15	23	1	1	1	5	0	0	0	
10,75	11	10,875	0	2	1	2	2	0	3	0	0	
11	11,2 5	11,125	9	27	39	37	28	21	17	4	3	
11,75	12	11,875	7	34	25	25	14	29	38	18	21	
12,25	12,5	12,375	3	5	4	5	10	19	15	27	27	
12,5	12,7 5	12,625	58	52	29	32	24	43	60	68	27	
12,75	13	12,875	30	35	51	55	50	84	74	39	7	
13	13,2 5	13,125	10	98	55	32	39	79	83	94	25	
		fyj	322	449	276	269	252	311	296	250	110	SUM
		fyj*yj	0	112,2	207	336,25	441	699,75	814	812,5	412,5	3835,2
		fyj*yj^2	0	28	155	420,31	771,75	1574,4	2238,5	2640,6	1546,87	9375,8
		Σfijxij	0	1212,9	2352	3744,8	4888,2	8510,3	10197	10356	5160	46422

	fxi	fxi*xi	fxi*xi^2		
	3	12,375	51,04688		
	9	39,375	172,2656		
	28	206,5	1522,938		
	6	47,25	372,0938		
	136	1105	8978,125		
	3	25,125	210,4219		
	447	3855,375	33252,61		
	3	27,375	249,7969		
	46	431,25	4042,969		
	10	108,75	1182,656		
	185	2058,125	22896,64		
	211	2505,625	29754,3		
	115	1423,125	17611,17		
	393	4961,625	62640,52		
	425	5471,875	70450,39		
	515	6759,375	88716,8		
<b>SUM</b>	<b>2535</b>	<b>29038,13</b>	<b>342104,7</b>		
b1	X	Y	A	$\sigma^2$	$\sigma_y^2$
0,007333	11,45488	1,512919	1,42892	1,402418	1,409621
R	0,00511				

Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις στα κατώτερα stools των δεξαμενών έρματος( δεδομένα Yamamoto)[16]

Ηλικία (years)			Βάθος διάβρωσης(mm)								
			0	~0,5	~1,0	~1,5	~2,0	~2,5	~3,0	~3,5	~2,5
			0	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	
3,5	3,75	3,625	0	1	3	0	0	0	0	0	
4	4,25	4,125	0	3	11	9	1	0	0	0	
4,25	4,5	4,375	6	12	0	0	0	0	0	0	
7,25	7,5	7,375	0	2	6	1	0	1	0	0	
7,5	7,75	7,625	0	0	0	0	2	3	0	1	
7,75	8	7,875	0	0	5	5	1	6	0	0	
8	8,25	8,125	0	0	0	9	12	0	1	0	
8,25	8,5	8,375	3	9	5	6	14	6	6	1	
8,5	8,75	8,625	17	19	20	13	8	4	0	0	
9	9,25	9,125	0	1	4	5	0	0	0	0	
9,25	9,5	9,375	0	0	16	17	6	17	0	0	
10,75	11	10,875	0	0	1	0	1	0	2	1	
11	11,25	11,125	0	18	2	0	0	0	0	0	
11,25	11,5	11,375	0	0	0	0	2	3	1	2	
11,75	12	11,875	0	2	2	4	4	6	2	4	
12	12,25	12,125	0	0	3	4	5	0	0	0	
12,25	12,5	12,375	0	0	0	0	0	1	3	3	
12,5	12,75	12,625	3	1	0	4	7	1	2	1	
12,75	13	12,875	0	0	0	2	8	8	2	2	
13	13,25	13,125	1	22	24	18	5	6	7	11	
		fyj	30	90	102	97	76	62	26	26	SUM
		fyj*yj	0	22,5	76,5	121,25	133	139,5	71,5	84,5	648,75

		$f_{yj} \cdot y_j^2$	0	5,625	57,375	151,5625	232,75	313,87	196,625	274,62	1232,4
		$\sum f_{ij} x_i y_i$	0	214,25	711,75	1166,094	1340,5	1425,9	811,937	1030,2	6700,7

