

Utjecaj starenja na graničnu čvrstoću brodskog trupa

Jurišić, Paul

Doctoral thesis / Disertacija

2012

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:894529>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PAUL JURIŠIĆ

**UTJECAJ STARENJA NA
GRANIČNU ČVRSTOĆU BRODSKOG TRUPA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2012



University of Zagreb

FACULTY OF MECHAICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

PAUL JURIŠIĆ

**ULTIMATE HULL GIRDER STRENGTH
OF AN AGING SHIP**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2012



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

PAUL JURIŠIĆ

**UTJECAJ STARENJA NA
GRANIČNU ČVRSTOĆU BRODSKOG TRUPA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Joško Parunov

Zagreb, 2012



University of Zagreb

FACULTY OF MECHAICAL ENGINEERING
AND NAVAL ARCHITECTURE

PAUL JURIŠIĆ

**ULTIMATE HULL GIRDER STRENGTH
OF AN AGING SHIP**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Prof. Joško Parunov, Ph.D.

Zagreb, 2012

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK: 629.5.024:629.5.018.4

Ključne riječi: tanker za prijevoz nafte, korozijska istrošenja, zamorne pukotine, inspekcijski pregledi, ukrepljeni panel, kolapsna čvrstoća, nelinearna analiza metodom konačnih elemenata, granična čvrstoća broskog trupa

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Brodogradnja

Institucija u kojoj je rad izrađen: Fakultet strojarstva i brodogradnje
Sveučilišta u Zagrebu

Mentor rada: Dr. sc. Joško Parunov, izvanredni profesor

Broj stranica: 130

Broj slika: 122

Broj tablica: 24

Broj bibliografskih jedinica: 53

Datum obrane: 29. lipnja 2012.

Povjerenstvo: Akademik Ivo Senjanović, prof. emeritus,
predsjednik
Dr. sc. Joško Parunov, izv. prof., mentor
Dr. sc. Ivan Juraga, redoviti prof.
Dr. sc. Kalman Žiha, redoviti prof.
Dr. sc. Yordan Garbatov, redoviti prof., Instituto
Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa,
Portugal

Institucija u kojoj je rad pohranjen: Fakultet strojarstva i brodogradnje
Sveučilišta u Zagrebu

ZAHVALA

Želim se zahvaliti svom mentoru, prof. dr. Jošku Parunovu, voditelju ovog rada, koji mi je pružio nesebičnu podršku i pomoć oko definiranja zadatka, kao i tijekom izrade ovog rada. Cijelo me vrijeme vodio i usmjeravao svojim preciznim primjedbama i savjetima. Dugujem mu stoga neizmjernu zahvalnost i na njegovoj ukupnoj podršci, koju mi je pružio tijekom mog znanstvenog usavršavanja, od samog početka postdiplomskog doktorskog studija na zagrebačkom Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Zahvaljujem se članovima povjerenstva za ocjenu i obranu ovog rada na korisnim sugestijama i komentarima koji su rad učinili boljim.

Želim se posebno zahvaliti gospođi Silvani Škoko Gavranović koja mi je pomogla oko uređivanja teksta, tablica i slika. Hvala također dragim kolegama asistentu Mari Čorku, dipl.ing. i Damiru Rogulju, dipl.ing. na pomoći pri izvođenju složenih proračuna u 3. poglavlju rada.

Posebno hvala rukovodstvu i svim kolegama Hrvatskog registra brodova, na odobrenju mog rada, kao i dopuštenju za korištenjem naše baze podataka brodova, te pruženoj podršci mom stručnom usavršavanju.

Hvala mojoj sestri na pomoći oko prijevoda teksta na engleski jezik, kao i roditeljima na iskazanom povjerenju u mene. Na kraju veliko hvala mojoj supruzi Adriani, kćeri Paoli i sinu Fabianu na strpljenju, razumijevanju i odricanjima tijekom proteklih godina.

U Splitu, lipanj 2012. god.

Paul Jurišić

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| PREDGOVOR | v |
| SAŽETAK..... | vi |
| EXTENDED SUMMARY Ultimate Hull Girder Strength of an Aging Ship | vii |
| KLJUČNE RIJEČI..... | xx |
| POPIS OZNAKA I KRATICA | xxi |
| POPIS SLIKA | xxv |
| POPIS TABLICA..... | xxix |
| 1. UVOD | 1 |
| 1.1. Opis problema | 1 |
| 1.2. Hipoteza rada..... | 2 |
| 1.3. Pregled literature | 3 |
| 1.4. Metodologija istraživanja i struktura doktorskog rada..... | 4 |
| 2. DUGOROČNO PREDVIĐANJE KOROZIJSKIH ISTROŠENJA BRODSKE KONSTRUKCIJE | 6 |
| 2.1. Propadanje brodske konstrukcije uslijed starenja | 7 |
| 2.2. Općenito o koroziji na brodovima..... | 9 |
| 2.2.1. Mehanizmi korozijskih procesa | 9 |
| 2.2.2. Pojavni oblici korozije | 11 |
| 2.2.3. Korozija palubne konstrukcije naftnih tankera | 14 |
| 2.3. Metode sprječavanja korozije..... | 18 |
| 2.4. Pregledi, otkrivanje i mjerenje korozije u brodograđevnoj praksi | 19 |
| 2.5. Vrste pregleda broskog trupa | 19 |
| 2.5.1. Otkrivanje oštećenja i metode mjerenja | 21 |
| 2.6. Statističko modeliranje korozije..... | 22 |
| 2.6.1. Modeliranje globalne korozije | 26 |
| 2.6.2. Modeliranje lokalne korozije | 33 |
| 3. ČVRSTOĆA UKREPLJENIH PANELA OSLABLJENIH DJELOVANJEM KOROZIJE I ZAMORNIH PUKOTINA | 47 |
| 3.1. Značajke kolapsa ploča i ukrepljenih panela..... | 48 |
| 3.1.1. Kolaps neukrepljenih jednoosno opterećenih ploča | 48 |
| 3.1.2. Kolaps ukrepljenih panela palubne konstrukcije | 49 |
| 3.1.3. Metode proračuna kolapsa ukrepljenih panela | 51 |
| 3.1.4. Usporedba metoda..... | 65 |
| 3.2. Primjena metoda na provjeru nosivosti ukrepljenih panela i ploča sa zamornim pukotinama, te rupičastom korozijom i korozijom u žlijebu zavarenog spoja.... | 68 |
| 3.2.1. Pukotina ploče | 69 |
| 3.2.2. Pukotina ukrepljenog panela | 72 |
| 3.2.3. Rupičasta korozija ploče (pitting) | 75 |
| 3.2.4. Žljebasta korozija (grooving) | 78 |
| 4. GRANIČNA ČVRSTOĆA KORODIRANE BRODSKE KONSTRUKCIJE..... | 82 |
| 4.1. Kolaps broskog trupa | 83 |
| 4.2. Proračun graničnog momenta savijanja za slučaj opće (jednolike) korozije brodskog trupa..... | 85 |

| | | |
|--------|--|------------|
| 4.2.1. | Metoda jednog koraka..... | 85 |
| 4.2.2. | Metoda progresivnog kolapsa (PCA)..... | 87 |
| 4.3. | Usporedba rezultata proračuna metode progresivnog kolapsa i metode jednog koraka (program <i>PULS</i> i program <i>MARS</i>) za slučaj opće (jednolike) korozije .. | 92 |
| 4.4. | Granična čvrstoća trupa oslabljenog zamornim pukotinama, rupičastom korozijom i korozijom u žlijebu zavarenog spoja | 95 |
| 5. | PRIMJENA REZULTATA ZA UNAPREĐENJE STRATEGIJE INSPEKCIJE, ODRŽAVANJA I POPRAVAKA BRODOVA U SLUŽBI..... | 99 |
| 5.1. | Korozijske mape..... | 99 |
| 5.2. | Utjecaj korozijskih istrošenja na kolapsnu čvrstoću ukrepljenih panela..... | 102 |
| 5.2.1. | Jednolika korozijska istrošenja ploča i ukrepljenih panela palube | 102 |
| 5.2.2. | Nejednolika korozijska istrošenja (grooving, pitting i pukotine) ploča i ukrepljenih panela palube | 109 |
| 5.3. | Provjera granične čvrstoće | 111 |
| 5.3.1. | Provjera granične čvrstoće prema pravilima BV-a za jednolika korozijska istrošenja | 112 |
| 5.3.2. | Provjera granične čvrstoće prema pravilima BV-a za nejednolika korozijska istrošenja | 114 |
| 5.3.3. | Provjera granične čvrstoće prema Usuglašenim Pravilima CSR za tankere s dvostrukom oplatom | 116 |
| 5.4. | Primjena korozijskog modela u analizi dinamičke izdržljivosti brodskog trupa..... | 118 |
| 6. | ZAKLJUČAK DOKTORSKOG RADA | 123 |
| 6.1. | Zaključna razmatranja i izvorni znanstveni doprinos doktorskog rada..... | 123 |
| 6.2. | Smjernice za daljnja istraživanja..... | 124 |
| 7. | LITERATURA..... | 126 |
| | ŽIVOTOPIS | 129 |
| | BIOGRAPHY..... | 130 |

PREDGOVOR

Oštećenja konstrukcije naftnih tankera su relativno učestala unatoč stalnim naporima klasifikacijskih društava i Međunarodne pomorske organizacije (IMO) na povećanju sigurnosti pomorskog transporta. Teške pomorske nesreće u koje spadaju potonuća tankera imaju za posljedicu gubitke ljudskih života, onečišćenje okoliša i iznimno velike financijske gubitke. Najčešći razlog havarija naftnih tankera je degradacija broskog trupa i smanjenje sigurnosti brodske konstrukcije uslijed djelovanja "zuba vremena", u prvom redu kao posljedica korozije i zamornih pukotina. Takva oštećenja smanjuju nosivost konstrukcije i u težim slučajevima mogu dovesti do sloma trupa i gubitka broda, o čemu svjedoče nedavne havarije tankera "Erica" i "Prestige", koja su donijela izuzetno negativan publicitet brodogradnji i pomorskom transportu općenito.

Poticaj za izradu ovog rada leži u nastojanju i strateškoj odrednici Hrvatskog registra brodova (HRB) za oplemenjivanjem znanja i unapređenjem spoznaja vezanih za sigurnost pomorskog transporta. Problematika procjena podobnosti brodskih konstrukcija na isteku životnog vijeka je svakako jedan od kompleksnijih problema s kojim se susreću klasifikacijska društva u svakodnevnoj praksi. Unatoč regulativi Međunarodne pomorske organizacije (IMO) koje se potrebno strogo pridržavati, nesumnjivo je da dubinsko i znanstveno utemeljeno poznavanje problematike sigurnosti brodskih konstrukcija smanjuje rizik od pogrešne procjene. Za očekivati je da takav pristup doprinese boljoj prepoznatljivosti HRB-a unutar Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava (IACS). Također je za očekivati poboljšanje interakcije klasifikacijskog društva i brodovlasnika, posebno vezano za procjenu da li brod na isteku životnog vijeka poslati u brodogradilište na izmjenu korozijom oštećene konstrukcije trupa ili je s obzirom na obim potrebnih popravaka za brodovlasnika isplativije otpisati brod. Također, važna odluka, koja je često vremenski limitirana zbog dokovanja broda, je da li je zamornu pukotinu ili nejednoliko korozijsko oštećenje potrebno odmah sanirati ili je prihvatljivo popravke odgoditi do sljedećeg periodičnog pregleda broda na suhom. Cilj istraživanja poduzetih u sklopu disertacije je minimiziranje rizika od pogrešne procjene, što se postiže razvojem numeričkih metoda proračuna i njihovom prilagodbom za primjenu u inženjerskoj praksi.

SAŽETAK

U radu je provedena analiza korozijskih istrošenja tankera s jednostrukom oplatom na temelju izmjera debljina elemenata trupa iz baze Hrvatskog registra brodova (HRB) s periodičnih pregleda brodova u službi nakon 10, 15 i 20 godina. Matematički model koji opisuje vremensku propagaciju korozije kalibriran je na temelju mjerenja nakon 10 i 15 godina. Predviđanje korozijskih istrošenja na osnovi tako kalibriranog matematičkog modela vrlo dobro se slaže s izmjerenim korozijskim istrošenjima nakon 20 godina. Istraživanje je provedeno kako za globalni gubitak momenta otpora glavnog rebra, tako i za lokalna istrošenja palubne konstrukcije tankera.

Definiran je model jednoosno opterećene ploče i ukrepljenog panela primjenom nelinearne analize metodom konačnih elemenata (NMKE). Model NMKE je provjeren usporedbom s dvije verificirane metode za proračun kolapsa ploča i panela: metodom iz Usuglašenih pravila za projektiranje tankera, te programom PULS klasifikacijskog društva Det Norske Veritas. Na temelju provedene komparativne analize zaključeno je da model NMKE daje vjerodostojne rezultate pa se primjena modela mogla uzeti u obzir kod daljnjih analiza čvrstoće panela palubne konstrukcije oslabljene djelovanjem nejednolikih korozijskih istrošenja i zamornih pukotina. Ovakvi uvjeti, koji odgovaraju realnim uvjetima istrošenja brodskih konstrukcija, mogu se simulirati pomoću NMKE, dok su preostale metode koje propisuju pravila klasifikacijskih društava pogodne samo za jednolika korozijska istrošenja.

Analizirane su dvije metode proračuna granične čvrstoće: metoda jednog koraka uz pomoć programa PULS i metoda progresivnog kolapsa korištenjem programa MARS, klasifikacijskog društva Bureau Veritas. Pokazano je da metoda jednog koraka daje do 2% niže rezultate proračuna granične čvrstoće u odnosu na metodu progresivnog kolapsa. Predložen je način analize utjecaja nejednolikih korozijskih istrošenja i zamornih pukotina na graničnu čvrstoću trupa inkorporiranjem rezultata kolapsa panela dobivenih NMKE.

U završnom poglavlju rada predložen je niz praktičnih postupaka kao pomoć u proceduri inspekcije i održavanja brodova u službi. Predložene su korozijske mape kojima se vizualno može procijeniti kada će konstrukcijski element trebati zamjenu zbog prekomjernih korozijskih istrošenja. Predložene su i metode planiranja inspekcijskih pregleda koje kombiniraju degradirajuće učinke napredovanja korozije kroz godine službe s fizikalno utemeljenim proračunskim postupcima određivanja nosivosti oslabljene konstrukcije trupa. Na taj se način međusobno prožimaju metode razvijene u prethodnim poglavljima rada.

EXTENDED SUMMARY

Ultimate Hull Girder Strength of an Aging Ship

Motivation for this thesis lies in the effort and strategic decision of the Croatian Register of Shipping (CRS) for improving knowledge related to the safety of maritime transport. The issue of ship structural assessment at the end of design service life is one of the most complex and important problems faced by the Classification Societies. The scientifically based knowledge of structural behaviour of aged ship may reduce the risk of wrong decisions. Such risk is always present, despite the existing regulations of the International Maritime Organization (IMO).

One of the most important questions imposed to the Classification Societies is to define whether the ship at the end of design service life should be repaired or to be sent to scrap and with that will be taken out of service. Also, another critical decision has to be taken, whether fatigue cracks and non-uniform corrosion degradation should be repaired immediately or it is acceptable to postpone repairs until the next ship periodic survey. This is a time-constrained decision because of the short dry docking period. Both of questions are related to large economic cost from one side and shipping safety and reputation of the Classification Societies from the other side. Development of a new approach dealing with the ultimate hull girder strength analysis of aging ships, adapted for the use in engineering practice, will contribute to the rational decision for maintenance planning, inspection and repair of aging ship.

It is expected that the approach, developed in this thesis, will contribute to a better positioning of the CRS within the International Association of Classification Societies (IACS). It is also expected to improve the interaction between the Classification Societies and ship-owners.

1. INTRODUCTION

The corrosion makes ships prone to structural degradation and the possibility of accidents increases with the aging of ships. Statistical analyses reveal that corrosion degradation is the number one cause for structural casualties in aged ships. The consequences of corrosion wastage can be very serious leading to crack initiation and propagation to such extent to cause the loss of ship.

Hull girder section modulus (HGSM) is a fundamental descriptor of the ship longitudinal strength and can be used to measure how the ship hull deteriorates over time because of corrosion. Traditional strength analysis uses simplified deterministic approaches to account for this time dependent deterioration process. Common practice is that nominal corrosion additions are to be predefined. Thus, the Classification Societies Rules, including the newly developed Common Structural Rules (CSR) for Double-hull Oil Tankers [1], assume constant loss of HGSM during the whole service lifetime of a ship. Ship structural assessment, in the design phase, is performed assuming such "net" HGSM. Although "the Rules" approach is practical, it is obviously conservative one, as HGSM loss is actually a time-dependent non-linear function. Nowadays, there is a clear trend of adopting non-linear models in order to predict the long-term corrosion wastage degradation and the associated HGSM reduction as a function of time. Developing a direct approach accounting for the real corrosion degradation will be a very important and useful tool for the Classification Societies and ship owners in order to predict the long-term hull degradation and to decide whether the renewal of hull structures are necessary and when would be the optimal time for repairs.

The time for repair of aged ships is empirically determined by the Classification Societies, based on existing criteria of damage allowance. One of the most important criteria is the so-called "10% rule", which represents tolerated 10% loss from initial as-built HGSM.

Recently, based on numerous studies and public pressure as well, the approach for longitudinal strength assessment through HGSM of new-built ships started to be complemented based on the hull girder ultimate strength (HGUS) assessment, as a physically justified criterion for entire capacity of the ship hull. The logical continuation of this approach in further research is that for the old ships HGUS is used as a criterion of structural adequacy. The results of such approach were used in this thesis.

Although the longitudinal strength of the hull structure is in focus as the most important component of the ship strength, the results and findings presented in this thesis can be used in the calculations of other components of strength, primarily in the analyses of the primary transversal structure using the finite elements method (FEM).

2. ASSESSMENT OF HGSM LOSS AND THE LOCAL CORROSION WASTAGE

One of the principal studies in this thesis is to analyse the practical applicability of the currently used long-term non-linear corrosion wastage models and their predictions. The corrosion degradation of three tanker ships after 20 years in service have been analysed based on the real thickness measurements at 10 and 15 years in service. The actual measurements

after 20 years' service life were then compared to the theoretical model predictions and statistical measures of uncertainty were determined. The assessment of HGSM reduction was performed, followed by the assessment of local corrosion deterioration of main deck plates and longitudinals. For the local corrosion deterioration analysis, total number of 6567 measurements was used. *The approach applied here is different comparing to other similar studies, as individual ships are considered, while in other similar studies whole fleets of ships are analysed together. The main goal of the present approach is to fit non-linear corrosion deterioration models to measured corrosion thickness for 10 and 15 years of service life, and then to assess how well the corrosion deterioration after 20 years is predicted.*

First, this thesis analysis the corrosion wastage of three oil tankers with single-hull structure built in the eighties. The whole cargo area is made of mild steel for the two sister ships, while the third one has high tensile steel in the bottom and deck areas and mild steel in the neutral axis area including the longitudinal bulkheads. Central tanks along the cargo hold areas are cargo oil tanks, while wing tanks are used for ballast or cargo. The main characteristics of the three single-hull tankers are shown in Table 2.2, and the midship section of the first single-hull oil tanker is shown in Figure 2.11. HGSMs in cargo hold area were calculated using MARS, the program for 2D sectional analysis developed by the classification society Bureau Veritas (BV).

The HGSM reduction was defined based on the following procedure. First, the as-built HGSM is calculated. Then, thickness of the structural elements (plates and longitudinals) contributing to the longitudinal strength is modified according to the results of thickness measurements from the Croatian Register of Shipping (CRS) file. Gauging records were obtained during the periodic dry-dockings and close-up surveys of ships in service after 10, 15 and 20 years. Corrosion deterioration models of the ships were determined for the transverse sections considering the central tanks as cargo oil tanks and the wing tanks as ballast tanks.

The aging effect was measured by the HGSM loss $R(t)$, which represents the ratio of as-gauged HGSM and as-built HGSM, as given by eq. (2.7).

Results for the measured $R(t)$ for the three ships after 10, 15 and 20 years are presented in Table 2.3. HGSM loss is determined as a function of time taking into account the coating lifetime. The equation (2.8) is used to define the HGSM loss as a function of time has been proposed by Wang et al. [9]. The governing parameters of Eq. (2.8), C and index I are defined based on the regression analysis using a data set of real measurements of corrosion

depth that leads to the HGSM loss. The coating life, t_0 , which represents the time when HGSM starts to degrade from the as-built condition is assumed.

In order to analyse the accuracy of the HGSM prediction model, Eq. (2.8) is fitted through the calculated points of the HGSM loss at 10 and 15 years. The governing parameters of Eq. (2.8) are presented in Table 2.5, while the corresponding diagrams are shown in Figure 2.14.

It can be seen from Figure 2.14 that the HGSM loss at the 20th year for ship no. 1 is significantly underestimated by the model prediction. The prediction of the HGSM loss at the 20th year for ship no. 2 is satisfactory. The HGSM reduction is almost linear from the time of the coating breakdown at 6th year. The results for ship no. 3 indicate that the coating lifetime is the longest, resulting in 8 years, but after the breakdown of the coating, the corrosion deterioration is very fast. The prediction of the HGSM reduction for that ship overestimates the actual HGSM loss at 20th year.

It should be mentioned that there is a large uncertainty associated to the HGSM loss as the corrosion degradation is different for each transverse section of the ship hull. It is assumed that the measured corrosion depths of the sections are representative (average) of the corrosion losses. Additional analyses are required to reduce the uncertainty of the long-term predictions of corrosion reduction of HGSM.

The local corrosion wastage analysis is performed separately for plates and longitudinals of the main deck in ballast and cargo tanks. For the local corrosion wastage, equation (2.9) is proposed according to Gua et al. 2008 [10].

In equation (2.9) [10] $C(t)$ is the corrosion wastage at age t ; t_0 is the year when thickness of the plates starts to deviate from the as-built condition; α and β are constants that can be determined according to the measurement data.

The total number of measurements of deck plates and longitudinals (stiffeners) used in the thesis are 6567. 2135 measurements were used for ship no. 1, 2079 for ship no. 2, and 2353 for ship no. 3 respectively. Similarly to the prediction model of HGSM loss, curves are fitted through the real measurements of corrosion depth for deck plates and longitudinals at 10th and 15th years. Since there are three unknown variables in equation (2.9) (t_0 , α and β), and only two calibration points (at 10 and 15 years) are available, t_0 has to be assumed.

Eq. (2.9) is fitted to the mean value of corrosion depth and also to the value of the 95% confidence level of the corrosion depth, which is related to so-called the extreme corrosion depth. To estimate the extreme corrosion depth, the probability density function of corrosion depth is fitted to the each data set. The Weibull probability density function is

assumed to be the most adequate for representing the corrosion depth at any time during the ship service life (Parunov et al. 2007 [13], Gua et al. 2008 [10]). Such satisfactory fitting of the Weibull probability density function is confirmed also in the present study, as demonstrated in Figure 2.15 and Figure 2.16, for deck plates in cargo tanks at year 15th and 20th for ship no. 2.

The mean value and the extreme corrosion depth of the main deck plates in cargo tanks are presented in Figures 2.17 and 2.18 respectively. It can be seen from Figure 2.17 that the newly developed corrosion model over-predicts the mean value of corrosion depth of ship no. 2 while it underestimates the measured corrosion depth for ship 1 and 3. Coating life is estimated to be 6.5 years.

It is evident, as can be seen from Figure 2.18, that the extreme corrosion depth after 20th year is well estimated for ship no. 3. For ship 1 and 2, the corrosion depth after 20th year is underestimated and overestimated respectively. The corrosion depth trend is almost linear for ship 2 and 3, while the coating life is estimated to 5 years for all three ships.

It is interesting to notice from Figures 2.17 and 2.18 that for ship no. 2, the corrosion depth after 20th year is only slightly higher compared to the corrosion depth after 15th year. For ship no. 1, in contrary, the difference between the corrosion depth at 20th and 15th years is unexpectedly large, indicating that in this case the concave curve is more appropriate for corrosion process modelling, as it is shown in Figure 2.7 for type A curve (Paik [18]).

The mean and extreme values of corrosion depth of main deck longitudinals in cargo tanks are presented in Figures 2.19 and 2.20 respectively. All three estimations overestimate the real corrosion depth measurements after 20th year. That is true for both mean and extreme corrosion depth values. It has been noticed that for deck plates, the corrosion rate is reduced between years 15 and 20 for ship no. 2, which is also confirmed for deck longitudinals. Based on the analysis just presented, one may conclude that the corrosion depth of deck longitudinals is larger comparing to deck plates. Thus, for a 20 years' service life, the extreme value of corrosion depth of deck longitudinals is between 3 and 4 mm, while for deck plates it is between 2 and 3 mm. Coating life of deck longitudinals is estimated to be 8 and 5 years for the mean and extreme value of corrosion depth respectively.

The mean and extreme values of the corrosion depth for main deck plates in ballast tanks are presented in Figures 2.21 and 2.22 respectively. For ship no. 1, similar to cargo tank deck plates, the difference between the corrosion depth at 15th and 20th year is quite large, indicating that the type of concave curve should be used for the corrosion model. The tendency of the reduced corrosion rate for the period between 15th and 20th years, which has

been already noticed for the cargo tanks, is evident also for ballast tanks of ship no. 2. Consequently, the corrosion depth after 20 years is systematically overestimated by theoretical prediction for that vessel. For ship no. 3, predicted corrosion depth agrees well with the real measurements for both mean and extreme values of corrosion depth.

By comparing Figures 2.21 and 2.22 with Figures 2.17 and 2.18, it appears that the corrosion depth is higher for deck plates in cargo tanks than in ballast tanks. The coating life is estimated to be the same as for the deck plates in cargo tanks, i.e. 6.5 and 5 years for the mean and extreme values of the corrosion depth respectively.

The mean and extreme values of the corrosion depth of main deck longitudinals in ballast tanks are presented in Figures 2.22 and 2.23 respectively. The estimation for the mean value slightly overestimates the real measurements of corrosion depth after 20th year. For the extreme value prediction, the developed model overestimates the real measurements for ships 1 and 2, while it underestimates the measured corrosion depth for ship no. 3. Generally, measured corrosion depth for deck longitudinals in ballast tanks is approximately the same as for deck plating in ballast tanks. The coating life for deck longitudinals in ballast tanks reads 5 years for the extreme corrosion depth, while between 6.5 and 8 years for the mean corrosion depth wastage.

In order to quantify uncertainty of the new developed corrosion degradation model used in the present study, the predicted and measured mean and extreme corrosion depth values (presented in Tables 2.7-2.9) were subjected to further statistical analysis.

The average ratios of the measured and predicted corrosion depth read 1.01 and 0.96 for the mean and extreme corrosion depth respectively, while the corresponding standard deviations read 0.30 and 0.24. This indicates that the new developed model has almost no bias, but uncertainty of predictions is rather large. If only cargo tanks are considered, then the average ratios of the measured/predicted corrosion depth read 1.01 and 0.92 for the mean and extreme corrosion depth values respectively, while the corresponding standard deviations read 0.38 and 0.23. If only ballast tanks are considered, then, the average ratios measured/predicted corrosion depth read 1.01 and 1.00 for the mean and extreme corrosion values respectively, while the corresponding standard deviations read 0.22 and 0.26. Therefore, it is concluded that the agreement between the predicted and measured corrosion depths is better for the ballast tank structural components than for the cargo tanks.

One of the principal objectives of this thesis is to fit the existing non-linear corrosion depth models to the corrosion measurements at 10th and 15th year and then to compare it with

the measurements at 20th year, aiming to investigate the uncertainty of the long-term corrosion depth prediction. The following conclusions are drawn:

1. The estimation of the ship hull girder section modulus loss after 20th year is satisfactory for 2 out of the 3 studied ships. Coating life is between 5 and 8.5 years.
2. The corrosion depth in cargo tanks is larger than the one in ballast tanks, while deck longitudinals in cargo tanks experienced the largest corrosion wastage of all structural elements analysed.
3. The non-linear long-term local corrosion depth model based on the measurements after the 10th and 15th year in average predicts very well the corrosion depth after the 20th year. However, the uncertainty of that prediction, measured by standard deviation, is rather large.
4. There is no correlation between the corrosion severities of a local deck plates (longitudinals) and that of HGSM loss based on the corrosion models analyses. Deck plate can be severely wasted while the overall wastage of the entire hull section may remain at a very low level. Therefore, corrosion wastage of local plate and HGSM loss are to be treated independently.
5. Also, it was found that the new developed model is more accurate and reliable in ballast than in cargo tanks.

3. COLLAPSE STRENGTH OF PLATES AND STIFFENED PANEL SUBJECTED TO CORROSION AND FATIGUE CRACKS

A model for collapse assessment of uniaxially compressed plates and stiffened panels has been developed and tested employing the non-linear finite element method (NLFEM) using commercial software FEMAP with NX Nastran. The objective was to define a model that is simple enough to be applicable in every-day engineering practice. The principal difficulties are related to the choice of an appropriate definition of the model extent and boundary conditions, especially the mathematical description of the initial imperfections that have dominant influence on final collapse strength.

The model for unstiffened plates is extended between the longitudinals along longitudinal plate edges and between the transverse web frames along transverse plate edges as has been shown in Figure 3.9. The typical element (mesh) size employed is 50×50 mm. This corresponds to about 16 elements in the shorter (transverse) direction and to about 80 elements in the longer (longitudinal) direction for an unstiffened plate of large oil tankers.

The boundary condition can affect significantly the plate strength. One bay plate model is used in this thesis, where the plate is simply supported at longitudinal edges and clamped at the transverse ones. This one bay model may be appropriate for uniaxially loaded rectangular plates.

The extent of the model used for stiffened panel is one half of stiffener spacing on each side of the longitudinal in transverse direction and half of web frame spacing on each side of web frame in the longitudinal direction, as shown in Figure 3.10. For the present NLFEM the following boundary conditions are applied where $T[x, y, z]$ indicates translational constraints, and $R[x, y, z]$ indicates rotational constraints; "0" indicates constraints, and "1" indicates no constraints as is presented in Figures 3.13 and 3.14; Symmetric condition at $A-A0$: $R[1,0,0]$ with all plate nodes and stiffener nodes having an equal x - displacement; Symmetric conditions at $B-B0$: $T[0, 1, 1]$ and $R[1, 0, 0]$; Symmetric conditions at $B-B0$: $T[0, 1, 1]$ and $R[1, 0, 0]$; Symmetric conditions at $A-B$ and $A0-B0$: $T[1, 0, 1]$ and $R[0, 1, 1]$; At transverse floors: $T[1, 1, 0]$ for plate nodes, and $T[1, 1, 0]$ for stiffener web nodes.

Welded metal structures during fabrications always have initial imperfections in the form of initial deformations and residual stresses [38]. The residual stress effect was excluded from the analysis in this thesis. Initial imperfections in elastic buckling mode with suitable magnitudes were chosen in the NLFEM analyses. The plate initial deformation magnitude is calculated by equations 3.3 and 3.4 and the result is presented in Figure 3.15. The shape of the initial deformation is obtained by linear elastic buckling analysis.

For stiffened panels, three types of initial deformation are considered [37]: plate initial deflection, beam-column initial deflection, and sideways initial deflection of stiffener web. Shapes of the initial deformations are assumed to be similar to the stiffened plate buckling modes (equations 3.5 – 3.7). Total initial imperfections of the models are shown in Figures 3.16, 3.17 and 3.18.

The model was tested by comparing NLFEM with two widely recognized methods for calculating the collapse (ultimate compressive strength) of unstiffened plates and stiffened panels. The first one is a simplified formula of harmonized rules for the construction of oil tankers with double hulls (CSR), and the second one is the PULS program of the Classification Society DNV.

First, nine unstiffened plates made from three different types of materials were analysed and for each material three different thicknesses were chosen, as shown in Table 3.1 [38]. The plate slenderness, β_E , was between 1.19 and 3.075, which represents a range of slenderness that usually occurs in practice. The panel dimensions were

4300 × 815 mm. Table 3.1 shows the results of ultimate strength obtained by NLFEM, program PULS, and Frankland's formula (CSR). The comparison between the results obtained by these three methods shows that a good match was achieved. Mean value of discrepancy of NLFEM compared to CSR is 3.9%, while the standard deviation reads 3.6%. The maximal discrepancy reads about 10%. This confirms the reliability of the used finite element model (NLFEM), as shown in Figure 3.23.

Then, eight stiffened panels were analysed by NLFEM using the program Femap with NX Nastran. Three types of stiffeners were considered: flat profiles, L-profiles, and T-profiles. Geometrical characteristics of the stiffened panels, in millimetres, and the results of NLFEM to assess the ultimate strength are shown in Table 3.2. The ultimate strength σ_U for eight stiffened panels were in the range from 0.60 σ_Y to 0.83 σ_Y .

The comparison of the results obtained using NLFEM, program PULS and the formula from CSR, for the above-mentioned eight stiffened panels is presented in Table 3.3. There is a very good agreement of results obtained by the different methods. Mean value of the model uncertainty of NLFEM compared to CSR is -0.33%, while the standard deviation reads 4.52%. The largest difference between the results obtained using NLFEM and CSR reads about 7%, which is satisfactory. It is interesting to notice that the maximal difference between the two rule methods, PULS and CSR, is larger than the maximal discrepancy between proposed NLFEM and CSR. That is another favourable indicator of appropriateness of the NLFEM model proposed in the thesis.

To conclude, it was shown that the proposed NLFEM model is effective, applicable, and that it can be used in practice for an evaluation of non-corroded, and uniformly corroded plates and stiffened panels. Advantages of NLFEM model in comparison with the analytical formulas of CSR rules and program PULSE is its ability to change a number of parameters and load conditions that occur during ship's service life. The cracks of plates, cracks of stiffened panels, corrosion in weld joints (grooving), and pitting corrosion often appear in the structure after several years of ship in service. These conditions can be simulated using NLFEM, and then analysed, which for the other two methods is not the case.

Figures 3.26 to 3.47 present some of these phenomena and their effect on the strength of the panel deck structure. Differences in "load–end shortening curves" as a result of non-uniform corrosion and cracks are presented in figs. 3.31, 3.36, 3.41 and 3.47.

Definition of the simple structural model that is applicable in every-day engineering practice, its boundary conditions and initial deformations as well as verification of such model represents a contribution of the present thesis. Furthermore, there are no references in

the available literature describing the application of the FE software Femap with NX Nastran in collapse strength assessment of plates and stiffened panels.

4. HULL GIRDER ULTIMATE STRENGTH OF CORRODED SHIP STRUCTURE

In this thesis, two methods for the assessment of the ultimate longitudinal capacity of hull structure are used. Both methods are in accordance with the requirements of CSR: the one-step method where PULS is used and the progressive collapse method using program MARS. The HGUS of three oil tankers is studied. The analysis is performed firstly for the initial as-built HGSM and then for reduced HGSM subjected to uniform corrosion, measured at 10th, 15th and 20th year of service. It was shown (Tables 4.7, 4.8 and 4.9 as well as in Figures 4.7, 4.8 and 4.9) that considering uniform corrosion wastage, the one-step method gives a 2% lower ultimate strength in comparison to the method of progressive collapse. The reason for this is that the method of progressive collapse gradually (in steps) calculates the limit of HGUS. It is assumed that once HGUS of individual deck stiffened panel is reached, loaded panel can still carry some load, before it comes to the point of the hull structure collapse. While the one-step method calculates HGUS from one step assuming that the collapse of the hull occurs as soon as bending moment reaches the limit value of the deck panels' strength.

Also, based on the comparison of the effect of general (uniform) corrosion for all three models (ship 1, ship 2, ship 3), it can be concluded that after the hull surveys at 10, 15 and 20 years there was not any reduction in the longitudinal strength of more than 10%, that is acceptable reduction in accordance with the IMO requirements. In all three ships this 10% reduction could happen between 25 to 30 years, i.e. later than designed ship lifetime. The achieved results of collapse strength of plates and stiffened panels, described in chapter 3 of the thesis, are incorporated in the calculation of HGUS. The results presented in Figures 4.10 to 4.13 confirmed that the degradation effects, such as uneven corrosion wastages (grooving and pitting) and cracks, could significantly reduce the ultimate strength of hull structure.

Research is performed within the present work in order to find appropriate way to incorporate aging effects in HGUS calculation. For the case of non-uniform corrosion and fatigue cracks it is proposed to combine the methods for HGUS with NLFEM of single deck panel.

5. STRATEGIES FOR SURVEY, MAINTENANCE AND REPAIR IMPROVEMENT OF AGING SHIPS IN SERVICE

In the last chapter of this thesis several practical approaches are proposed to assist the process of survey and maintenance of ships in service. *First, the method for predicting the corrosion degradation can be presented in the form of corrosion maps, allowing surveyors to facilitate the practice of making costly repairs and detailed examination of the hull structure, as presented in Figures 5.1 to 5.4.* The allowable thickness reduction for deck structures of oil tankers reads 4 mm, with the reference to CSR. This value is the margin of the comparison considering actual corrosion wastages. In a current research project within the IACS harmonization project team on CSR corrosion addition, a value of 4 mm is also considered as acceptable [12].

Then the increase of deck stress due to the loss of HGSM was analysed and at the same time the reduction of the collapse strength of deck structure due to the negative effects of corrosion was determined. This simple method (see Figures from 5.5 to 5.16) shows the point in time when it is expected that the applied stress will exceed the strength of stiffened panels of the main deck. Classifications societies then suggest replacement of the corroded plating with a new one in order to avoid an unsafe zone for the aging ships. *This approach is for the first time proposed by Gua et al. [10] for unstiffened deck plates, while it is extended in the present thesis to the stiffened panels including the effect of uneven corrosion (grooving and pitting) and cracks (presented in Figures 5.17 to 5.20).* These calculations are based on methods and results developed in the 3. chapter of this thesis.

The vertical bending moment, as one of the most important criteria for longitudinal strength, must be controlled during the ship's service. However, such calculations are subjected to uncertainty regarding the unpredictability of the corrosion processes and wave loads. To account for uncertainties, the classification societies use partial safety factors. These factors are determined using probabilistic methods and practical experience from the past and their values can vary significantly. To demonstrate these large differences, in this thesis two "sets" of partial safety factors were used according to the rules of BV and CSR. Comparing the results, it was observed that in all three ships and their respective hull conditions (after 10, 15 and 20 years) HGUS is in accordance with the requirements of BV rules for the uniform corrosion, while the CSR results are considerably worse (presented in Figures 5.20 to 5.30). In calculation of HGUS, results obtained in the 4. chapter of the thesis are employed.

Finally, an improved method for estimating the fatigue strength of deck structure of oil tanker is shown. The employed fatigue calculation is similar to the CSR method. *The main*

difference from the CSR approach, where the constant wastage is used from the beginning to the end of the ship's life, is that the realistic corrosion degradation mode, developed in the 2. chapter, was used in the present study. The accumulated damage is calculated for each year of service individually, taking into account the actual stress of HG, determined based on the measured HGSM loss. The results of these calculations, for three ships, are shown in Figure 5.31, and Tables 5.1-5.3. The tables also show the results for a constant HGSM loss over the entire lifetime according to the fatigue requirements from CSR rules (25% of the maximum corrosion of particular hull elements) and also for longitudinal strength requirements (50% of the maximum corrosion of particular elements). The a.m. tables show that the calculated lifetime according to the measured corrosion wastage may give better insight into the hull girder fatigue behavior compared to the rule approach.

6. CONCLUSION AND GUIDELINES FOR FURTHER RESEARCH

The researches which are described in this thesis are aimed to improve the application of direct calculations in the planning of survey and repairs of ship's structure. Further research in this area can be recommended within two fields:

- Development and practical implementation of crack propagation methods to the ship's structure;
- Development and application of reliability and risk-based methods for maintenance of ship structures.

Crack propagation methods based on fracture mechanics are currently being developed. Benefit of using these methods is that small fatigue cracks that appear around the welds can be tolerated and analysed. The crack propagation methods have still not found appropriate place in the shipbuilding industry because of the inherent complexity of welded ship structures. Consequently, there are a number of uncertainties related to the determination of their load and capacity and also regarding the variability of the effects of corrosion. Especially important are the effects of various parameters that can affect determination of the stress intensity factor. A typical example is the uncertainty in calculation of the stress concentration factors in presence of the cracks. Regarding fatigue load of ship structures, the greatest difficulty is the unpredictability of random wave loading, which is a major factor in fatigue loading and crack propagation. The prediction of crack growth under conditions of random loading is a challenging and complex problem that is currently the subject of research. Improvement of the methods for the analysis of the crack propagation could have an extremely positive impact on the effectiveness of the method developed in this thesis.

Considering various uncertainties related to the determination of corrosion wastage, load, strength and fatigue resistance of ship structures, the application of reliability-based methods could be the appropriate methodology for these calculations. It is important to mention that the structural reliability methods could be applied not only to determine the safety index (or the probability of structural damage), but also for the sensitivity analysis with respect to relevant variables. In other words, the reliability-based methods can be used to determine which parameters strongly affect the fatigue damage, and surveyors in practice could pay more attention to them. In the future, research in this area could be recommended with a special consideration on the practical applicability of the reliability- and risk-based methods for planning inspection intervals and repairs.