	$f_{xi}$	$f_{xi} \cdot x_i$	$f_{xi} \cdot x_i^2$		
	4	14,5	52,5625		
	24	99	408,375		
	18	78,75	344,5313		
	10	73,75	543,9063		
	6	45,75	348,8438		
	17	133,875	1054,266		
	22	178,75	1452,344		
	50	418,75	3507,031		
	81	698,625	6025,641		
	10	91,25	832,6563		
	56	525	4921,875		
	5	54,375	591,3281		
	20	222,5	2475,313		
	8	91	1035,125		
	24	285	3384,375		
	12	145,5	1764,188		
	7	86,625	1071,984		
	19	239,875	3028,422		
	22	283,25	3646,844		
	94	1233,75	16192,97		
<b>SUM</b>	<b>509</b>	<b>4999,875</b>	<b>52682,58</b>		
<b>b1</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>A</b>	<b><math>\sigma^2</math></b>	<b><math>\sigma_y^2</math></b>
0,006288	9,822937	1,274558	1,212787	0,79274	0,796794
R	0,005087				

Πίνακας δεδομένων από μετρήσεις στα κατώτερα stools των δεξαμενών φορτίου( δεδομένα Yamamoto) [16]

Ηλικία (years)	Βάθος διάβρωσης(mm)											
	0	~0,5	~1,0	~1,5	~2,0	~2,5	~3,0	~3,5				
			0	0,25	0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25		
3,25	3,5	3,375	0	2	9	19	0	0	0	0		
3,5	3,75	3,625	1	2	6	4	1	0	0	0		
4	4,25	4,125	14	56	63	24	3	0	0	0		
4,25	4,5	4,375	41	119	17	5	1	0	0	0		
7,25	7,5	7,375	0	0	12	30	35	6	1	0		
7,5	7,75	7,625	0	2	2	8	11	8	17	12		
7,75	8	7,875	1	9	10	29	18	41	18	7		
8	8,25	8,125	7	19	32	44	29	22	9	2		
8,25	8,5	8,375	0	20	54	83	92	68	24	19		
8,5	8,75	8,625	24	46	30	94	117	49	41	3		
8,75	9	8,875	0	14	12	12	5	1	1	0		
9	9,25	9,125	0	1	4	5	32	25	3	0		
9,25	9,5	9,375	0	2	21	23	128	25	1	0		
10,75	11	10,875	0	0	0	0	0	0	3	13		
11	11,25	11,125	0	0	1	21	21	46	26	16		
11,25	11,5	11,375	4	0	3	15	33	3	5	1		
11,75	12	11,875	0	5	23	25	31	44	27	51		
12	12,25	12,125	1	3	4	21	12	1	0	0		
12,25	12,5	12,375	0	0	0	1	0	1	15	31		
12,5	12,75	12,625	14	3	4	8	14	39	31	17		
12,75	13	12,875	1	14	16	30	50	54	35	4		
13	13,25	13,125	2	57	10	23	47	153	130	132		



	fyj	110	374	333	524	680	586	387	308	SUM
	fyj*yj	0	93,5	249,75	655	1190	1318,5	1064,2	1001	5572
	fyj*yj^2	0	23,37	187,312	818,75	2082,5	2966,6	2926,7	3253,2	12258
	$\Sigma f_{ij}x_iy_j$	0	696,1	1975,78	5873,1	11577,5	14308	12060	11916	58406

	fxi	fxi*xi	fxi*xi^2		
	30	101,25	341,7188		
	14	50,75	183,9688		
	160	660	2722,5		
	183	800,625	3502,734		
	84	619,5	4568,813		
	60	457,5	3488,438		
	133	1047,375	8248,078		
	164	1332,5	10826,56		
	360	3015	25250,63		
	404	3484,5	30053,81		
	45	399,375	3544,453		
	70	638,75	5828,594		
	200	1875	17578,13		
	16	174	1892,25		
	131	1457,375	16213,3		
	64	728	8281		
	206	2446,25	29049,22		
	42	509,25	6174,656		
	48	594	7350,75		
	130	1641,25	20720,78		
	204	2626,5	33816,19		
	554	7271,25	95435,16		
SUM	3302	31930	335071,7		
b1	X	Y	A	$\sigma^2$	$\sigma_y^2$
0,013641	9,669897	1,687462	1,555558	0,846223	0,864919
R	0,021615				