KLJUČNE RIJEČI

- tanker za prijevoz nafte
- korozijska istrošenja
- zamorne pukotine
- inspekcijski pregledi
- ukrepljeni panel
- kolapsna čvrstoća
- nelinearna analiza metodom konačnih elemenata
- granična čvrstoća broskog trupa

KEY WORDS

- oil tanker
- corrosion wastage
- fatigue cracks
- hull structure survey
- stiffened panel
- collapse compressive strength
- non-linear finite element method
- hull girder ultimate strength

POPIS OZNAKA I KRATICA

| | |
|--------------|---|
| a | - duljina ploče |
| A_{eff} | - efektivna površina nakon izvijanja ukrepljenog panela palube |
| $A_{gl.reb}$ | - površina poprečnog presjeka brodskog trupa |
| b | - širina ploče |
| B | - širina broda |
| $C(t)$ | - učinak starenja (lokalno korozijsko istrošenje u vremenu t) |
| C | - konstanta jednadžbe $R(t)$ |
| C_1, C_2 | - koeficijenti koji uzimaju u obzir značajke korozijskog procesa |
| d_s | - sredina razreda izmjerenih podataka korozijskih istrošenja |
| D | - visina broda |
| DWT | - nosivost broda |
| E | - modul elastičnosti čelika |
| f_0 | - faktor koji uzima u obzir neoperativno vrijeme broda |
| $f(d_s)$ | - funkcija gustoće vjerojatnosti |
| $F(d_s)$ | - funkcija razdiobe vjerojatnosti |
| h_f | - širina prirubnice uzdužnjaka |
| h_w | - visina struka uzdužnjaka |
| $HGSM$ | - moment otpora glavnog rebra |
| I | - konstanta jednadžbe $R(t)$ |
| $I_{gl.reb}$ | -moment inercije poprečnog presjeka brodskog trupa |
| I_{red} | - reducirani moment tromosti poprečnog presjeka |
| K_2 | - koeficijent S-N krivulje za F-detalj |
| $\{K\}$ | - matrica krutosti |
| L_{pp} | - duljina broda između okomica |
| m | - oblik izvijanja neukrepljene ploče |
| M_{Ri} | - raspon momenata savijanja |
| M_U | - granični moment savijanja brodskog trupa |
| M_{wvhog} | - vertikalni moment savijanja u pregibu |
| M_{wvsag} | - vertikalni moment savijanja u progibu |
| N_L | - broj ciklusa u očekivanom vijeku broda |
| $N(ds)$ | - broj izmjerenih podataka o smanjenju debljine palubnih opločenja i uzdužnjaka |

| | |
|----------------|---|
| $R(t)$ | - učinak starenja (gubitak momenta otpora glavnog rebra u vremenu t) |
| R^2 | - koeficijent determinacije |
| $\{R\}$ | - vektor opterećenja |
| S_q | - raspon naprezanja na presjeku dva strukturalna elementa |
| S_{Ri} | - raspon naprezanja |
| SS_{er} | - suma kvadrata reziduuma |
| SS_{tot} | - ukupna suma kvadratnih odstupanja izmjerenih vrijednosti x_i od srednje izmjerene vrijednosti \bar{x} |
| t | - vrijeme |
| t_0 | - godina u kojoj HGSM gubitak počinje odstupati od stanja novog broda (vijek trajanja zaštitnog premaza) |
| t_f | - debljina pojasne trake uzdužnjaka |
| t_{pl} | - debljina ploče |
| t_r | - debljina korozijskog gubitka |
| t_w | - debljina struka uzdužnjaka |
| T | - životni vijek konstrukcije |
| T_c | - vrijeme trajanja zaštitnog premaza |
| $\{U\}$ | - vektor pomaka |
| w_{oc} | - maksimalna veličina gredno-štapne inicijalne deformacije |
| w_{opl} | - maksimalna vrijednost inicijalne deformacije ploče |
| w_{os} | - najveća vrijednost bočne inicijalne deformacije struka uzdužnjaka |
| \bar{x} | - srednja vrijednost |
| x_i | - izmjerene vrijednosti korozijskog istrošenja |
| y_i | - predviđene vrijednosti korozijskog istrošenja |
| $z_{dk-mean}$ | - vertikalna udaljenost između srednje visine palube i dna broda |
| $z_{nel.lin.}$ | - udaljenost ruba presjeka od neutralne linije |
| $z_{NA-mean}$ | - vertikalna udaljenost između neutralne osi reduciranog poprečnog presjeka |
| z_T | - udaljenost neutralne linije od osnovice |
| $Z_{gl.reb.}$ | - moment otpora poprečnog presjeka broskog trupa |
| Z_{red} | - reducirani moment otpora palube |
| α | - parametar oblika funkcije gustoće vjerojatnosti |

| | |
|------------------|---|
| α' | - konstanta jednadžbe $C(t)$ koja se može odrediti prema izmjerenim podacima o korozijskim istrošenjima |
| α_i | - proporcija stanja broda teret/balast tijekom života |
| β | - konstanta koja se može odrediti prema izmjerenim podacima o korozijskim istrošenjima |
| β_E | - koeficijent vitkosti ploče |
| γ_m | - parcijalni faktor sigurnosti prema pravilima BV za materijal |
| γ_R | - parcijalni faktor sigurnosti prema pravilima CSR za materijal i geometrijsku nesigurnost |
| γ_{R1} | - parcijalni faktor sigurnosti prema pravilima BV za izdržljivost |
| γ_S | - parcijalni faktor sigurnosti prema pravilima CSR za mirnu vodu |
| γ_{S1} | - parcijalni faktor sigurnosti prema pravilima BV za mirnu vodu |
| γ_W | - parcijalni faktor sigurnosti prema pravilima CSR za valove |
| γ_{W1} | - parcijalni faktor sigurnosti prema pravilima BV za valove |
| $\Gamma()$ | - gamma funkcija |
| ε | - deformacija |
| ε_U | - granična deformacija |
| Θ | - parametar skaliranja funkcije gustoće vjerojatnosti |
| κ | - zakrivljenost poprečnog presjeka broskog trupa |
| λ | - koeficijent vitkosti uzdužnjaka sa sunosivom širinom |
| ν | - Poissonov koeficijent |
| ξ | - parametar oblika Weibullove razdiobe |
| σ_U | - granična čvrstoća |
| σ_Y | - granica tečenja |
| v_i | - argument nekompletne gamma funkcije |
| ABS | - American Bureau of Shipping |
| BV | - Bureau Veritas |
| CSR | - Common Structural Rules |
| DnV | - Det Norske Veritas |
| ESP | - Enhanced survey programme |
| FEMAP/NX Nastran | - Računalni program za provjeru čvrstoće metodom konačnih elemenata |

| | |
|------------|--|
| HGSM | - Hull girder section modulus |
| HGUS | - Hull girder ultimate strength |
| HRB/CSR | - Hrvatski registar brodova (Croatian Register of Shipping) |
| IACS | - International association of classification societies |
| IMO | - International Maritime Organization |
| ISSC | - Međunarodni kongres za brodske i pomorske konstrukcije |
| IUMI | - International Union of Marine Insurance |
| MARS | - Računalni program za provjeru geometrijskih karakteristika poprečnog presjeka i granične čvrstoće broskog trupa BV-a |
| NMKE/NLFEM | - Nelinearna metoda konačnih elemenata/ Non-linear finite element method |
| PSC | - Nadzor državnih luka |
| PULS | - Računalni program za provjeru kolapsne čvrstoće ploča i ukrepljenih panela polu-analitičkom metodom DnV-a (Panel Ultimate Limit State) |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1.1 - Statistički podaci mjerenja debljina strukturnih elemenata glavne palube naftnih tankera [12]..... | 3 |
| Slika 2.1 - Grupirani razlozi ukupnih gubitaka za sve tipove brodova veće od 500 BRT (Izvor: International Union of Marine Insurance IUMI, [5])..... | 7 |
| Slika 2.2 - Ukupni gubici tankera i brodova za rasuti teret većih od 500 GT (Izvor: International Union of Marine Insurance IUMI, [5])..... | 8 |
| Slika 2.3 - Mehanizam opće korozije na unutarnjoj strani palubnog lima tankera za naftu [6]..... | 12 |
| Slika 2.4 - Mehanizam djelovanja korozije "pittinga" na palubnim limovima u području tankova tereta (nafte) [6]..... | 13 |
| Slika 2.5 - Naneseni zaštitni premaz (epoksi tip) u tankovima balasta naftnog tankera [31]..... | 19 |
| Slika 2.6 - Otkrivena zamorna pukotina magnetnim česticama na spoju koljena i uzdužnjaka dna [6], [26]. | 22 |
| Slika 2.7 - Shematski prikaz korozijskog procesa [18] | 23 |
| Slika 2.8 - Shematski prikaz modela korozijskog istrošenja različitih autora [10] | 26 |
| Slika 2.9 - Brod 1 u plovidbi | 26 |
| Slika 2.10 - Uznapredovala korozija potpalublja 20 godina starog tankera | 27 |
| Slika 2.11 - Glavno rebro tankera s jednostrukom oplatom | 29 |
| Slika 2.12 - Izmjerene debljine limova na poprečnom presjeku za Brod 1 nakon 20 godina..... | 29 |
| Slika 2.13 - Gubitak momenta otpora poprečnog presjeka za različite oštine korozije prema ABS-u | 31 |
| Slika 2.14 - Izmjereni i predviđeni gubitak momenta otpora poprečnog presjeka za različite brodove..... | 32 |
| Slika 2.15 - Razdioba opažanja aproksimirana Weibull-ovom distribucijom korozijskih istrošenja palubnih opločenja u tankovima tereta za Brod br. 2 u 15. godini | 35 |
| Slika 2.16 - Razdioba opažanja aproksimirana Weibull-ovom distribucijom korozijskih istrošenja palubnih opločenja u tankovima tereta za Brod br. 2 u 20. godini | 35 |
| Slika 2.17 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozijskog istrošenja ploča palube tankova tereta | 37 |
| Slika 2.18 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja ploča palube tankova tereta..... | 37 |
| Slika 2.19 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube tankova tereta | 38 |
| Slika 2.20 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube tankova tereta | 38 |
| Slika 2.21 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozijskog istrošenja ploča palube balastnih tankova..... | 39 |
| Slika 2.22 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja ploča palube balastnih tankova | 39 |
| Slika 2.23 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube balastnih tankova..... | 40 |
| Slika 2.24 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube balastnih tankova..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Slika 2.25 - Regresijska analiza za Brod 1 | 43 |
| Slika 2.26 - Regresijska analiza za Brod 2 | 43 |
| Slika 2.27 - Regresijska analiza za Brod 3 | 44 |
| Slika 2.28 - Regresijska analiza za sva tri broda u skladištima tereta (opločenja i uzdužnjaci)..... | 44 |
| Slika 2.29 - Regresijska analiza za sva tri broda u balastnim tankovima (opločenja i uzdužnjaci)..... | 45 |
| Slika 2.30 - Regresijska analiza za sva tri broda u balastnim tankovima i skladištima tereta (opločenja i uzdužnjaci) | 45 |
| Slika 3.1 - Krivulja naprezanje/deformacija čeličnih ploča pod tlačnim opterećenjem [18] | 48 |
| Slika 3.2 - Slobodno oslonjena ploča pod osnim opterećenjem [38] | 48 |
| Slika 3.3 - Globalni kolaps ukrepljenog panela [11]..... | 49 |
| Slika 3.4 - Gredno-štapno izvijanje ukrepljenog panela [11]..... | 50 |
| Slika 3.5 - Izvijanje struka uzdužnjaka [11]..... | 50 |
| Slika 3.6 - Torzijsko izvijanje uzdužnjaka [11]..... | 51 |
| Slika 3.7 - Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom putem gredno – štapnog izvijanja [1] | 52 |
| Slika 3.8 - PULS osnovni podaci | 53 |
| Slika 3.9 - Korišteni opseg modela ploče | 56 |
| Slika 3.10 - Korišteni opseg modela ukrepljenog panela palube pod jednoosnim opterećenjem s glavnim dimenzijama..... | 56 |
| Slika 3.11 - Model ukrepljenog panela s pravokutnim pločastim konačnim elementima | 57 |
| Slika 3.12 - Rubni uvjeti - ploča | 58 |
| Slika 3.13 - Shematski model za definiranje rubnih uvjeta | 59 |
| Slika 3.14 - Rubni uvjeti - ukrepljeni panel..... | 59 |
| Slika 3.15 - Inicijalne deformacije ploče | 60 |
| Slika 3.16 - Inicijalne deformacije T-profila | 62 |
| Slika 3.17 - Inicijalne deformacije ravnog profila | 62 |
| Slika 3.18 - Inicijalne deformacije L-profila | 63 |
| Slika 3.19 - Narinuto opterećenje-ploča | 63 |
| Slika 3.20 - Narinuto opterećenje-ukrepljeni panel | 64 |
| Slika 3.21 - Rezultirajuća sila-ploča | 64 |
| Slika 3.22 - Rezultirajuća sila-ukrepljeni panel | 65 |
| Slika 3.23 - Usporedba rezultata za graničnu čvrstoću panela palube tankera prema različitim metodama..... | 66 |
| Slika 3.24 - Usporedba metoda s obzirom na β | 68 |
| Slika 3.25 - Usporedba metoda s obzirom na λ | 68 |
| Slika 3.26 - Prikaz pukotine ploče s finijom mrežom konačnih elemenata..... | 69 |
| Slika 3.27 - Uvećani prikaz pukotine ploče s finijom mrežom konačnih elemenata..... | 70 |
| Slika 3.28 - Porast naprezanja kod ploče s pukotinom | 70 |
| Slika 3.29 - Kolaps ploče s pukotinom od 200 mm..... | 71 |
| Slika 3.30 - Kolaps ploče s pukotinom od 400 mm..... | 71 |
| Slika 3.31 - Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za ploču s pukotinom dužine 200 mm, 400 mm i neoštećenu ploču | 72 |
| Slika 3.32 - Prikaz pukotine uzdužnjaka s finijom mrežom konačnih elemenata | 73 |
| Slika 3.33 - Uvećani prikaz pukotine struka uzdužnjaka s finijom mrežom konačnih elemenata | 73 |
| Slika 3.34 - Kolaps panela s pukotinom duž cijele širine struka uzdužnjaka..... | 74 |
| Slika 3.35 - Kolaps panela s pukotinom duž pola širine struka uzdužnjaka..... | 74 |

| | |
|--|-----|
| Slika 3.36 - Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za ukrepljeni panel s pukotinom dužine kroz pola struka uzdužnjaka, cijeli struk uzdužnjaka, i neoštećeni panel..... | 75 |
| Slika 3.37 - Rupičasta korozija ploče, 5% površine | 75 |
| Slika 3.38 - Rupičasta korozija ploče, 10% površine | 76 |
| Slika 3.39 - Kolaps ploče s 5% rupičaste korozije | 76 |
| Slika 3.40 - Kolaps ploče s 10% rupičaste korozije | 77 |
| Slika 3.41 - Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za ploču s rupičastom korozijom koja obuhvaća 5% površine, 10% površine i neoštećenu ploču | 77 |
| Slika 3.42 - Žljebasta korozija u području zavara | 78 |
| Slika 3.43 - Žljebasta korozija u području zavara duž pola duljine struka uzdužnjaka..... | 79 |
| Slika 3.44 - Žljebasta korozija u području zavara duž cijele duljine struka uzdužnjaka..... | 79 |
| Slika 3.45 - Kolaps panela sa žljebastom korozijom duž pola duljine uzdužnjaka | 80 |
| Slika 3.46 - Kolaps panela sa žljebastom korozijom duž cijele duljine uzdužnjaka | 80 |
| Slika 3.47 - Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za ukrepljeni panel s korozijom u žlijebu zavarenog spoja dužine pola struka uzdužnjaka, cijelog struka uzdužnjaka, i neoštećeni panel..... | 81 |
| Slika 4.1 - Ovisnost momenta savijanja o zakrivljenosti trupa [1]..... | 83 |
| Slika 4.2 - Progib broda – pucanje trupa zbog izvijanja panela palube [1]..... | 84 |
| Slika 4.3 - Utjecaj fleksijske krutosti trupa na granični moment savijanja [1] | 86 |
| Slika 4.4 - Poprečni presjek na glavnom rebru Broda 2 modeliranog u programu <i>MARS</i> | 89 |
| Slika 4.5 - Ovisnost momenta savijanja M_U o zakrivljenosti k brodskog trupa za stanje trupa AS BUILT (novi brod) Brod 1 | 90 |
| Slika 4.6 - Ovisnost momenta savijanja M_U o zakrivljenosti poprečnog presjeka k brodskog trupa za stanje trupa AS BUILT (novi brod) Brod 2 i Brod 3 | 91 |
| Slika 4.7 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u ovisnosti o vremenu za Brod 1..... | 94 |
| Slika 4.8 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u ovisnosti o vremenu za Brod 2..... | 94 |
| Slika 4.9 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u ovisnosti o vremenu za Brod 3..... | 95 |
| Slika 4.10 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed pukotine ploče palube | 96 |
| Slika 4.11 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed pukotine palubnih uzdužnjaka | 97 |
| Slika 4.12 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed korozije u žlijebu zavarenog spoja | 97 |
| Slika 4.13 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed nejednolike korozije "pittinga" | 98 |
| Slika 5.1 - Korozijska mapa palubnih uzdužnjaka u tankovima tereta za Brod 1 | 100 |
| Slika 5.2 - Korozijska mapa palubnih uzdužnjaka u tankovima balasta za Brod 1 | 100 |
| Slika 5.3 - Korozijska mapa palubnih opločenja u tankovima tereta za Brod 1..... | 101 |
| Slika 5.4 - Korozijska mapa palubnih opločenja u tankovima balasta za Brod 1 | 101 |
| Slika 5.5 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube tankova tereta za Brod 1 | 103 |
| Slika 5.6 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube balastnih tankova za Brod 1..... | 103 |
| Slika 5.7 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube tankova tereta za Brod 1..... | 104 |
| Slika 5.8 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube balastnih tankova za Brod 1..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| Slika 5.9 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube tankova tereta za Brod 2 | 105 |
| Slika 5.10 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube balastnih tankova za Brod 2..... | 105 |
| Slika 5.11 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube tankova tereta za Brod 2..... | 106 |
| Slika 5.12 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube balastnih tankova za Brod 2..... | 106 |
| Slika 5.13 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube tankova tereta za Brod 3..... | 107 |
| Slika 5.14 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube balastnih tankova za Brod 3..... | 107 |
| Slika 5.15 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube tankova tereta za Brod 3..... | 108 |
| Slika 5.16 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube balastnih tankova za Brod 3..... | 108 |
| Slika 5.17 - Porast naprezanja/pad nosivosti panela palube sa i bez pukotine za Brod 1..... | 109 |
| Slika 5.18 - Porast naprezanja/pad nosivosti panela palube sa i bez pukotine za Brod 1..... | 110 |
| Slika 5.19 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube sa i bez rupičaste korozije za Brod 1 | 110 |
| Slika 5.20 - Porast naprezanja/pad nosivosti panela palube sa i bez žljebaste korozije za Brod 1 | 111 |
| Slika 5.21 - Usporedba prema BV graničnog momenta savijanja M_U i opterećenja u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 1 | 112 |
| Slika 5.22 - Usporedba prema BV graničnog momenta savijanja M_U i opterećenja u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 2 | 113 |
| Slika 5.23 - Usporedba prema BV graničnog momenta savijanja M_U i opterećenja u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 3 | 113 |
| Slika 5.24 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem pukotine ploče palube i usporedba s BV opterećenjem | 114 |
| Slika 5.25 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem pukotine palubnih uzdužnjaka i usporedba s BV opterećenjem | 114 |
| Slika 5.26 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem korozije u žlijebu zavarenog spoja "grooving" i usporedba s BV opterećenjem | 115 |
| Slika 5.27 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem nejednolike korozije "pitting" i usporedba s BV opterećenjem | 115 |
| Slika 5.28 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U prema CSR u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 1 | 116 |
| Slika 5.29 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U prema CSR u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 2 | 117 |
| Slika 5.30 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U prema CSR u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 3 | 117 |
| Slika 5.31 - Rezultati akumuliranog oštećenja dobiven proračunom S-N pristupa [49] | 121 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|-----|
| Tablica 2.1 - Primjer učestalosti pregleda balastnih tankova ovisno o stanju zaštitnog premaza | 20 |
| Tablica 2.2 - Glavne karakteristike tri analizirana naftna tankera s jednostrukom oplatom | 28 |
| Tablica 2.3 - Izmjereni $R(t)$ za tri broda | 30 |
| Tablica 2.4 - Parametri jednadžbe za oštrinu (stupnjeve) korozije prema ABS-u [9]. | 30 |
| Tablica 2.5 - Parametri jednadžbe (2.8) za modele korozije promatranih brodova sukladno mjerenjima nakon 10 i 15 godina službe..... | 32 |
| Tablica 2.6 - Geometrijske karakteristike ukrepljenih panela palube | 33 |
| Tablica 2.7 - Usporedba pretpostavljenih i izmjerenih istrošenja za Brod 1, mm | 41 |
| Tablica 2.8 - Usporedba pretpostavljenih i izmjerenih istrošenja za Brod 2, mm | 41 |
| Tablica 2.9 - Usporedba pretpostavljenih i izmjerenih istrošenja za Brod 3, mm | 41 |
| Tablica 3.1 - Usporedba NMKE, CSR & PULS za različite debljine i vrste materijala | 66 |
| Tablica 3.2 - Geometrijske karakteristike osam ukrepljenih panela i rezultati NMKE | 67 |
| Tablica 3.3 - Usporedba rezultata dobivenih na temelju NMKE, CSR & PULS za ukrepljene panele | 67 |
| Tablica 4.1 - Rezultati proračuna metodom jednog koraka za Brod 1 | 87 |
| Tablica 4.2 - Rezultati proračuna metodom jednog koraka za Brod 2 | 87 |
| Tablica 4.3 - Rezultati proračuna metodom jednog koraka za Brod 3 | 87 |
| Tablica 4.4 - Rezultati proračuna metodom PCA pomoću programa MARS za Brod 1 i sva četiri stanja trupa navedenog broda | 91 |
| Tablica 4.5 - Rezultati proračuna metodom PCA pomoću programa Mars za Brod 2 i sva četiri stanja trupa navedenog broda | 92 |
| Tablica 4.6 - Rezultati proračuna metodom PCA pomoću programa Mars za Brod 3 i sva četiri stanja trupa navedenog broda | 92 |
| Tablica 4.7 - Usporedbe graničnih momenata savijanja M_U dobivenih dvjema metodama za Brod 1 | 93 |
| Tablica 4.8 - Usporedbe graničnih momenata savijanja M_U dobivenih dvjema metodama za Brod 2 | 93 |
| Tablica 4.9 - Usporedbe graničnih momenata savijanja M_U dobivenih dvjema metodama za Brod 3 | 93 |
| Tablica 5.1 - Akumulirana oštećenja i zamorni životni vijek za različite stupnjeve korozijske istrošenosti Broda 1 | 121 |
| Tablica 5.2 - Akumulirana oštećenja i zamorni životni vijek za različite stupnjeve korozijske istrošenosti Broda 2 | 121 |
| Tablica 5.3 - Akumulirana oštećenja i zamorni životni vijek za različite stupnjeve korozijske istrošenosti Broda 3 | 122 |

1. UVOD

1.1. Opis problema

Brodске konstrukcije u službi često propadaju s vremenom zbog korozije, pukotina uslijed zamora materijala i mehaničkih oštećenja što dovodi do narušavanja sigurnosti broda i posade i povećanog rizika od ekološkog onečišćenja. U većini slučajeva potpunih gubitaka brodova zbog loma konstrukcije učinci propadanja konstrukcije zbog "zuba vremena" su prepoznati kao glavni uzročnici havarija. Noviji primjeri takvih gubitaka su potonuća tankera "Erika" i "Prestige". Takve pomorske nesreće dovode do neželjenog negativnog publiciteta za brodograđevnu industriju i uzrokuju goleme materijalne štete. S druge strane, održavanje i popravci konstrukcija čija je čvrstoća narušena zbog njihove starosti je kompleksna i skupa, te pronalaženje razumne ravnoteže između troškova održavanja i očuvanja zadovoljavajuće razine sigurnosti predstavlja izazov i zahtjeva primjenu i razvoj naprednih tehnologija i proračunskih postupaka.

Problem propadanja brodske konstrukcije s vremenom je prisutan i dobro poznat od samih početaka brodogradnje, a klasifikacijska društva su kroz njihova pravila za konstrukciju, gradnju i inspekciju trupa vodila računa da se rizik od velikih strukturnih oštećenja svede na razumnu mjeru. Sve donedavno su pravila za konstrukciju broskog trupa sadržavala tek *implicitno* marginu sigurnosti od propadanja trupa s vremenom, i to tako da su dopuštena naprezanja za novu konstrukciju bila smanjena zbog tog učinka, ali i drugih nesigurnosti prisutnih u procesu projektiranja. Posljednjih se godina, međutim, učinak korozije uključuje *eksplicitno*, i to na način da se debljine konstrukcijskih elemenata kakve će biti ugrađene u brod umanje za korozijski dodatak prije provođenja proračuna čvrstoće. Korozijski dodaci propisani od klasifikacijskih društava su se međusobno razlikovali, a tek su odnedavno donekle ujednačeni uvođenjem Usuglašanih pravila (CSR) udruge klasifikacijskih društava (IACS-a) za konstrukciju brodova za rasuti teret i naftnih tankera s dvostrukom oplatom [1]. Korozijski su dodaci dobiveni kao vrijednosti koje imaju 5% vjerojatnost premašivanja na osnovi statističkih podataka prikupljenih na velikom broju brodova u službi. Pri tome je uvedena bitna pretpostavka da je korozija jednolika te da ovisi o položaju elementa unutar broskog trupa.

Iz ovog izlaganja bi se dalo zaključiti da je takav pristup IACS-a na strani sigurnosti, tj. da će brodska konstrukcija, koja zadovoljava kriterije čvrstoće bez tako definiranog korozijskog dodatka, biti sigurna u čitavom vijeku trajanja. Takav bi zaključak, međutim, bio

vrlo ishitren, jer je ponašanje ostarjele brodske konstrukcije znatno složenije od pojednostavljenog pristupa koji se koristi u Usuglašenim pravilima. Tu se u prvom redu misli na pretpostavku o jednolikoj koroziji, budući da je stvarno istrošenje konstrukcijskih elemenata izrazito nehomogeno zbog efekata rupičaste korozije (pitting) i žlijebljenja (grooving). Postoje empirijski i teorijski dokazi da je čvrstoća nejednoliko istrošenih panela bitno slabija od panela kojima je debljina jednoliko reducirana zbog korozije.

Nadalje, uslijed zamora materijala u brodskim se konstrukcijama stvaraju pukotine, koje nije uvijek lako otkriti pri inspekcijskim pregledima trupa. Takve neotkrivene pukotine mogu znatno napredovati te tako ugroziti čvrstoću broskog trupa. Poznato je da su upravo dugačke zamorne pukotine često uzrok narušavanja integriteta i lomova brodske konstrukcije. Utjecaj pukotina na čvrstoću trupa se u Usuglašenim pravilima klasifikacijskih društava ne uzima u obzir kao mogući oblik oštećenja, iako je iz iznijetog razvidno da se brodske konstrukcije trebaju projektirati na način da budu sposobne podnijeti određene zamorne pukotine.

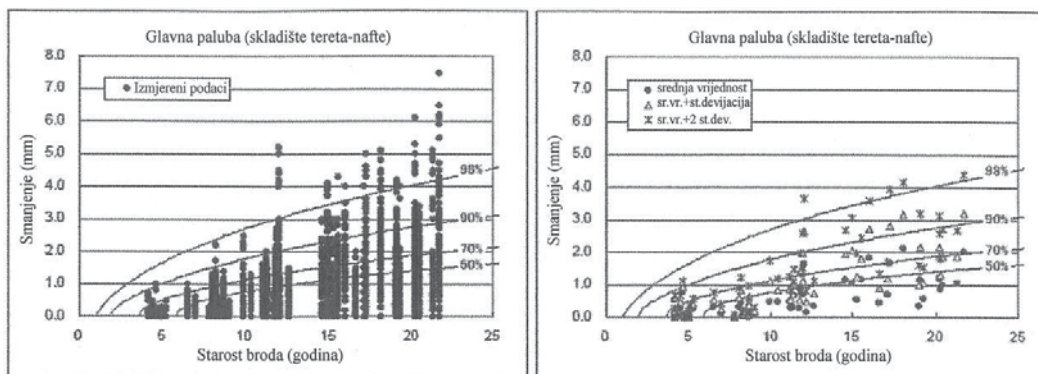
1.2. Hipoteza rada

Čvrstoća ostarjele brodske konstrukcije izložene degradirajućim utjecajima korozije i zamora materijala nije adekvatno obuhvaćena postojećim pravilima za gradnju i održavanje broskog trupa, koja razmatraju samo istrošenje od jednolike korozije i to na način da se korozijski dodatak odbije od debljina novih limova. Štoviše, postoje indikacije da je korelacija između starosti broda i oslabljenja trupa znatno snažnija nego što bi se to dalo zaključiti iz analize čvrstoće uzimajući u obzir samo jednoliki korozijski dodatak. Takav pojednostavljeni pristup čvrstoći brodske konstrukcije nije konzistentan sa suvremenim direktnim proračunskim metodama koje podrazumijevaju što je moguće realističniji opis opterećenja, odziva i čvrstoće za različite oblike oštećenja konstrukcije. Zato je potrebno provesti daljnja istraživanja kako bi se unaprijedile spoznaje o nosivosti i izdržljivosti ostarjelih brodskih konstrukcija. To je moguće ukoliko se uzmu u obzir dodatne informacije i upotrijebe složeniji proračunski postupci od onih koji se danas uobičajeno koriste u brodogradnji.

1.3. Pregled literature

Utjecaj starenja na čvrstoću brodske konstrukcije znanstveno utemeljeno se analizira tek unatrag 10-ak godina. Pionirski radovi na tom području objavljeni su od Guedes Soaresa i Garbatova (1998) [2], Akpana (2002) [3] i Paika (2003) [4]. O važnosti teme svjedoči uspostavljanje posebnog odbora "Procjena stanja ostarjelih brodova" u okviru 16. i 17. Međunarodnog kongresa za brodske i pomorske konstrukcije (ISSC 2006, 2009) [5], [6], gdje je prikazan pregled dosadašnjih istraživanja na tom području. Od recentnih radova na ovu temu valja spomenuti još i radove Garbatova i Guedes Soaresa (2008) [7], Chowdhurya (2008) [8], Wanga (2008) [9], te Guoa i dr. (2008) [10], koji svi imaju u fokusu utjecaje korozije i zamora materijala na uzdužnu čvrstoću trupa. Pregled oblika oštećenja koji su zabilježeni na starim brodovima s komentarima i smjernicama za istraživanja dao je Boon (2008). Hughes i Paik [11] u novoj knjizi obrađuju probleme kolapsa ukrepljenih panela brodske strukture pod djelovanjem tlačnih opterećenja u ravnini panela kod globalnog savijanja broda na valovima, kao i utjecaj neravnomjernih korozijskih istrošenja na smanjenje granične čvrstoće broskog trupa.

Također, grupa za čvrstoću broskog trupa (HPT04-Harmonization Project Team on Corrosion Additions) unutar Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava (IACS-a), razmatra na svojim radnim sastancima, npr. u Houstonu u listopadu 2011 [12], upotrebu različitih korozijskih dodataka za određene dijelove brodske strukture. Analize im se temelje na statističkim podacima rezultata mjerenja (600 000 izmjerenih točaka) velikog broja brodova s periodičnih pregleda naftnih tankera i brodova za rasuti teret u eksploataciji starosti od 5 godina do 30 godina, kako je prikazano na slici 1.1. Rezultati se koriste za unapređenje postojećih pravila za projektiranje i gradnju brodova.



Slika 1.1 - Statistički podaci mjerenja debljina strukturnih elemenata glavne palube naftnih tankera [12].

Klasifikacijska društva trenutno razvijaju programske pakete za praćenje brodova u službi koji imaju integrirane module za proračun korodirane konstrukcije metodom konačnih elemenata uzimajući u obzir izvještaje s inspekcijskih pregleda. Pregled programskih sustava i njihovih osnovnih značajki, koje trenutno nude klasifikacijska društva za uporabu brodovlasnicima, nalazi se u izvještaju ISSC-a [5].

Na Zavodu za brodogradnju i pomorsku tehniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje, problemi čvrstoće ostarjelih brodova su analizirani u okviru radova Parunov i dr. (2007, 2008, 2010 i 2011) [13], [14], [15], [16], te Žiha i Pekas (2001) [17].

Iz pregleda literature se može zaključiti da je problematika koja se obraduje u disertaciji trenutno predmet istraživanja više timova znanstvenika u svijetu, kao i da su se istraživanja intenzivirala zadnjih godina. Smjer u kojem se kreću današnja istraživanja opisuje zaključak specijaliziranog odbora ISSC-a, u kojem se navodi da "brojni problemi iz različitih područja još uvijek traže rasvjetljavanje za učinkovitu primjenu suvremenih metoda rizika za određivanje optimalne strategije inspekcije, održavanja i popravaka ostarjelih brodskih konstrukcija". Disertacija stoga predstavlja doprinos unutar citiranog zaključka i to doprinoseći boljem razumijevanju različitih oblika oštećenja ostarjelih brodova.

1.4. Metodologija istraživanja i struktura doktorskog rada

Istraživanje je podijeljeno na sljedeće cjeline, koje u radu imaju posebne metodologije istraživanja:

1. Analiza korozije brodova iz baze Hrvatskog registra brodova (HRB),
2. Čvrstoća ukrepljenih panela oslabljenih djelovanjem korozije i zamornih pukotina,
3. Inkorporacija rezultata čvrstoće ukrepljenih panela u proračun granične čvrstoće trupa,
4. Primjena rezultata za unapređenje strategije inspekcije, održavanja i popravaka brodova u službi.

Ad 1) su analizirana tri naftna tankera iz baze HRB i to po jedan brod iz svake od kategorija: sa slabom korozijom, s umjerenom razinom korozije i s relativno jakom korozijom. Poprečni presjeci u teretnom prostoru su modelirani programom MARS klasifikacijskog društva Bureau Veritas. Zatim je u modele unošena odgovarajuća korozija u različitim fazama vijeka trajanja broda, te je određen gubitak momenta otpora poprečnog presjeka u području glavnog rebra. Dobivenim rezultatima je prilagođen teorijski nelinearni

korozijski model s ciljem predviđanja progresije korozije u dugom vremenskom razdoblju. Analizirana je također korozija s lokalnim djelovanjem na područje palubne konstrukcije. Na temelju izmjerenih istrošenja opločenja i uzdužnih nosača u balastnim tankovima i skladištima tereta (nafte) određeni su odvojeno srednji i ekstremni korozijski modeli u funkciji vremena do projektno određenog životnog vijeka broda od 25 godina. Analiza, dobiveni rezultati i zaključci vezani za korozijska istrošenja su opisani u 2. poglavlju rada.

Ad 2) je analizirano programom PULS klasifikacijskog društva DnV, poluanalitičkom metodom iz usuglašanih pravila CSR i nelinearnom analizom metodom konačnih elemenata programom FEMAP/NX NASTRAN. Rupičasta korozija, korozija u žlijebu zavara i zamorne pukotine su modelirani na prikladan način. Analizirana su palubna opločenja i ukrepljeni paneli brodova odabranih pod 1). Analiza kolapsa panela je opisana u 3. poglavlju disertacije.

Ad 3) se koristila metoda progresivnog kolapsa (PCA) i metoda jednog koraka (HULS-1) za određivanje granične čvrstoće trupa. Koristili su se modeli izrađeni u programima MARS i PULS iz prijašnjih poglavlja 1) i 2). Rezultati i zaključci dobiveni pod 2) su inkorporirani u proceduru proračuna granične čvrstoće, što je obrađeno u 4. poglavlju rada.

Ad 4) su predložena unapređenja postupaka koje koriste klasifikacijska društva u svojim procedurama obnavljanja i produljenja klase starih brodova. U procedure su se na odgovarajući način uklopili rezultati istraživanja opisana Ad)1-3 te ujedno služe i kao ogledni primjeri. Rezultati istraživanja također su pokazali razliku između procjene čvrstoće ukrepljenih panela i granične čvrstoće trupa korištenjem realnijeg opisa korozije i zamornih pukotina u odnosu na uobičajeni pristup kada se debljina limova jednoliko smanji za propisani iznos korozijskog dodatka. Sukladno tome smanjenje uzdužne čvrstoće trupa u većem je iznosu nego što se moglo pretpostaviti kod uobičajenih postupaka. Na kraju ovog poglavlja obradili su se problemi akumuliranih zamornih oštećenja pomoću S-N pristupa. Pristup proračunu zamora koji je korišten u ovom radu je sličan pristupu korištenom u Usuglašenim pravilima CSR. Osnovna razlika je u tome što su se u radu koristila stvarna korozijska istrošenja trupa koja su opisana u 2. poglavlju disertacije, dok se u CSR koristi korozijsko istrošenje za koje je pretpostavljeno da je konstantno tijekom čitavog životnog vijeka broda. Prijedlog unapređenja postojećih postupaka praćenja konstrukcije brodova u službi je prikazan u 5. poglavlju rada.

U 6., zaključnom poglavlju disertacije su sažeti rezultati istraživanja, iznesen je pregled rezultata provedenih istraživanja, kao i ostvarenog znanstvenog doprinosa. Također su dane smjernice za daljnja istraživanja na području rada.

2. DUGOROČNO PREDVIĐANJE KOROZIJSKIH ISTROŠENJA BRODSKE KONSTRUKCIJE

Za vrijeme dugogodišnje službe, mnoge složene konstrukcije kao što su brodovi, pučinski objekti, mostovi, industrijska postrojenja, itd. pod utjecajem su propadanja uzrokovanog starenjem [18]. Konstrukcije oštećene učincima starenja mogu prouzrokovati značajne financijske gubitke o čemu postoje mnogi dokumentirani slučajevi. Brodovi i pučinski objekti uslijed nedovoljnog održavanja i praćenja trpe značajna oštećenja, pa čak i potonuća. Potonuća, odnosno totalni gubici uzrokuju često i ekološku katastrofu s nemjerljivim posljedicama za društvo u cjelini. Zbog svega navedenog razvijaju se napredne tehnologije i metode, koje omogućavaju kvalitetno praćenje starenjem oštećenih konstrukcija.

Jedan od najvažnijih faktora za sigurnost i cjelovitost konstrukcije izložene djelovanju morske vode je korozija. Korozija je u brodogradnji bitan problem, koji posebno dolazi do izražaja u slučajevima kada korodirajuća površina nije odgovarajuće zaštićena kao što je npr. slučaj u tankovima tereta. U takvim je tankovima relativna vlažnost uglavnom visoka, a sam pregled i pristup površinama unutar tankova je otežan. Periodičnim pregledima brodova mogu se donekle otkriti nastali problemi i zatim izvršiti mjerenja debljina elemenata konstrukcije trupa. Na temelju rezultata mjerenja može se pravodobno procijeniti potreba za izmjenama limova i profila tankova tereta.

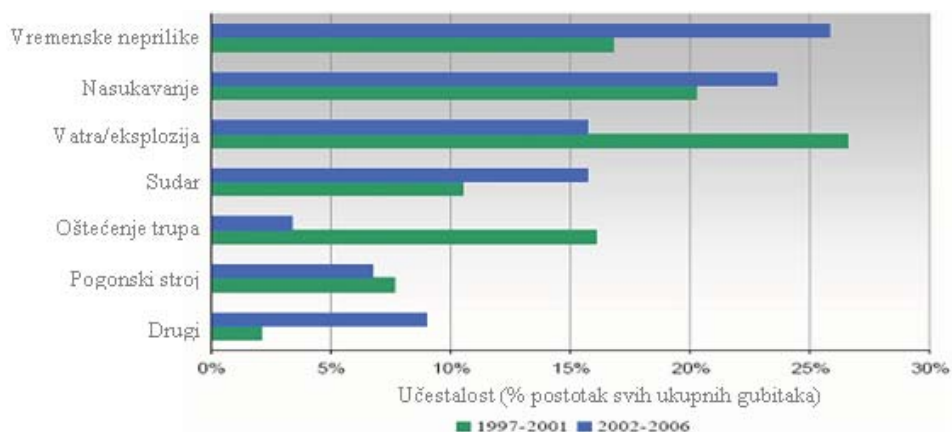
Da bi se općenito kvalitetno rukovalo brodovima u službi, brodovlasnici razvijaju programe održavanja u kojima se određuje strategija kontrole i preventivnih mjerenja korozijskih istrošenja. Jedna od važnih činjenica potvrđena u praksi, koje bi se trebalo pridržavati kod planiranja pregleda i rukovođenja brodom, jest da uznapredovala korozija ima značajne direktne i indirektno financijske učinke, jer se brod mora na određeni vremenski period povući iz službe, te dokovati i pripremiti za izmjenu čelika. Dva pristupa, shodno anti-korozijskim mjerama, primjenjuju se već u fazi projektiranja brodske konstrukcije: 1) unaprijed pridodani korozijski dodatak za novogradnje i 2) dugoročno predviđanje korozije i određivanje vremenskog intervala za izmjenu jako korodiranih elemenata trupa. Prvonavedeni pristup se temelji na određivanju korozijskog dodatka za pojedine elemente, koji bi bio dovoljan da se izbjegne potreba za izmjenom limova. Iskustveno gledano, kod tankera se u prošlosti malo vodilo računa o strukturi unutar tankova tereta i balastnih tankova, budući su unutarnje površine teže dostupne od vanjskih, koje se mogu jednostavno zaštititi premazima. Drugi pristup razvija se u novije vrijeme prvenstveno zahvaljujući teorijskim

nelinearnim korozijskim modelima, ali primjena takvog način predviđanja smanjenja debljina elemenata trupa u vremenu je još uvijek na razini znanstvenih istraživanja.

Ovo poglavlje počinje općenitim prikazom problema propadanja brodske konstrukcije uslijed starenja. Zatim je dan pregled tipova korozije brodskih konstrukcija, metoda za zaštitu od korozije te metoda za mjerenje korozijskih gubitaka. Osnovni cilj poglavlja jest razvoj metoda za predviđanje napredovanja korozije kroz godine. U fokusu je korozija palubne konstrukcije naftnih tankera, budući da palubna konstrukcija ima presudan utjecaj na globalnu čvrstoću trupa promatranog kao grednog nosača. Na osnovi mjerenja korozije nakon 10 i 15 godina službe, dugoročnim modelom za predviđanje propagacije korozije određeno je korozijsko istrošenje nakon 20 godina. Spomenuti pristup, koji je opisan u *potpoglavljju 2.5*, po prvi je put primijenjen u ovom radu i predstavlja izvoran doprinos brodograđevnoj teoriji i praksi na tom području [15], [16].

2.1. Propadanje brodske konstrukcije uslijed starenja

Oštećenja brodske konstrukcije su poznata kao jedan od glavnih faktora koji doprinose pomorskim nesrećama [5]. U skladu sa zadnjim studijama u vremenskom razdoblju od 1997. do 2006., slika 2.1, među prvih pet uzroka potonuća brodova većih od 500 BRT spada oštećenje konstrukcije broskog trupa. Starenje se može shvatiti kao jedan od važnijih čimbenika koji doprinose oštećenju broskog trupa. Statističke analize ukupnih gubitaka naftnih tankera i brodova za prijevoz rasutog tereta, vidi sliku 2.2, otkrivaju da trend povećanja gubitaka brodova raste s povećanjem starosti broda, odnosno godinama rada u službi broda.

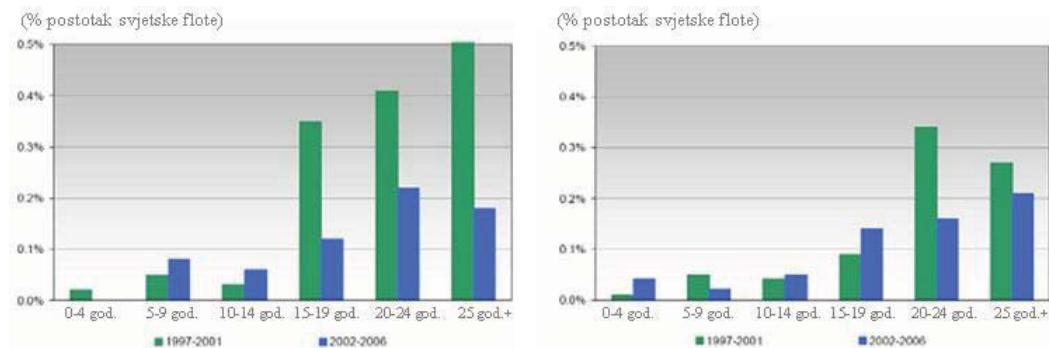


Slika 2.1 - Grupirani razlozi ukupnih gubitaka za sve tipove brodova veće od 500 BRT (Izvor: International Union of Marine Insurance IUMI, [5])

Statističke analize potonuća iskorištene su za dokazivanje utjecaja starenja na konstrukciju brodskog trupa. Međutim, tumačenje samih rezultata statističkih analiza je složeno i treba jako pažljivo pristupiti njihovoj interpretaciji. Na primjer, slika 2.2 pokazuje da je trend povećanja gubitka brodova zbog faktora starenja, smanjen u dobnoj skupini od 25+ godina. Taj statistički podatak je neočekivan i dosta težak za objasniti.