**5. Συχνότητα εμφάνισης ρυθμού απώλειας πάχους στις δεξαμενές φορτίου και έρματος**

Δεξαμενές φορτίου		Δεξαμενές έρματος	
Ρυθμός απώλειας πάχους (mm/year)	Σχετική συχνότητα εμφάνισης	Ρυθμός απώλειας πάχους (mm/year)	Σχετική συχνότητα εμφάνισης
0,019048	0,043001	0,019048	0,026005
0,019417	0,015358	0,019417	0,01773
0,019802	0,022817	0,019802	0,004728
0,020202	0,002194	0,020202	0,001182
0,021053	0,014919	0,021053	0,028369
0,022472	0,011847	0,022472	0,021277
0,022989	0,000878	0,022989	0,001182
0,026667	0,010092	0,026667	0,027187
0,028986	0,059675	0,028986	0,046099
0,030769	0,012286	0,030769	0,010638
0,033898	0,002194	0,057143	0,003546
0,057143	0,001755	0,057143	0,029551
0,057143	0,024133	0,058252	0,023641
0,058252	0,022378	0,059406	0,015366
0,059406	0,012725	0,060606	0,002364
0,060606	0,001755	0,063158	0,01182
0,063158	0,01097	0,067416	0,009456
0,067416	0,017113	0,068966	0,001182
0,068966	0,000439	0,084507	0,004728
0,08	0,000439	0,086957	0,049645
0,086957	0,018429	0,092308	0,01773
0,092308	0,008776	0,095238	0,009456

0,095238	0,014041	0,097087	0,035461
0,097087	0,024133	0,09901	0,023641
0,09901	0,014041	0,10101	0,009456
0,10101	0,002194	0,101695	0,002364
0,101695	0,003949	0,103093	0,001182
0,105263	0,01097	0,105263	0,020095
0,11236	0,016235	0,11236	0,002364
0,114943	0,000878	0,133333	0,020095
0,133333	0,000439	0,135922	0,026005
0,133333	0,017113	0,136986	0,001182
0,135922	0,021939	0,138614	0,049645
0,136986	0,000439	0,140845	0,001182
0,138614	0,010531	0,141414	0,01182
0,141414	0,004388	0,14433	0,004728
0,144928	0,022817	0,144928	0,042553
0,147368	0,006143	0,147368	0,007092
0,153846	0,007459	0,153846	0,023641
0,157303	0,012286	0,157303	0,003546
0,15873	0,002194	0,15873	0,002364
0,16092	0,000878	0,16092	0,001182
0,169492	0,000878	0,169492	0,004728
0,171429	0,034664	0,171429	0,001182
0,174757	0,036858	0,171429	0,021277
0,178218	0,018868	0,174757	0,021277
0,181818	0,008337	0,178218	0,036643
0,186667	0,000439	0,181818	0,003546

0,189474	0,012725	0,181818	0,003546
0,191781	0,000878	0,185567	0,001182
0,202247	0,009215	0,189474	0,020095
0,202899	0,017113	0,191781	0,003546
0,208955	0,000439	0,202247	0,009456
0,209524	0,036419	0,202899	0,01182
0,213592	0,03247	0,208955	0,003546
0,215385	0,017113	0,209524	0,020095
0,217822	0,026327	0,213592	0,028369
0,222222	0,006582	0,215385	0,008274
0,231579	0,016674	0,217822	0,013002
0,237288	0,001316	0,222222	0,004728
0,24	0,002194	0,222222	0,00591
0,247191	0,007459	0,231579	0,020095
0,247619	0,041246	0,246575	0,001182
0,252427	0,017113	0,247619	0,031915
0,252874	0,001316	0,252427	0,010638
0,257426	0,029838	0,257426	0,003546
0,26087	0,007898	0,26087	0,001182
0,262626	0,011847	0,262626	0,01182
0,268657	0,000878	0,273684	0,001182
0,273684	0,007898	0,276923	0,001182
0,276923	0,004388	0,285714	0,003546
0,285714	0,000439	0,285714	0,001182
0,285714	0,01097	0,291262	0,004728
0,291262	0,003072	0,29703	0,002364

0,292135	0,001755	0,30303	0,004728
0,29703	0,011847	0,315789	0,001182
0,30303	0,001316	0,328358	0,001182
0,30303	0,011847	0,336634	0,002364
0,315789	0,009215	0,338462	0,002364
0,318841	0,000878	0,343434	0,001182
0,32381	0,00351	0,357895	0,001182
0,330097	0,000439	0,376238	0,004728
0,336634	0,00351	0,383838	0,004728
0,337079	0,001316	0,38806	0,001182
0,338462	0,001755	0,424242	0,004728
0,343434	0,01097	0,447761	0,001182
0,357895	0,002194		
0,383838	0,00351		
0,4	0,003072		
0,442105	0,001755		