Statistički podaci iz različitih izvora ne pokazuju uvijek iste trendove. Neki izvori npr. prošli odbor ISSC (Međunarodni kongres za brodske i pomorske konstrukcije) je naveo da je prosječna dob kod koje dolazi do gubitka broda tek nešto viša od prosječne starosti postojeće flote. Iz navedenog bi se moglo zaključiti da učinak starenja na brodove nije dominantan, što je ipak suprotno trendu prikazanom na slici 2.2.

Važni izvor informacija o učinku starenja je zadržavanje radi inspekcije brodova od strane nadzora državnih luka (PSC). Brod može biti zadržan u luci ako nije u skladu sa PSC zahtjevima. Međutim, neusklađenosti sa zahtjevima PSC-a uobičajeno nisu ozbiljne, odnosno nisu uvijek potencijalni razlog zbog čega bi moglo doći do gubitka broda i često ne znače jako loše stanje trupa broda, ali mogu označavati manje pogodno stanje trupa. Stopa zadržavanja od strane PSC-a je viša kod starijih brodova, što je dokaz negativnih posljedica starenja brodske konstrukcije.



Slika 2.2 - Ukupni gubici tankera i brodova za rasuti teret većih od 500 GT
(Izvor: International Union of Marine Insurance IUMI, [5])

Starenje brodske konstrukcije se može definirati kao progresivno propadanje strukture za vrijeme normalne službe uz utjecaj okolišnih čimbenika. Propadanje brodske strukture možemo općenito svrstati u sljedeće oblike: oštećenje zaštitnog premaza, korozija, stvaranje pukotina, deformacije, i promjene u svojstvima materijala. Navedeni oblici starenja dovode do smanjene nosivosti konstrukcije, odnosno gubitka kapaciteta za podnošenje opterećenja

brodske konstrukcije. U narednim se poglavljima obrađuje utjecaj korozije kao dominantnog načina propadanja brodske konstrukcije kroz godine službe.

2.2. Općenito o koroziji na brodovima

Korozija na brodovima predstavlja oštećenje metala u uvjetima morskog okoliša, te se smatra glavnim uzročnikom oštećenja brodova u službi [6], [19], [20]. Brodograđevni inženjeri trebaju poznavati mehanizme korozijskih procesa i metode za raspoznavanje korozijskih oblika razaranja (oštećenja) ili smanjenje djelovanja korozije radi učinkovitijeg sprječavanja velikih troškova u eksploataciji uslijed zaustavljanja broda, te troškova izmjene strukture i dijelova opreme u remontnim brodogradilištima.

Korozijski procesi se načelno mogu podijeliti prema mehanizmu procesa korozije i obzirom na pojavni oblik korozije. Prema mehanizmu procesa korozije metala, razlikujemo kemijsku i elektrokemijsku koroziju. Obzirom na pojavni oblik korozija može biti opća, lokalna, selektivna, interkristalna i galvanska.

2.2.1. Mehanizmi korozijskih procesa

Korozijski procesi u suštini su spontani procesi između metala i komponenata okoline pri čemu metali prelaze u termodinamički stabilnije stanje. Čelik je materijal koji se najviše upotrebljava kod izrade brodskih konstrukcija, a korozija smanjuje uporabnu vrijednost čelika, skraćuje mu vijek trajanja, poskupljuje njegovo održavanje i uzrokuje zastoje u radu [21].

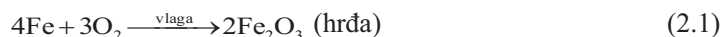
2.2.1.1. Kemijska korozija

Kemijska korozija metala se odvija u ne-elektrolitima, tj. u medijima koji ne provede električnu struju, pri čemu nastaju spojevi metala s nemetalnim elementima (najčešće oksidi i sulfidi u čvrstom stanju), a na brodu se pojavljuje u brodskim motornim postrojenjima, gdje je neelektrolit vrući plin produkta izgaranja goriva.

2.2.1.2. Elektrokemijska korozija

Korozija (*lat. corrodere-nagrizati*) uništava konstrukcijski materijal pod djelovanjem elektrokemijskih reakcija. Kod čelika ovu pojavu nazivamo hrđanje, a možemo je definirati

kao oksidaciju željeza pod djelovanjem vlage i raznih nečistoća [20], [21], [22]. Nečistoće, odnosno agensi koji ubrzavaju hrđanje su zagađena atmosfera, morska sol, područje zagađeno sumporom, itd. Općenito vrijedi:



ili detaljnije opisno kao elektrokemijska reakcija prijenosa mase (kemijska reakcija) potpomognuta prolaskom električne struje (protok elektrona i iona). Anodna reakcija je transformacija atoma željeza u ion željeza gubeći u procesu dva elektrona.

Anodna reakcija:



atom željeza \rightarrow ion željeza + 2 elektrona

Anodna reakcija se može dogoditi jedino ako ima raspoloživih elektronskih akceptora (primaća), koji služe za povezivanje s elektronima otpuštenih od atoma željeza. Voda ili morska voda sadrže otpušteni atmosferski kisik. Kisik se elektrokemijski dijeli na ion hidroksida u katodnoj reakciji.

Katodna reakcija:



kisik + voda + 4 elektrona \rightarrow hidroksidni ion

Heterogene značajke metalne površine dopuštaju za neka područja da vrše anodnu reakciju, a za neka druga da vrše katodnu reakciju. Shodno navedenom cijela metalna površina je podijeljena u veliki broj anoda i katoda. Napredovanje korozijskog procesa kroz reakciju protoka elektrona od anode do katode posljedično prouzrokuje trošenje metala koji postepeno postaje sve tanji. Zajedno, ion željeza i hidroksidni ion se šire u otopini i kao takvi reagiraju u procesu stvaranja željeznog hidroksida, kako je pokazano u reakciji (2.4):



ion željeza + kisik \rightarrow željezni hidroksid

Željezni hidroksid u prisustvu nesmetanog dotoka kisika npr. iz zraka oksidira u poznatu crvenkasto smeđu hrđu.



željezni hidroksid + kisik \rightarrow hrđa

Elektrokemijske reakcije (2.2), (2.3), (2.4) i (2.5) su temeljne reakcije koje se događaju kada se željezo, odnosno čelik pretvara u hrđu, ili preciznije u željezni oksid. U

praksi proces korozije nije tako jednostavan, npr. korozija čelika u morskoj vodi ili u zagađenoj atmosferi rezultira u mnogo bržoj i kompliciranoj reakciji.

Ukratko se može zaključiti:

- Veći dio elektrokemijske reakcije hrđanja će prestati, ako nestane jedan od elemenata u reakciji,
- Vlaga i zrak (kisik) su potrebni u reakciji. Čelik neće hrđati na suhom zraku bez prisustva vlage,
- U prisustvu vlage i zraka reakcija nikad ne dolazi u ravnotežu, što znači da je hrđanje kontinuiran proces sve dok ne nestane čelika. Čelik nije stabilan kao ni većina metala pod utjecajem okoliša već ima tendenciju vraćanja u prvobitni oblik željezne rudače.

Jedan od najvažnijih mehanizama korozijskog trošenja je propadanje palube tankera u tankovima tereta, koji se može svrstati u elektrokemijsku koroziju.

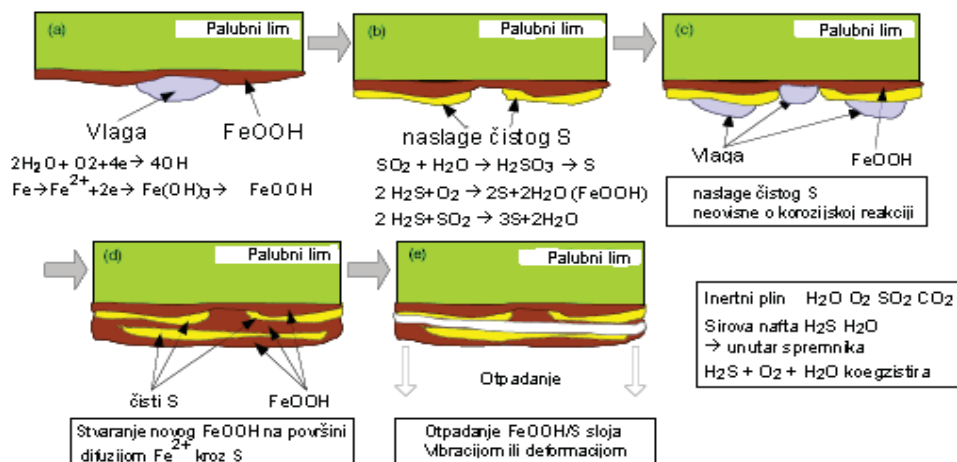
2.2.2. Pojavni oblici korozije

Ovisno o vrsti materijala, utjecaju okoline i vrsti opterećenja kojima je materijal podvrgnut, moguće su, geometrijski gledano, tj. prema obliku razaranja materijala *opća*, *lokalna*, *selektivna*, *interkristalna*, *galvanska* i *napetosna* korozija [5], [6], [18], [21].

2.2.2.1. Opća korozija

Zahvaća cijelu površinu materijala jednakom brzinom. Smanjenje debljine je koncentrirano na anodnoj strani reakcije i postepeno dolazi do trošenja materijala. Kod ove vrste korozije dolazi do kontinuirane izmjene iona između anode i katode tako da je s vremenom smanjenje debljine materijala na cijeloj površini podjednako. Teoretski, ovaj tip korozije je najjednostavnije za predvidjeti, jer se može odrediti brzina korozije. Npr. ako korozija ima brzinu djelovanja od 0.1 mm/godini, trebati će 20 godina da vrijednost istrošenja bude 2 mm. Mikroskopski gledano ni ravnomjerna korozija posvuda ne napreduje podjednako, pa obično uzrokuje ohrapavljenje glatke metalne površine.

Opća korozija u spremnicima tereta tankera za prijevoz nafte nastaje uz pomoć elemenata (H_2O , O_2 , CO_2 , H_2S i SO_2) koji čine kemijski sastav sirove nafte kao i inertnog plina koji se koristi u ovim spremnicima, a prikazana je na slici 2.3 [6].



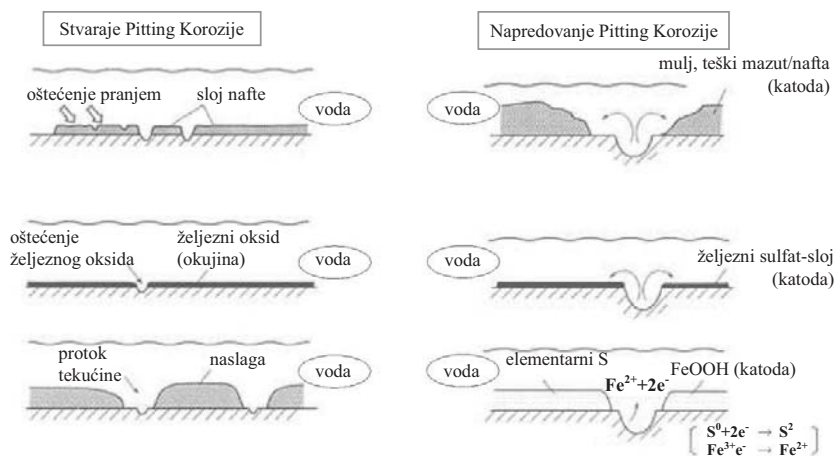
Slika 2.3 - Mehanizam opće korozije na unutarnjoj strani palubnog lima tankera za naftu [6]

Zbog razlike dnevnih i noćnih temperatura na oplati palube unutar spremnika tereta stvara se kondenzat vlage. Uslijed kemijske reakcije na željeznom oksidu taloži se čisti sumpor i na taj način je stvoren korodirani sloj sumpora i željeznog oksida, na koji se opet stvara kondenzat i ponovno se taloži sumpor. Na kraju procesa je nastala višeslojna površina čistog sumpora i željeznog oksida. Zbog vibracija i deformacija, navedeni korozivni produkti otpadaju s lima i na taj način je "omogućeno" trošenje palubnog opločenja [6].

2.2.2.2. Lokalna korozija

Lokalna korozija je pojava koju karakterizira lokalno djelovanje i prodire u dubinu materijala u usporedbi s okolnom površinom. Razlikujemo pjegastu i točkastu (jamičasta, pitting - engl. pojava jamica) lokalnu koroziju. Pjegasta zahvaća veće dijelove površine, dok je jamičasta usko lokalizirana na žarišta kružnog presjeka, i zbog velike dubine prodiranja vrlo opasna [5]. Često je promjer jamice kod pittinga relativno malen, ali prodire duboko u materijal. Pitting je također prekriven s hrđom i kao takav teško je uočljiv, a može se pojaviti na mjestima gdje su ostvareni odgovarajući lokalizirani uvjeti. Tipična forma pittinga nastaje u području malene anodne površine, koja je pod djelovanjem velike katodne površine. Na brodovima se to može dogoditi na izoliranim područjima oštećenja zaštitnog premaza. Korozija se pojavljuje na izloženom (čistom) metalu, a zaštićeno područje metala s premazom postaje katodna površina. Kod tankera s jednostrukom oplatom bilo je problema s pojavom pittinga u grijanim tankovima tereta (nafte), koji su ujedno služili kao balastni tankovi. Kod

današnjih brodova s dvostrukom oplatom to nije slučaj jer su uvedeni segregacijski tankovi balasta pa tankovi tereta služe isključivo za skladištenje nafte [6].



Slika 2.4 - Mehanizam djelovanja korozije "pittinga" na palubnim limovima u području tankova tereta (nafte) [6]

Na slici 2.4 prikazan je mehanizam nastajanja pittinga na palubnim limovima unutar tankova tereta (nafte). Pitting nastaje iz oštećenja zaštitne obloge. Obloga se može sastojati i od sloja nafte, željeznog-oksida ili korozijskih produkata (hrđa). Početna oštećenja mogu biti uzrokovana protokom nafte ili pranjem morskom vodom, itd. Ovakav tip oštećenja sličan je stvaranju pittinga kod puknuća zaštitnog premaza. U dosadašnjim istraživanjima uočeno je da korozija u tankovima (skladištima) tereta ima češće oblik opće korozije nego pittinga u slučaju kada tankovi nisu zaštićeni premazom. Pojava pittinga je češća kod tankova zaštićenih premazom. Također, uočeno je da se oblik rupica pittinga kod brodova za rasuti teret razlikuje od onih kod naftnih tankera, što uzrokuje razlika u okolišnim uvjetima, odnosno u čimbenicima korozijskog procesa.

2.2.2.3. Interkristalna korozija

Razara materijal na granicama zrna i šireći se u dubinu ostaje na površini često nevidljiva. To je najopasniji oblik korozije, jer ubrzano smanjuje čvrstoću i žilavost materijala, a u konačnici dovodi do loma i raspada materijala u zrna. Najčešće zahvaća Cr-Ni čelike tj. legure na bazi nikla i aluminijske.

2.2.2.4. Galvanska korozija

Pojavljuje se kod kontakta dva metala različitih potencijala u elektrolitu (npr. morska voda) [21]. Korozijsko istrošenje se događa na anodi, odnosno na osnovnom metalu s povećanim negativnim potencijalom dok plemeniti metal s pozitivnim potencijalom biva sačuvan. Katoda je na strani koja sudjeluje u reakciji s kisikom. Pokretačka sila galvanske korozije je razlika u potencijalu između dva metala. Brzina djelovanja korozije jača s povećanjem razlike u potencijalu. Nehrdajući čelik povišene čvrstoće je npr. plemenitiji od običnog mekog brodograđevnog čelika pa u spoju (kontaktu) obični čelik je anoda koja značajno korodira.

2.2.2.5. Napetosna korozija

Nastupa kada je metal istovremeno izložen djelovanju agresivnog medija i vlačnog naprezanja. Može nastati u okolini zavarenih spojeva gdje je povišena razina zaostalih naprezanja ili u već formiranim pukotinama pa napreduju okomito na smjer vlačnog naprezanja i širi se interkristalno.

2.2.3. Korozija palubne konstrukcije naftnih tankera

Zbog svoje presudne uloge u uzdužnoj čvrstoći broda, palubna konstrukcija naftnih tankera je u fokusu istraživanja u ovom radu. Sa stanovišta korozijskih istrošenja, palubna konstrukcija ima određene specifičnosti. U ovisnosti o lokaciji na kojoj se nalazi na brodu, unutarnja strana palubne konstrukcije može biti pod utjecajem sirove nafte i inertnih plinova (tankovi tereta) ili pod utjecajem morske vode (balastni tankovi). Vanjska strana palubne konstrukcije je u oba slučaja pod utjecajem atmosfere. U narednim poglavljima se obrađuju problemi specifični za koroziju palubne konstrukcije naftnih tankera. Opisani su mehanizmi korozivnog procesa i najvažniji parametri koji utječu na intenzitet korozije.

2.2.3.1. Korozija palubne konstrukcije u tankovima tereta

U tankovima tereta faktori koji izazivaju koroziju su kemijski spojevi: ugljični dioksid, sumporovodik, organske kiseline i elementarni sumpor [19], [23], [24]. Dodatni čimbenici koji uzrokuju koroziju su povećana temperatura i tlak u tanku.

Korozija, koja je rezultat djelovanja sumporovodika (H_2S) uobičajeno se označava kao kisela korozija. H_2S je jako topljiv u vodi i stvara slabu kiselinu koja može dovesti do pojave točkaste, odnosno pitting korozije čelika i drugih legura, dijelom zbog kiselosti i djelomično zbog formiranog filma sulfida koji se sastoji od sulfid iona (HS^- i S^{2-}) i tvori katodnu reakciju za većinu legura.

Korozija se također događa zbog prisutnosti vode s otopljenim ugljičnim dioksidom. Takva se reakcija obično naziva slatka korozija. Aktivnosti unutar tanka tereta i korozija usko su povezane. S obzirom da nafta i teška ulja tvore zaštitni film ulja na radnom području oplata tanka, korozija je uglavnom ograničena na gornji prsten tanka, tj. na donju stranu palubne strukture i dno tanka. Međutim, ako postoje djelomična područja oplata tanka bez zaštitnog sloja ulja, ti dijelovi će korodirati. To je vrlo slično nanošenju zaštitnih premaza i problemima uslijed grešaka u procesu premazivanja. Općenito, izolacijski otpor zaštitnog sloja premaza slabi kod apsorpcije vode. Isto tako, pod utjecajem vlage slabi otpor zaštitnog sloja ulja u tanku tereta.

Na vrhu tanka nalaze se odušnici, odnosno odušne cijevi, pa se u tom području zbog promjene temperature kondenzira vlaga. Takav kondenzat lako upija kisele plinove nafte iz tanka, zbog čega je vrh tanka pod utjecajem vrlo agresivne korozije.

Neka novija istraživanja [9], [10] usmjerena su prema stvaranju baze podataka s trendovima korozijskih istrošenja naftnih tankera, gdje je između ostalog obuhvaćen i taložni otpad. Mjerenja istrošenja kategorizirana su sukladno području promatranog elementa unutar strukture trupa i upotrebi prostora (tanka) u kojem se element nalazi na samom brodu. Područja u trupu su podijeljena na opločenja: palube, bokova, dna i pregrada zajedno s uzdužnjacima, i to odvojeno struk i pojas nosača. U skladu s CSR pravilima za naftne tankere istraživanje korozijskih istrošenja su usmjerena na dva brodska prostora: tankove tereta i balasta. Slično je rađeno i u drugim istraživanjima koja statistički obrađuju stopu rasta korozije tankera [18].

2.2.3.2. Korozija palubne konstrukcije u balastnim tankovima

Korozija balastnih tankova je uvjetovana nizom faktora, među kojima su najvažniji: temperatura, brzina strujanja tekućine, pH vrijednost, te koncentracija otopljenog kisika i soli u balastnoj vodi, odnosno salinitet morske vode [19], [24].

Salinitet

Koncentracija soli u vodi otvorenog mora, daleko od obale, je pod utjecajem topljenja leda, slatkovodnih rijeka i područja visokih isparavanja. Međutim, salinitet je izuzetno konstantan i rijetko je izvan područja od 33 do 38 promila (3.4%). Prosječna vrijednost koncentracije NaCl u moru otvorenog oceana iznosi 35 promila. (Slanost morske vode obično se izražava kao S ‰, što označava težinu u gramima suhe soli sadržane u 1000 grama morske vode). U praksi se koncentracija soli u morskoj vodi često izražava u smislu sadržaja klorida tj., kloridnosti mora. Kloridnost mora se kreće u rasponu od 18 do 20.

Na temelju istraživanja prikazanih u [19], [24], dokazano je da salinitet nema veliki utjecaj kod korozijskih istrošenja unutar tankova, a smanjenjem saliniteta na minimalnu vrijednost kao posljedicu nema otklanjanje korozijskog procesa.

Temperatura

Temperatura na površini morske vode oceana varira s obzirom na njezinu geografsku širinu, a raspon joj je od oko -2°C na polovima do 35°C na ekvatoru. U tropima su godišnje varijacije temperatura manje od onih u umjerenim zonama gdje varijacije iznose oko 10 °C. U otvorenim sustavima, kao što je more, gdje postoji mogućnost da otopljeni kisik ispari, brzina korozije se povećava s temperaturom do 80°C, a zatim pada na vrlo nisku vrijednost u vrelištu. Razlog opadanju djelovanja korozije iznad temperature od 80°C je zbog smanjena topljivosti kisika u vodi pri višim temperaturama. U zatvorenom sustavu kao što je tank, kisik ne može ispariti i brzina napredovanja korozije raste s povećanjem temperature. Ako se koncentracija otopljenog kisika održava na konstantnoj razini, korozijska stopa nisko-ugljičnog čelika u morskoj vodi otprilike će se udvostručiti za svakih 30°C porasta temperature [21]. Za vrijeme jedne serije ispitivanja provedenih u moru na različitim temperaturama, korozijska stopa ugljičnog čelika pri temperaturi od 25°C gotovo je dvostruko veća nego na 10°C.

Otopljeni kisik

Koncentracija otopljenog kisika nije samo ovisna o temperaturi, kako se to dosad smatralo, već na nju utječe i brzina cirkuliranja vode, vremenski period koji morska voda provede u otvorenoj atmosferi, te biološka aktivnost. Fotosinteza u biljkama koje rastu u površinskim slojevima mora može izazvati značajan porast udjela kisika u vodi, dok opet aktivnosti nekih bakterija mogu smanjiti kisik na nulu.

pH morske vode

pH vrijednost je mjera kiselosti i lužnatosti na skali od 1 do 14, a vrijednost pH od 7 je neutralna. U neutralnoj morskoj vodi vrijednost pH je 7.5, što znači da su hidrogen ioni (kiselina) i hidroksid ioni (lužina) skoro u ravnoteži. Međutim, ukoliko pod djelovanjem spojeva sumpora morska voda postane kisela i vrijednost pH se približi jedinici tada ima puno više iona hidrogena u otopini, što uzrokuje katodnu reakciju i povećava brzinu korozije. To je slučaj u tankovima tereta kod prijevoza nafte koja sadrži sumpor i koks. Kod lužnatih tekućina i pH vrijednosti blizu 14 čelik teže korodira. Mnogi blisteri (mjehuri), koji se pojave na čeličnoj premazom zaštićenoj površini u balastnim tankovima su puni tekućine s viskom pH vrijednošću. Kad se odstrani vrh blistera može se primijetiti da je čelik sjajne boje na površini i neoštećen korozivskim djelovanjem.

Brzina strujanja tekućine

U prostorima gdje je povećan dotok kisika, veća je i brzina djelovanja korozije. Područje sa značajnim strujanjem morske vode, kao što je blizina cijevi usisa mora u balastnim tankovima, korodirati će brže zbog dotoka kisika. Također, stjenke tankova balasta nakon ispumpavanja balasta ili stjenke tankova tereta nakon pranja morskom vodom prekrivene su tankim slojem vlage i njihova površina korodira brže nego kod uronjenih površina. Shodno rasporedu zona na brodu najjače djelovanje korozije je na vanjskoj oplati u području vodne linije kod zapljuskivanja valova (*engl. splash zone*), kao i krov tankova ispod glavne palube ili pokrova dvodna, gdje je zrak ostao zarobljen. Smanjivanje debljine metala je u tim slučajevima dvostruko brža nego kod trajno uronjenih površina. Odnos brzine morske vode i brzine korozije je proporcionalan i u prosjeku vrijedi da će se dvostrukim povećanjem brzine morske vode isto toliko ubrzati korozija.

2.2.3.3. Korozija palubne konstrukcije s vanjske strane (atmosferska korozija)

Atmosferska je korozija prvenstveno uvjetovana koncentracijom vlage i kisika u zraku, ali i zagađenosti zraka spojevima sumpora (hidrogen sulfida- H_2S) i natrijevih klorida ($NaCl$) [19], [23]. Vrijeme izloženosti utjecaju vlage (relativna vlažnost) je kritična varijabla koja određuje trajanje elektrokemijskog procesa. Korozija premazom nezaštićene površine čelika započinje s djelovanjem kod relativne vlažnosti zraka veće od 50-70%. Na brzinu djelovanja korozije dominantno utječe otapanje kisika u vodi i dalje djelovanje istog na čeličnu površinu. Temperatura također utječe na relativnu vlažnost zraka, temperaturu rosišta

i vrijeme trajanja vlažnosti na površini palube, a samim time i na dinamiku korozijskog procesa.

2.3. Metode sprječavanja korozije

Brod kao složen i skup proizvod svoju funkciju mora obavljati tijekom životnog vijeka od nekoliko desetljeća, u uvjetima koji su s korozijskog stajališta iznimno nepovoljni. Korozijska oštećenja mogu prouzrokovati velike probleme na brodskoj konstrukciji, a s vremenom i kolaps konstrukcije, što osim materijalne štete može uzrokovati ljudske žrtve i ekološke probleme. Tehničko ispravno i pravodobno izvedena antikorozivna zaštita znatno utječe na produljenje životnog vijeka broda [25]. Najraširenija tehnologija zaštite broskog trupa od korozije je zaštita premazima, ali u obzir dolaze i primjenjuju se i druge metode. U brodogradnji se najčešće koriste zaštitni premazi iz grupe organskih prevlaka, dok je udio primjene svih ostalih tipova prevlaka bitno manji. Ovisno o dijelu konstrukcije koji se štiti, premazi imaju i druge namjene osim zaštitne (protuobraštajni, protuklizni, protupožarni itd.). Kod izvođenja zaštite od iznimne je važnosti odgovarajuće pripremiti podlogu, korektno nanositi premaz, te osigurati dobre radne uvjete (osvjetljenje, dostupnost površine, ventilacija) uz odgovarajuću mikroklimu (temperatura relativna, vlažnost i sl). Zaštitni sustav se sastoji od temeljnog i pokrivnog premaza. Karakteristike temeljnog premaza su: prijanjanje na osnovni metal, antikorozijsko djelovanje i dobro slaganje s pokrivnim premazom. Pokrivni premaz mora biti korozijski stabilan, otporan na djelovanje ultravioletnog svjetla, elastičan, tvrd, nepropustan, a mora zadovoljavati i estetske zahtjeve. Antikorozivno djelovanje sloja boje zasniva se na izolaciji metala od okoline tj. atmosferskih utjecaja.

Uz zaštitu premazima važna je u brodogradnji i katodna zaštita, koja se zasniva na procesu galvanske korozije. Postupak se temelji na privođenju elektrona kovini, bilo iz negativnoga pola istosmjerne struje (*narinuta struja*) bilo iz ne-plemenitije kovine (*žrtvovana anoda*), sve dok potencijal objekta ne padne ispod zaštitne vrijednosti jednake ravnotežnom potencijalu anode korozijskoga članka, čime nestaje afinitet za koroziju, tj. kovina postaje imuna. Za zaštitu čeličnih konstrukcija koriste se anode od Zn, Mg i Al i njihovih kovina. Vijek trajanja anoda trebao bi biti najmanje desetak godina.



Slika 2.5 - Naneseni zaštitni premaz (epoksi tip) u tankovima balasta naftnog tankera [31]

2.4. Pregledi, otkrivanje i mjerenje korozije u brodograđevnoj praksi

Graditi brodsku konstrukciju s takvim marginama sigurnosti, da brod nema potrebe za odlaskom na remont, odnosno popravak za vrijeme njegovog vijeka trajanja, nije ekonomično i teško je ostvarivo za tipove brodova koji su za sada potrebni tržištu. Visoka kvaliteta pregleda i kontrola napredovanja korozije može biti garancija pouzdanosti brodske konstrukcije, koja će periodično biti podvrgnuta popravcima. Osnovna svrha svih klasifikacijskih pregleda je osiguravanje cjelovitosti strukture trupa, ne samo tijekom specijalnih pregleda, već i tijekom svih godina koje će brod provesti u službi [5], [6], [26], [27], [28]. Godišnji pregledi kao i međupregledi imaju za cilj otkrivanje korozije ili pojave pukotina zbog zamora materijala kao i eventualnih mehaničkih oštećenja. Opseg posebnih pregleda se povećava kako brodovi s godinama postaju sve stariji, a pregledi su zahtjevniji za određene tipove brodova kao što su tankeri i brodovi za rasuti teret.

2.5. Vrste pregleda broskog trupa

Pojačani program pregleda – ESP (ENHANCED SURVEY PROGRAMME)

ESP program je razvijen na temelju analize brodske konstrukcije, uvažavajući iskustva s korozijom i pojavom pukotina, a s ciljem kako bi se postigla vrlo transparentna i specifična procedura i time izbjegle "praznine" koje bi dovele do nekvalitetnog praćenja stanja broskog trupa, što bi za posljedicu imalo brodove lošijeg standarda [6]. Pregled klase broda je prije bio jedina temeljita ocjena stanja trupa, dok je danas temeljni element sigurnosti taj da su brodovlasnici napravili odgovarajući sustav održavanja gdje se sva oštećenja prijavljuju za klasu kakao bi se odredila kritična područja.

Bit ESP programa je u tome da se stvarno stanje brodske konstrukcije može dobiti samo detaljnim pregledom i opsežnim mjerenjima debljina, imajući na umu da se proces

trošenja konstrukcije događa vremenski sporo. S toga je danas stanovište da je bolje rjeđe provesti temeljiti pregled nego raditi češće površne preglede brodske konstrukcije [27]. ESP program je temeljen na dva osnovna kriterija: stanju zaštitnog premaza površine i području zahvaćenosti korozijom neke površine.

Tablica 2.1 - Primjer učestalosti pregleda balastnih tankova ovisno o stanju zaštitnog premaza

| GODINE | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Dobro | <i>S</i> | | | <i>I</i> | | | | | <i>I</i> | | <i>S</i> | | | <i>I</i> | | <i>S</i> |
| Srednje ili loše | <i>S</i> | <i>A</i> | <i>A</i> | <i>I</i> | <i>A</i> | <i>S</i> | <i>A</i> | <i>A</i> | <i>I</i> | <i>A</i> | <i>S</i> | <i>A</i> | <i>A</i> | <i>I</i> | <i>A</i> | <i>S</i> |

Napomena: *S*_specijalni pregled; *I*_međupregled; *A*_godišnji pregled.

Godišnji pregled (Annual survey) se vrši svake godine da bi se uvjerilo da je opće stanje broskog trupa održavano za zadovoljavajućoj razini i uobičajeno traje jedan do dva dana [27]. Što je brod stariji to se zahtjeva da se skladišta tereta podvrgnu opsežnijem godišnjem cjelokupnom pregledu kao i detaljnijem pregledu. Kao dodatni dio pregleda može se zahtijevati cjelokupni i detaljni pregled za balastne tankove zbog lošeg stanja zaštitnih prevlaka ili uznapredovale korozije u odnosu na prethodni pregled. Pregled sadržava vizualni pregled vanjskih dostupnih dijelova trupa. Unutarnji pregled trupa se zahtjeva samo u slučaju oštećenja, i to uz pomoć metoda bez razaranja (NDT).

Međupregled (Intermediate survey) se vrši na polovici petogodišnjeg ciklusa, a zamjenjuje drugi ili treći *godišnji pregled specijalnog* (obnovnog) pregleda i proširuje ukupni pregled i detaljni pregled u odnosu na *godišnji pregled*, uključujući mjerenja debljina u teretnim skladištima i balastnim tankovima u koje se isključivo krca morska voda. Ovaj pregled obuhvaća mjerenje debljina svih sumnjivih područja koja su zahvaćena korozijom ili jako oštećena. Područja u balastnim tankovima koja su u prošlom specijalnom pregledu određena kao sumnjiva, sada se podvrgavaju proširenom ukupnom pregledu i pregledu izbliza ovisno o starosti broda – što je brod stariji veći je opseg pregleda [27].

Obnovni (specijalni) pregled – Pregled obnove klase (Class renewal survey) se vrši svakih pet godina, odnosno mora se obaviti u vremenskom periodu od pet godina, a kako bi se utvrdilo da je cjelovitost konstrukcije na zadovoljavajućoj razini shodno zahtjevima klasifikacijskih društava i da će ostati u dobrom stanju sljedećih pet godina, uz pretpostavku pravilnog održavanja i periodičkog pregledavanja prema predviđenim datumima pregleda. Za

vrijeme pregleda obnove klase brod ide na suho dokovanje i od brodovlasnika se zahtjeva da u tom vremenskom periodu povuče brod iz službe. Obnovnim pregledom se također radi detaljni pregled s provjeravanjem debljina i njegov cilj je određivanje lomova, izvijanja i pojave uznapredovale korozije i ostalih tipova oštećenja konstrukcije [27], [28]. Svi tankovi tereta i ostali prostori su tada podvrgnuti pregledu kako bi se u vremenskom periodu od jednog do dva tjedna koliko traje pregled obnove klase izvršio *ukupni pregled* (Overall survey) i *detaljni pregled* (Close up survey) brodske strukture.

2.5.1. Otkrivanje oštećenja i metode mjerenja

Otkrivanje i mjerenja korozije

Vizualni pregled se uglavnom oslanja na iskustvo i vještinu inspektora, a u stvari je prvi način u procjeni zahvaćenosti brodske konstrukcije korozijom. Kako bi se olakšao vizualni pregled preporuča se primjena svjetlijih zaštitnih premaza [6], [26], [27], [28].

Vizualni detaljni pregled je definiran pravilima IACS-a (*International Association of Classification Societies*), kao pregled gdje detalje konstrukcijskih elemenata inspektor može vizualno pregledati izbliza, odnosno oni su mu "na dohvat ruke". Pravila zahtijevaju vizualni pregled kritičnih područja ovisno o tipu broda i koliko je brod star, ali cijela konstrukcija se ne može detaljno pregledati zbog otežanog pristupa u nekim dijelovima broda. Opće stanje oštećenja uslijed korozije određuje inspektor registra koji obavlja pregled [6].

U novije vrijeme korozija na brodovima se mjeri *ultrazvučnim senzorima*. Najveći nedostatak temeljitog mjerenja debljina, točku po točku, jest u tome da je za ovakav pregled brodske konstrukcije potrebno puno vremena, a isto tako pričvršćivanje senzora za mjerenje iziskuje dosta pripreme (oštećuje se boja) [27]. Također, problem kod ovih metoda može biti i kvalitetna priprema same površine koja se mjeri ako je ona dobrim dijelom zahvaćena hrđom, i čak ako se hrđa ukloni, dovodi se u pitanje preciznost samog mjerenja zbog neravnih površina.

Isto tako, važno je koji parametri su mjerodavni za ocjenu stanja korozije; prosječna debljina, minimalna debljina, dubina najveće rupe (pittinga), itd. Klasifikacijska društva obično zahtijevaju prosječnu debljinu, maksimalnu dubinu rupa nastalih uslijed korozije i gustoću tih rupa. Osim vizualne i ultrazvučne metode, rjeđe se koriste druge metode mjerenja debljina.

Otkrivanje i mjerenje pukotina uslijed zamora

Pojava pukotina predstavlja lokalni problem i za to je potrebna detaljna provjera konstrukcije. Kako su brodski konstrukcijski detalji uglavnom tipični, moguća je pojava pukotina na geometrijski sličnim detaljima. Pukotine se najbolje otkrivaju vizualnim pregledima, s kojima se utvrđuje tip pukotine i procjenjuje se da li pukotina može napredovati, tj. povećavati se. Test s bojom i test s magnetskim česticama se također mogu koristiti za vizualnu inspekciju dajući nam otprilike duljinu pukotine, ali ne i njezinu dubinu [6], [26].



Slika 2.6 - Otkrivena zamorna pukotina magnetnim česticama na spoju koljena i uzdužnjaka dna [6], [26].

Otkrivanje i mjerenje mehaničkog oštećenja

Za ovakvu vrstu oštećenja nemamo nikakve posebne metode za otkrivanje i mjerenje koja bi zahtijevala pravila. Zbog toga samo vizualni ili vizualni detaljni pregled omogućava i određuje koliko je oštećenje. Ipak potrebno je voditi računa o mehaničkim oštećenjima usljed kojih može doći do promjene svojstava materijala brodske konstrukcije, a ponekad i do promjene krutosti npr. ukrepljenog panela [6], [26].

2.6. Statističko modeliranje korozije

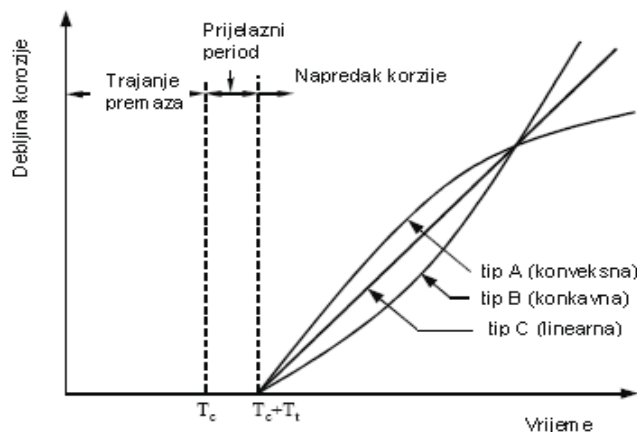
Karakteristike korozije na brodskoj strukturi ovisne su o utjecaju mnogih različitih faktora, kao npr.: vrsti zaštitnog premaza i katodnoj zaštiti, vlažnosti zraka, vrsti tereta, strujanju tekućine, otopljenom kisiku, temperaturi, salinitetu, itd. [5], [6], [18], [24]. Stoga se korozijsko istrošenje za različite strukturne elemente određuje i prognozira ovisno o tipu elementa i njegovoj lokaciji i to za različite tipove broda i različite teretne prostore, odnosno tankove. Korozijski je proces potrebno matematički modelirati u vremenu kako bi se moglo

predvidjeti korozijsko istrošenje broskog trupa nakon dugog niza godina. Na taj se način pokušavaju ublažiti učinci korozije još u fazi osnivanja konstrukcije i gradnje broda što je od iznimne važnosti za sigurnost konstrukcije u daljnjoj eksploataciji. Prognoze korozijskog ponašanja trupa su tako od interesa kako klasifikacijskim društvima tako i brodovlasniku i brodogradilištu.

Budući da još uvijek nije moguće u laboratoriju (komora morske vode) simulirati stvarne uvjete korozijskog procesa, koji se događaju kod brodova u eksploataciji, obrada podataka iz izvještaja o mjerenju debljina i na temelju takvih podataka stvaranje matematičkih modela, jedini je mogući način opisivanja stvarnog stanja.

Na slici 2.7 prikazan je tipični matematički model korozijskog procesa [18] brodskih konstrukcija u vremenu za površine sa zaštitnim premazom. Korozijski proces je u ovom vremenskom modelu kategoriziran u tri faze i to:

- a) trajanje zaštitnog premaza,
- b) prijelazno razdoblje do pojave vidljive korozije,
- c) napredak već nastale korozije.



Slika 2.7 - Shematski prikaz korozijskog procesa [18]

Vrlo važan parametar pri analizi napredovanja korozije je vrijeme trajanja zaštitnog premaza (faza a). Ako zaštitni premaz naglo počne propadati, dolazi do ranog stvaranja i napredovanja korozije, a samim time i do smanjivanja dimenzije strukturnih elemenata, odnosno gubitka nosivosti brodske konstrukcije.

Trajanje zaštitnog premaza ovisi o nizu čimbenika, u prvom redu o vrsti zaštitnog premaza, postupcima nanošenja premaza na površinu, kao i pripremi same površine na koju se premaz nanosi i naravno odgovarajućeg održavanja zaštitnog premaza. Životni vijek zaštitnog

premaza razmatra se kao slučajna varijabla koja se može opisati normalnom ili logaritamsko – normalnom razdiobom vjerojatnosti [9], [18]. U praksi, trajanje zaštitnog premaza iznosi 5 do 10 godina.

Nakon što premaz izgubi efekt zaštite površine, potrebno je neko vrijeme između gubitka zaštite površine i stvaranja korozije na dovoljno velikoj površini, gdje se korozija može mjeriti. Ovo trajanje prijelaznog perioda predstavlja fazu b na slici 2.7.

Krivuljama tipa A, B i C na slici 2.7 je prikazana faza c, tj. faza napredovanja korozijskog procesa.

Konveksna krivulja *tipa A* pokazuje da se napredak korozije, odnosno gradijent krivulje, povećava na početku, a kako krivulja ide prema kraju, gradijent se smanjuje. Ovaj tip korozijskog napredovanja je karakterističan za elemente koji su stalno uronjeni u morsku vodu, jer napredovanje korozije može biti usporeno s već nastalim slojevima hrđe.

Konkavna krivulja *tipa B* predstavlja slučaj kad se veličina korozije sve više širi kako korozija napreduje s vremenom, tj. gradijent korozije je veći na kraju krivulje nego na njezinom početku. Ovaj tip korozijskog napredovanja je karakterističan za one elemente koji su izvrgnuti promjenljivim uvjetima uranjanja u morskoj vodi, posebno kod dinamički opterećenih konstrukcija gdje savijanje elemenata konstrukcije kontinuirano izlaže dodatnu nezaštićenu površinu na djelovanje korozije.

Linearna krivulja *tipa C* je karakteristična za slučajeve kada se slojevi hrđe kontinuirao uklanjaju zbog abrazivnog djelovanja ili manjih površinskih napetosti. Tipična je za donje dijelove teretnog prostora gdje se prevoze agresivni mediji.

Matematički se korozijski proces prikazan na slici 2.7 može opisati jednadžbom [4], [18]:

$$t_r = C_1(T - T_c - T_i)^{C_2}, \text{ gdje su} \quad (2.6)$$

t_r - debljina korozijskog gubitka,

T_c - vrijeme trajanja zaštitnog premaza,

T - životni vijek konstrukcije,

C_1, C_2 - koeficijenti koji uzimaju u obzir značajke korozijskog procesa.

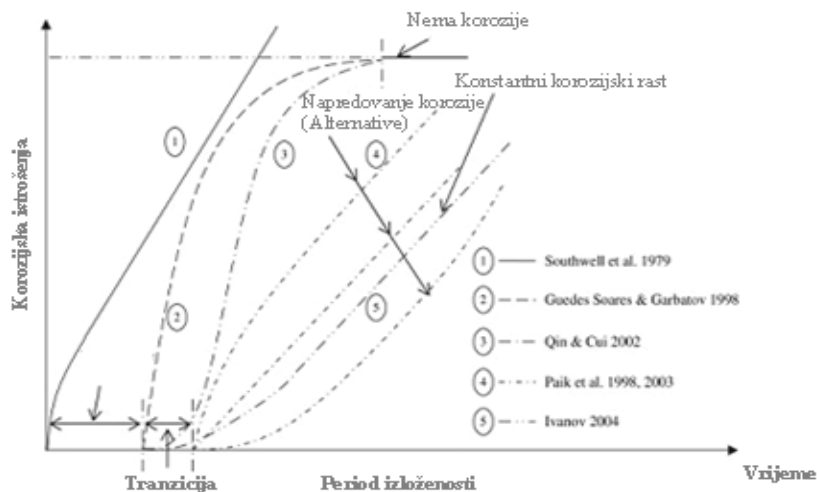
Druga važna značajka korozijskog procesa je statistička razdioba istrošenja u određenom vremenskom trenutku. Poznavanje te razdiobe je važno za određivanje prosječnog istrošenja i ekstremnih istrošenja koja se događaju s malom vjerojatnošću premašivanja. Tako npr. usuglašena pravila za gradnju tankera CSR navode da standardni korozijski odbici koje

propisuju odgovaraju vjerojatnosti premašenja od 5%, tj. 95% istrošenja u 25 godina su manji od tih propisanih vrijednosti.

Prema [18], [4] gubici na debljinama uslijed korozije se za brodove stare desetak godina mogu opisati normalnom distribucijom vjerojatnosti, dok se za brodove stare 20 i više godina gubici na debljinama približno dobro mogu opisati logaritamsko – normalnom ili Weibullovom distribucijom vjerojatnosti. Ova činjenica je temeljena na velikom broju mjerenja provedenih na različitim tipovima brodova u službi s različitim životnim vijekom. Provedena mjerenja su razvrstana u pojedine grupe [18], [4] ovisno o strukturnim elementima koji se promatraju (limovi, uzdužnjaci, okviri), kao i o mjestu na kojem se element nalazi (npr. paluba, dvodno, dvobok itd.), korozijskoj okolini (misli se na medij koji se nalazi u teretnom prostoru ili morskoj vodi ako je riječ o balastnim tankovima).

Na slici 2.8 sažeto su prikazani uobičajeni korozijski modeli predloženi od strane različitih autora. Model 1 (Southwell) pretpostavlja konstantnu brzinu korozijskog istrošenja i linearan odnos između smanjenja debljina limova i vremena. Početna, gore spomenuta, linearna formulacija kasnije prerasta u nelinearne modele, koji su do danas u upotrebi kod predviđanja dugoročnog istrošenja u vremenu [7], [10]. Inače, kod svih prikazanih modela osim kod Southwell-a uzeto je u obzir djelovanje zaštitnog sistema protiv korozije, a vrijeme trajanja zaštitnog premaza kod svih modela je pretpostavljeno istom vrijednošću. Modeli 2 (Guedes Soares & Garbatov) [32] i 3 (Qin & Cui) [33] imaju najbrži korozijski rast na početku i odmah nakon prestanka djelovanja zaštitnog premaza krivulje modela propagiraju velikom brzinom. Zanimljivo je da napredovanje korozije za model 2 i 3 prestaje, odnosno brzina propagacije postaje nula u istom trenutku. Kod modela 2 korozijski rast je podijeljen u tri različite faze. U prvoj fazi se pretpostavlja da nema korozije zbog djelovanja zaštitnog premaza, a nakon oštećenja zaštitnog premaza kreće druga faza, odnosno počinje korozijski rast i smanjenje debljina limova kroz prijelazno razdoblje. U trećoj fazi dolazi do prestanka korozijskog procesa, jer je korodirani materijal (hrđa) ostaje na površini i štiti unutrašnjost lima od direktnog kontakta s čimbenicima korozije (voda, kisik, itd.) iz okoline. Iako se model 2 koristio od strane mnogih autora, isti nema teorijsku potvrdu u znanosti o koroziji. Modelom 3 se pretpostavlja da zaštitni premaz propada postepeno, npr. prvo dolazi do rupičaste korozije (pittinga) koja uzrokuje prve znakove korozije, a kasnijoj fazi gradijent korozijskog rasta teži nuli. U modelu 4 (Paik, isto kao i slika 2.7) druga faza, koja predstavlja vrijeme između prestanka djelovanja zaštitnog premaza i rasta korozije, slijedi logaritamsko–normalnu razdiobu vjerojatnosti. U trećoj fazi modela 4 konkavna, konveksna ili linearna krivulja mogu predstavljati krivulju istrošenja. Model 5 (Ivanov) pretpostavlja da druga

prijelazna faza ima postepeno ubrzanje korozijskih procesa nakon oštećenja zaštitnog premaza, a rast korozije dostiže svoj maksimum u zadnjoj fazi.



Slika 2.8 - Shematski prikaz modela koruzijskog istrošenja različitih autora [10]

2.6.1. Modeliranje globalne koruzije

U ovom je poglavlju opisan postupak analize koruzijskih istrošenja tri tankera s jednostrukom oplatom izgrađenih osamdesetih godina. Brod 1, izgrađen je 1980. godine u Japanu, a brodovi 2 i 3 su blizanci, izgrađeni 1986. godine u Hrvatskoj. Kod Brodova 2 i 3 cijeli teretni prostor, odnosno poprečni presjek, napravljen je od mekog brodograđevnog čelika kategorije A, s granicom tečenja materijala od 235 N/mm^2 . Brod 1 ima ugrađeno dno i palubnu konstrukciju od čelika povišene čvrstoće kategorije AH 32, granice tečenja od 315 N/mm^2 , dok mu je središnji dio oko neutralne linije, uključujući uzdužne pregrade od običnog čelika gore navedenih mehaničkih karakteristika. Na slici 2.9 prikazan je Brod 1 u službi.



Slika 2.9 - Brod 1 u plovidbi

Obrada podataka temelji se na postojećim izmjerama debljina elemenata trupa iz baze Hrvatskog Registra Brodova (HRB) s periodičnih suhih dokovanja i pregleda brodova u službi nakon 10, 15 i 20 godina. S obzirom da su u model unesene vrijednosti korozijskih istrošenja u različitim fazama vijeka trajanja broda određen je gubitak momenta otpora poprečnog presjeka kao funkcija vremena, uzimajući u obzir vijek trajanja zaštitnog premaza. Za predviđanje napredovanja korozijskog istrošenja odnosno općenitog trenda smanjenja momenta otpora glavnog rebra (HGSM - Hull girder section modulus) na temelju rezultata dobivenih navedenom analizom, korišten je dostupni teorijski nelinearni korozijski model.

Oštećenja brodova zbog korozije su vrlo vjerojatna i mogućnost nesreće se povećava sa starenjem brodova. Statistike pokazuju da je korozija glavni uzrok pomorskih nesreća kod starijih brodova. Posljedice korozijskog propadanja mogu biti veoma ozbiljne u određenim situacijama. Uznapredovala korozija može rezultirati pukotinama na palubi preko gotovo cijele širine broda i time s vremenom dovesti do gubitka broda. Na slici 2.10 može se vidjeti potpalubno područje 20 godina starog tankera. Opločenje palube i palubni uzdužnjaci su zahvaćeni različitim stupnjevima korozije. Na nekim mjestima, struk uzdužnjaka je u potpunosti propao, što rezultira gubitkom podrške uzdužnjaka u čvrstoći opločenju palube. Nepoduprti raspon opločenja palube se povećava i time smanjuje čvrstoću na izvijanje. Na nemirnom moru dolazi do brze pojave izvijanja pod djelovanjem cikličkog opterećenja valova. Plastične deformacije se akumuliraju i s vremenom pojavljuju pukotine.



Slika 2.10 - Uznapredovala korozija potpalublja 20 godina starog tankera

Moment otpora glavnog rebra, kao temeljna mjere uzdužne čvrstoće broda s vremenom se smanjuje zbog korozije. Tradicionalne inženjerske metode i analize koriste pojednostavljene determinističke pristupe za proračunavanje ovog vremenski promjenjivog slučajnog procesa. U većini slučajeva upotrebljava se određena vrijednost dodatka na

koroziju. Stoga, pravila klasifikacijskih društava, uključujući i CSR pretpostavljaju konstantni gubitak momenta otpora glavnog rebra za cijeli vijek trajanja broda. Procjena čvrstoće brodske konstrukcije u fazi projektiranja temelji se na smanjenom ("netto") momentu otpora poprečnog presjeka za propisani korozijski dodatak.

Iako je takav pristup praktičan, očito je da nije realan, s obzirom da je moment otpora glavnog rebra vremenski ovisna nelinearna funkcija.

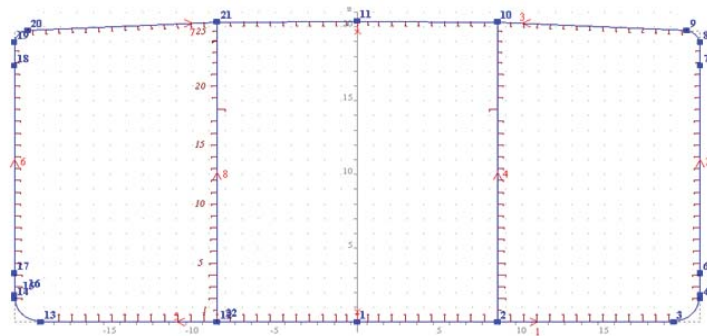
U današnje vrijeme postoji jasna tendencija da se usvoje teoretski nelinearni modeli kako bi se dugoročno predvidio gubitak zbog korozije i samim time smanjenje otpora glavnog rebra [9]. Takav direktan pristup u određivanju napredovanja korozije može biti koristan za klasifikacijska društva i brodovlasnike kako bi predvidjeli dugoročno ponašanje broskog trupa i utvrdili je li potreban remont i kada je najbolje vrijeme za popravke. Nadalje, takav direktan pristup ima potencijal olakšati primjenu direktnih proračunskih metoda u strukturnoj analizi brodske konstrukcije.

U ovom je radu razvijena praktična primjena koncepta vremenski ovisnog momenta otpora glavnog rebra. Dobiveni se rezultati mogu koristiti kod planiranja inspeksijskih pregleda trupa naftnog tankera u službi.

Tablica 2.2 - Glavne karakteristike tri analizirana naftna tankera s jednostrukom oplatom

| Glavne značajke broda | | Brod br. 1 | Brod br. 2 & 3 |
|------------------------|----------|------------|----------------|
| Duljina između okomica | L_{pp} | 237 m | 205 m |
| Širina | B | 42 m | 48 m |
| Visina | D | 20.5 m | 19 m |
| Gaz | T | 13 m | 13 m |
| Nosivost | DWT | 78000 dwt | 80000 dwt |

Konstrukcija sva tri analizirana broda je tipična za tankere s jednostrukom oplatom, gdje središnji tankovi služe kao skladišta tereta dok bočni tankovi mogu služiti kao balastni prostor ili skladišta tereta, vidi sliku 2.11.

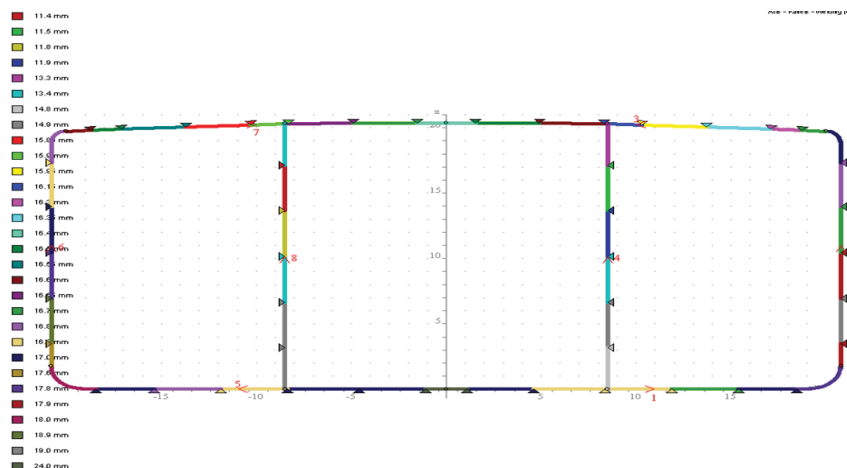


Slika 2.11 - Glavno rebro tankera s jednostrukom oplatom

Moment otpora glavnog rebra u teretnom prostoru određen je pomoću programa MARS [30], klasifikacijskog društva Bureau Veritas iz Pariza.

Prvo je određen moment otpora glavnog rebra za novi brod. Nakon toga, debljina strukturnih elemenata (ploče i uzdužnjaci) koji doprinose uzdužnoj čvrstoći su promijenjeni prema izmjerama debljina arhiviranim u bazi Hrvatskog Registra Brodova (HRB). Dostupne su izmjere s periodičnih suhih dokovanja i pregleda brodova u službi nakon 10, 15 i 20 godina.

Korozijski model brodova je izveden za poprečne dijelove s kombinacijom središnjih tankova kao tankova tereta i bočnih tankova kao balastnih tankova. Tipičan poprečni presjek Broda 1 s izmjerenim debljinama limova na četvrtom specijalnom pregledu, odnosno nakon 20 godina starosti je prikazan na slici 2.12.



Slika 2.12 - Izmjerene debljine limova na poprečnom presjeku za Brod 1 nakon 20 godina

Učinak starenja $R(t)$ je izražen pomoću gubitaka momenta otpora glavnog rebra (dalje u tekstu HGSM), koji predstavlja omjer izmjerenog momenta otpora glavnog rebra i momenta otpora glavnog rebra novog broda - jednadžba (2.7). Rezultati za izmjerene $R(t)$ za tri razmatrana brodska modela nakon 10, 15 i 20 godina su prikazani u tablici 2.3.

$$R(t) = 1 - (\text{HGSM (izmjereno u godini } t) / \text{HGSM (za novi brod)}) \quad (2.7)$$

Tablica 2.3 - Izmjereni $R(t)$ za tri broda

| Godine mjerenja | $R(t)$ – Brod 1 | $R(t)$ – Brod 2 | $R(t)$ – Brod 3 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 10 | 0.0152 | 0.0145 | 0.0161 |
| 15 | 0.0228 | 0.0291 | 0.0445 |
| 20 | 0.0288 | 0.0425 | 0.0688 |

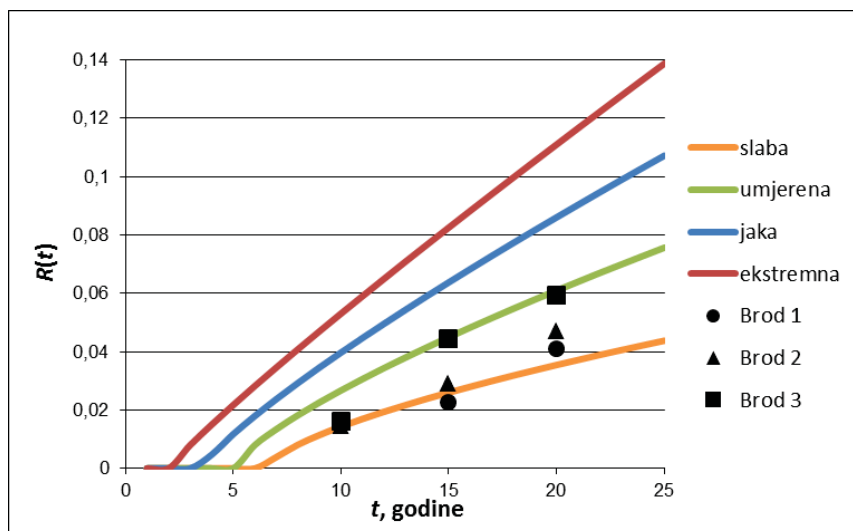
Gubitak momenta otpora glavnog rebra se određuje kao funkcija vremena, uzimajući u obzir vijek trajanja zaštitnih premaza. Sljedeća formula (2.8) predložena je za gubitak momenta otpora glavnog rebra poslije t godina službe na temelju izmjerenih rezultata svih učinkovitih uzdužnih konstrukcijskih komponenti na 2195 poprečnih presjeka 211 tankera s jednostrukom oplatom [9]:

$$R(t) = C(t - t_0)^I ; \quad (2.8)$$

gdje je $R(t)$ gubitak momenta otpora u vremenu t , dok je t_0 godina u kojoj moment otpora glavnog rebra počinje odstupati od početne vrijednosti. C i I su konstante koje se mogu odrediti prema skupu podataka. American Bureau of Shipping (ABS) je sakupio veliki broj podataka, odnosno izmjera za vrijeme "Safe hull Condition Assessment" (CAP) programa i rezultati su prikazani kao prosječne vrijednosti parametara u tablici 2.4.

Tablica 2.4 - Parametri jednadžbe za oštrinu (stupnjeve) korozije prema ABS-u [9].

| Oštrina korozije | C | t_0 , godine | I |
|------------------|------|----------------|------|
| Slaba | 0.62 | 6.5 | 0.67 |
| Umjerena | 0.80 | 5 | 0.75 |
| Jaka | 0.84 | 3.5 | 0.83 |
| Ekstremna | 0.90 | 2 | 0.91 |



Slika 2.13 - Gubitak momenta otpora poprečnog presjeka za različite oštrine korozije prema ABS-u

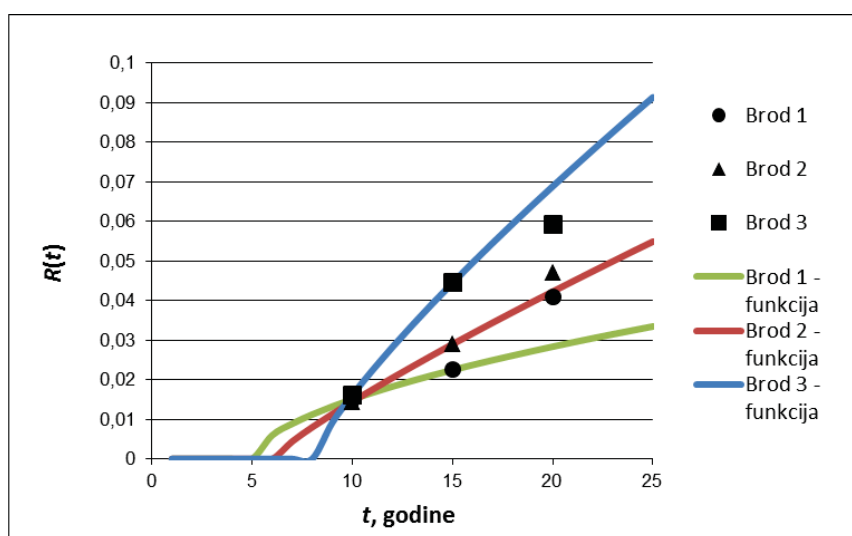
Iz rezultata, koji su također prikazani kao krivulje na slici 2.13., može se očitati da će smanjenje momenta otpora glavnog rebra biti manje od 10% za vrijeme cjelokupnog života broda u slučaju "slabe" i "umjerene" korozije. Za "jaki" korozijski rast HGSM će postati manji od 10% nakon 23 godine, dok će se u uvjetima "ekstremno" nepovoljnih korozijskih uvjeta navedena vrijednost od 10% smanjenja HGSM dostići već nakon 18 godina broda u službi. Gore navedena vrijednost od 10% dopuštenog smanjenja od izvornog (početno ugrađenog) momenta otpora predstavlja važan industrijski standard koji brodska konstrukcija ne smije prijeći za vrijeme cjelokupnog životnog vijeka [43].

Na slici 2.13 su također prikazani rezultati za tri promatrana broda s izmjerenom korozijom, koji se nalaze između krivulja "slabe" i "umjerene" korozije. Brod 1 na slici 2.13 označen je "krugovima" i ima "slabu" koroziju za sve tri izmjerene točke nakon 10, 15 i 20 godina, te krivulja "slabe" korozije ujedno približno označava vrijednost aproksimacije metodom najmanjih kvadrata kroz izmjerene točke u vremenu. Izmjerene točke za Brod 2, označene s "trokutima", leže skoro na ravnom pravcu i kod dugoročne razdiobe u vremenu može se očekivati da će se njegova korozijska istrošenja približiti krivulji "umjerene" korozije. Rezultati Broda 3, koji su označeni kao "kvadrati", su jako zanimljivi. Izmjerene točke su smještene na krivulji koja na svom početku počinje s rastom nakon 8 godina, koji u ovom slučaju odgovara vijeku trajanja zaštitnog premaza. Nakon prestanka djelovanja zaštitnog premaza korozijski proces počinje s jako brzim rastom nakon otprilike 15 godina, ali zatim se korozijski rast usporava i korozijsko istrošenje slijedi krivulju "umjerene" korozije.

Kako bi istražili mogućnosti daljnjih poboljšanja vezano za predviđanje korozijskog istrošenja, krivulje slične onima s prijašnje slike izračunate su na temelju izmjerenih točaka smanjenja HGSM-a nakon 10 i 15 godina, a zatim je izvršena usporedba tih krivulja s izmjerenim rezultatima smanjenja nakon 20 godina. Navedeni rezultati su prikazani u tablici 2.5 i na slici 2.14. Također, parametri jednadžbe (2.8) za tri broda su prikazani u tablici 2.5. Budući da su u jednadžbi (2.8) tri nepoznate varijable (t_0 , C i I), a na raspolaganju su samo dvije kalibracijske točke nakon 10 i 15 godina, t_0 je morao biti pretpostavljen. Međutim, vodilo se računa da vrijeme trajanja zaštitnog premaza bude pretpostavljeno na temelju garantnih perioda proizvođača premaza, odnosno da budu u periodu od 5 do 10 godina.

Tablica 2.5 - Parametri jednadžbe (2.8) za modele korozije promatranih brodova sukladno mjerenjima nakon 10 i 15 godina službe.

| Oštrina korozije | C | t_0 [godine] | I |
|------------------|------|----------------|------|
| Brod 1 | 0.60 | 5 | 0.58 |
| Brod 2 | 0.44 | 6 | 0.86 |
| Brod 3 | 0.92 | 8 | 0.81 |



Slika 2.14 - Izmjereni i predviđeni gubitak momenta otpora poprečnog presjeka za različite brode

Za korozijski model Broda 1 smanjenje HGSM-a nakon 20 godina je podcijenjeno s obzirom na krivulju predviđanja. Mnogo bolje slaganje s izmjerenim točkama je za krivulju "slabe" korozije sa slike 2.11. Kod Broda 2 predviđanje smanjenja HGSM-a nakon 20 godina

je zadovoljavajuće. Krivulja predviđanja je skoro linearna nakon prestanka djelovanja zaštitnog premaza. Rezultati modela Broda 3 daju za pretpostaviti da je vrijeme trajanja zaštitnog premaza duže, ali nakon prestanka djelovanja premaza korozijski rast je veoma brz pa stoga krivulja predviđanja premašuje stvarno smanjenje HGSM-a nakon 20 godina.

Treba napomenuti da postoji velika nesigurnost povezana s gubitkom HGSM s obzirom da je korozijsko istrošenje različito za svaki poprečni presjek broskog trupa. Međutim, može se procijeniti prosječno korozijsko istrošenje na temelju analiziranih izmjera poprečnih presjeka, što je pristup prihvaćen u ovom radu.

Svaki pojedinačni tanker, a pogotovo ako se radi o starijem tankeru s jednostrukom oplatom predstavlja potencijalnu prijetnju zagađenju okoliša. Ovakav pojedinačan pristup svakom brodu predstavlja temeljnu razliku između dosadašnjih istraživanja u ovom području gdje su korozijski modeli prilagođeni skupnim mjerenjima različitih brodova bez da se uzima u obzir kako se takvi modeli slažu s pojedinačnim brodom. Prikazana procedura predstavlja poboljšanje s obzirom na CSR, budući da Pravila pretpostavljaju konstantno korozijsko istrošenje za vrijeme cjelokupnog života, što se ne može smatrati realnom pretpostavkom.

2.6.2. Modeliranje lokalne korozije

Analizirana su istrošenja palubnih opločenja i uzdužnjaka, odnosno ukrepljenih panela, konstrukcije za Brod 1 i Brod 2, Brod 3, čije geometrijske karakteristike i materijal su prikazane u tablici 2.6.

Tablica 2.6 - Geometrijske karakteristike ukrepljenih panela palube

| | duljina panela | širina panela | debljina opločenja | visina struka nosača | debljina struka nosača | širina pojasa nosača | debljina pojasa nosača | kategorija čelika |
|------------|-------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------|
| Brod 1 | 4600 | 800 | 17 | 300 | 11.5 | 125 | 19 | AH32 |
| Brod 2 & 3 | 4000 | 800 | 15 | 300 | 28 | 0 | 0 | GR.A |

Procjena progresije lokalnog korozijskog istrošenja je provedena posebno za ploče i uzdužnjake glavne palube u tankovima tereta i balastnim tankovima. Za lokalno istrošenje, jednadžba (2.9) ima sljedeći oblik [10]:

$$C(t) = \alpha(t - t_0)^\beta \quad (2.9)$$

Gdje je $C(t)$ korozijsko istrošenje u vremenu t ; t_0 određena godina u kojoj debljina ploče počinje odstupati od početne vrijednosti. α i β su konstante koje su mogu odrediti prema izmjerenim podacima.

2.6.2.1. Modeliranje razdiobe lokalnih istrošenja u određenom vremenskom trenutku

U određenom vremenskom trenutku korozijsko istrošenje može se pretpostaviti teorijskom razdiobom vjerojatnosti. Za ovakav tip podataka najčešće se koriste logaritamsko-normalna i Weibullova razdioba [10], [13], [53]. Za izmjerene podatke o smanjenju debljina elemenata palubne konstrukcije modela Brod 1, 2 i 3 odabrana je Weibullova razdioba. Navedena statistička razdioba se upotrebljava kod procjene ekstremnih korozijskih istrošenja s malom vjerojatnošću događanja.

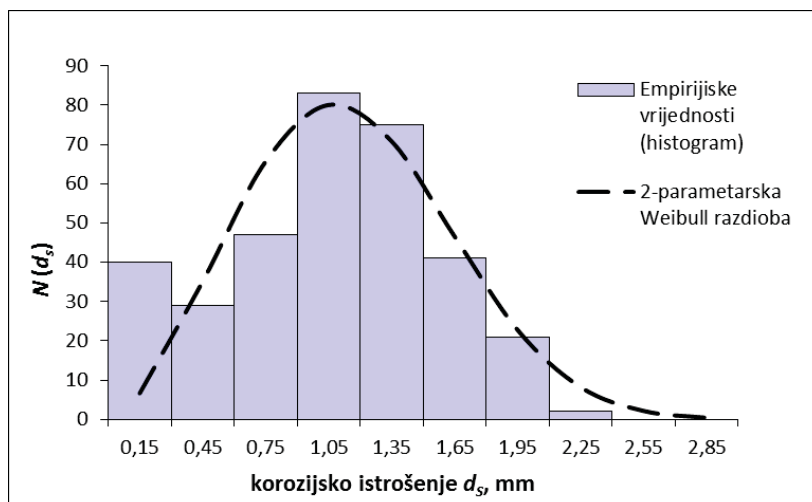
Funkcija razdiobe vjerojatnosti definirana je izrazom [10], [13]:

$$F(d_s) = 1 - e^{-\left(\frac{d_s}{\Theta}\right)^\alpha} \quad (2.10)$$

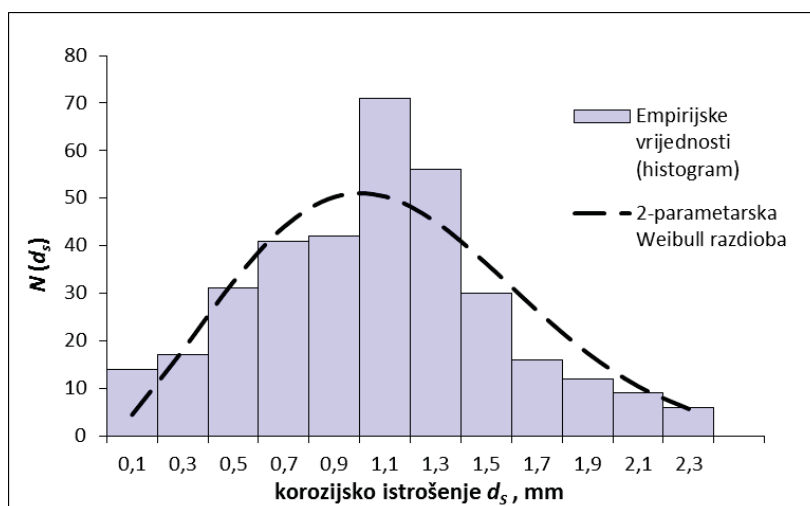
dok je funkcija gustoće vjerojatnosti definirana izrazom:

$$f(d_s) = \frac{\alpha}{\Theta} \cdot (d_s)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{d_s}{\Theta}\right)^\alpha} \quad (2.11)$$

U jednadžbama (2.10) i (2.11) d_s predstavlja sredinu razreda korozijskih izmjera, α parametar oblika, dok je Θ parametar skaliranja. Dva navedena parametra razdiobe određuju se tako da se izraz (2.10) dva puta logaritmiraju. Na slikama 2.15 i 2.16 prikazane su usporedbe teorijske funkcije gustoće vjerojatnosti 2-parametarske Weibullove razdiobe s empirijskim vrijednostima tj. histogramom korozijskih istrošenja opločenja u tankovima tereta nakon 15 i 20 godina.



Slika 2.15 - Razdioba opažanja aproksimirana Weibull-ovom distribucijom korozivskih istrošenja palubnih opločenja u tankovima tereta za Brod br. 2 u 15. godini



Slika 2.16 - Razdioba opažanja aproksimirana Weibull-ovom distribucijom korozivskih istrošenja palubnih opločenja u tankovima tereta za Brod br. 2 u 20. godini

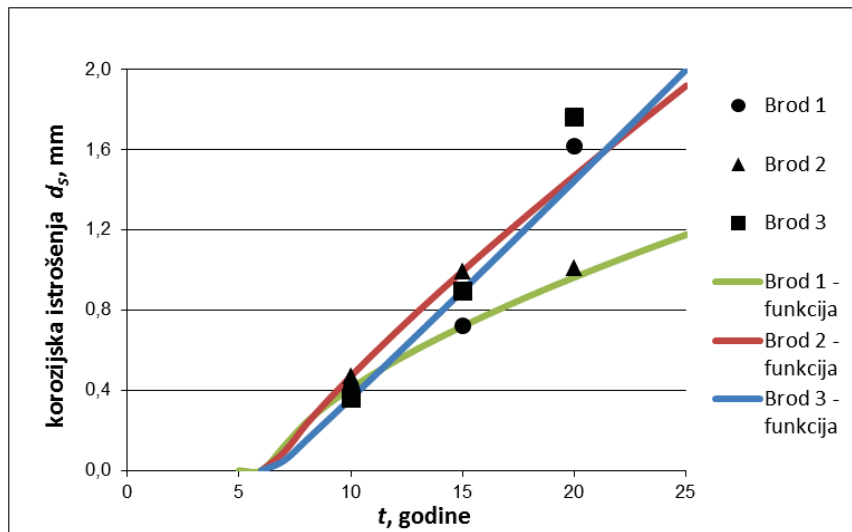
Na temelju slika 2.15 i 2.16 može se procijeniti da se 2-parametarska Weibullova razdioba u prikazanom slučaju dobro poklapa s izmjerenim (empirijskim) podacima. Na dijagramu 2.16, koji se odnosi na mjerenja nakon 20 godina, može se također primijetiti manji porast istrošenja većih od 2 mm u odnosu na mjerenja nakon 15 godina službe.

2.6.2.2. Lokalna istrošenja u ovisnosti o vremenu

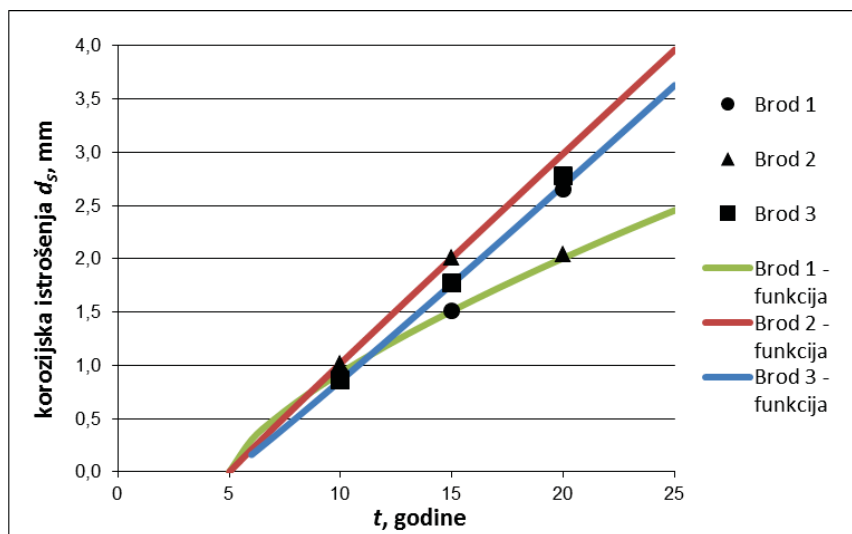
Prilagodba jednadžbe (2.9) je izvedena za srednje vrijednosti smanjenja debljina, kao i za ekstremna korozijska istrošenja, koja odgovaraju vjerojatnosti premašivanja od 5%. tj. 95% istrošenja su manja od tih vrijednosti. Ukupan broj mjerenja ploča palube i uzdužnjaka korištenih u radu iznosi 6567. Za Brod 1 je korišteno 2135 mjerenja, za Brod 2 2079 i za Brod 3 2353 mjerenja. Slično kao i kod HGSM, krivulje su postavljene kroz točke mjerenja debljina za 10 i 15 godina. Budući da postoje tri nepoznate varijable u jednadžbi (2.9) (t_0 , α i β), a samo dvije kalibracijske točke (za 10 i 15 godina), t_0 se mora pretpostaviti.

Na slikama 2.17 – 2.24 prikazana je srednja i ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja ploča i uzdužnjaka palube u tankovima tereta i balastnim tankovima. Na slici 2.17 može se vidjeti da korozijski model premašuje srednju vrijednost korozijskog istrošenja za Brod 2, dok ih za brodove 1 i 3 podcjenjuje. Pretpostavlja se da je vrijeme trajanja zaštitnog premaza za srednju vrijednost korozije 6.5 godina.

Možemo također primijetiti na slici 2.18 da je ekstremna korozija nakon 20 godina dobro predviđena za Brod 3. Za Brod 1 ta vrijednost je podcijenjena dok je za Brod 2 precijenjena. Krivulja predviđanja za Brodove 2 i 3 je skoro linearna, a vrijeme trajanja zaštitnog premaza za sva tri broda je 5 godina. Zanimljivo je primijetiti iz obje slike 2.17 i 2.18 za Brod 2, da su korozijska istrošenja nakon 20 godina, kako srednja tako i ekstremna, samo neznatno veća od onih nakon 15 godina. Za Brod 1 su suprotno tome razlike između istrošenja nakon 15 i 20 godina neočekivano velike, pa bi konkavna krivulja bila bolji izbor za modeliranje korozijskog procesa [18].



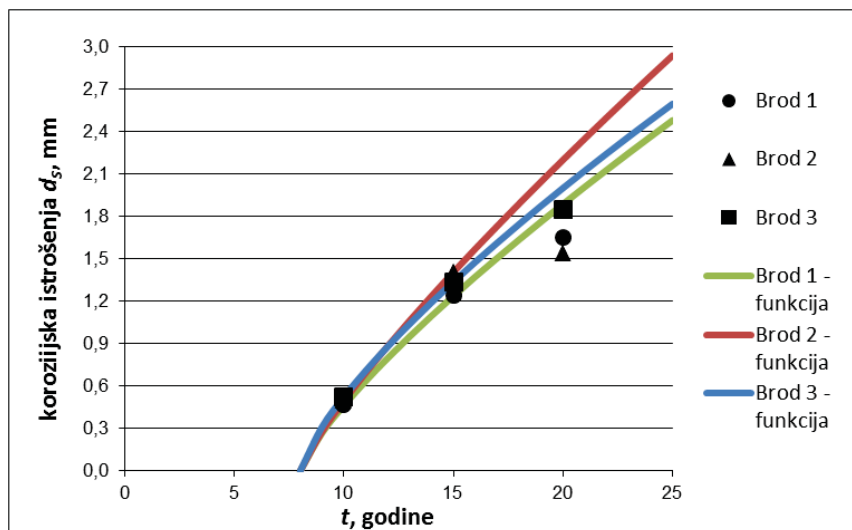
Slika 2.17 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozijskog istrošenja ploča palube tankova tereta



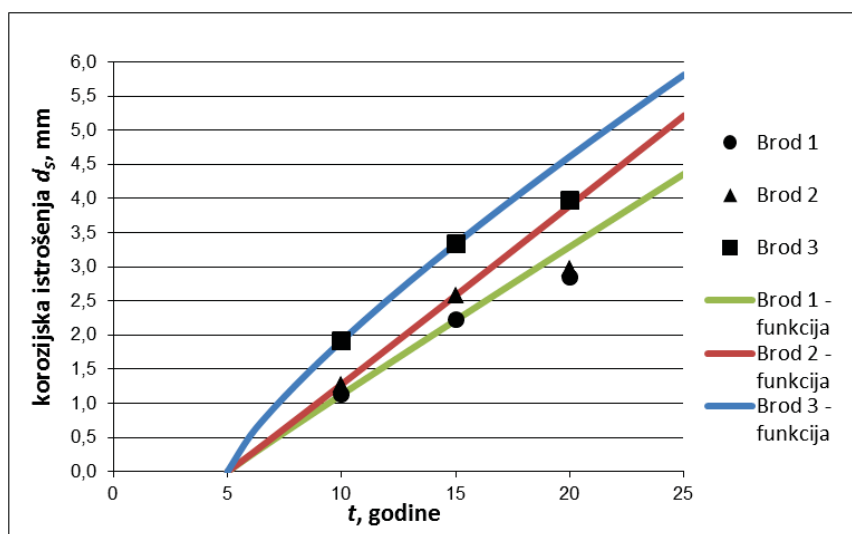
Slika 2.18 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja ploča palube tankova tereta

Rezultati analize za srednju i ekstremnu vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube u tankovima tereta su prikazani na slikama 2.19 i 2.20. Sva tri predviđanja premašuju korozijsko istrošenje nakon 20 godina. Ovo vrijedi za srednju i za ekstremnu vrijednost. Trend primijećen kod ploča, da je korozijska stopa umanjena između 15 i 20 godina za Brod 2, je vidljiva i kod uzdužnjaka. Uspoređujući rezultate možemo zaključiti da je korozijsko istrošenje za uzdužnjake palube veće u odnosu na ploče. Dakle, za 20 godina,

ekstremno korozijsko istrošenje uzdužnjaka je između 3 mm i 4 mm, dok je za ploče između 2 mm i 3 mm. Vijek trajanja zaštitnog premaza za uzdužnjake je 8 godina za srednju vrijednost i 5 godina za ekstremnu vrijednost.



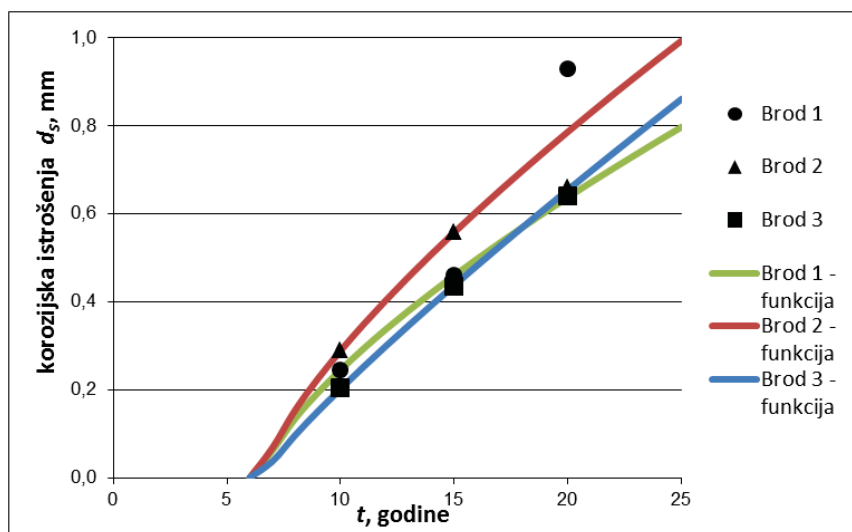
Slika 2.19 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube tankova tereta



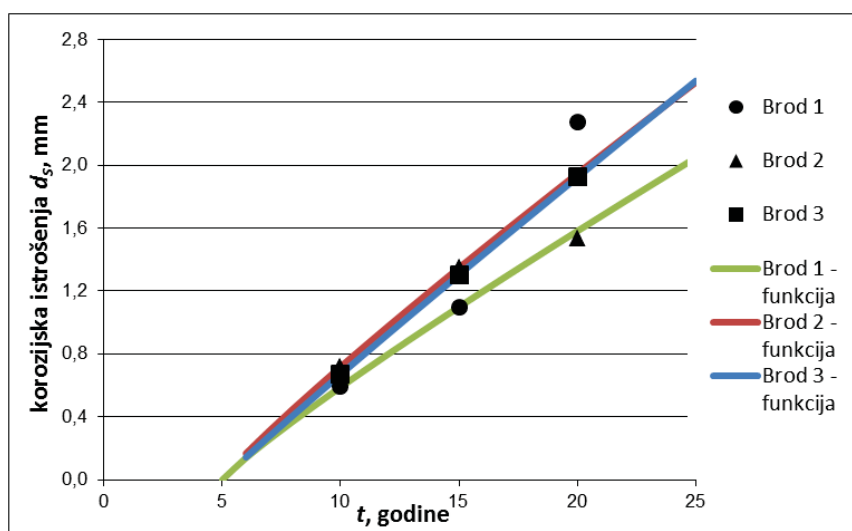
Slika 2.20 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube tankova tereta

Rezultati analize za srednju i ekstremnu vrijednost korozijskog istrošenja ploča palube u balastnim tankovima prikazani su na slikama 2.21 i 2.22. Za Brod 1, slično kao i kod ploča tankova tereta, razlika između korozijskog istrošenja za 20 i 15 godina je dosta velika, što ukazuje na konkavnu vrstu korozijskog procesa. Tendencija smanjenja korozijske stope za

razdoblje između 15 i 20 godina, primijećena kod tankova tereta, očita je i kod balastnih tankova Broda 2. Slijedom toga, korozivno istrošenje poslije 20 godina je sustavno precijenjeno za taj brod. Za Brod 3, predviđena korozija se odlično poklapa s mjerenjima za srednju i ekstremnu vrijednost korozivnog istrošenja. Ako usporedimo slike 2.21 i 2.22 sa slikama 2.17. i 2.18 vidimo da je korozivno istrošenje veće za ploče palube teretnih tankova nego u balastnih tankova. Vijek trajanja zaštitnog premaza je procijenjen kao i kod tankova tereta, odnosno 6.5 godina za srednju vrijednost i 5 godina za ekstremnu vrijednost.

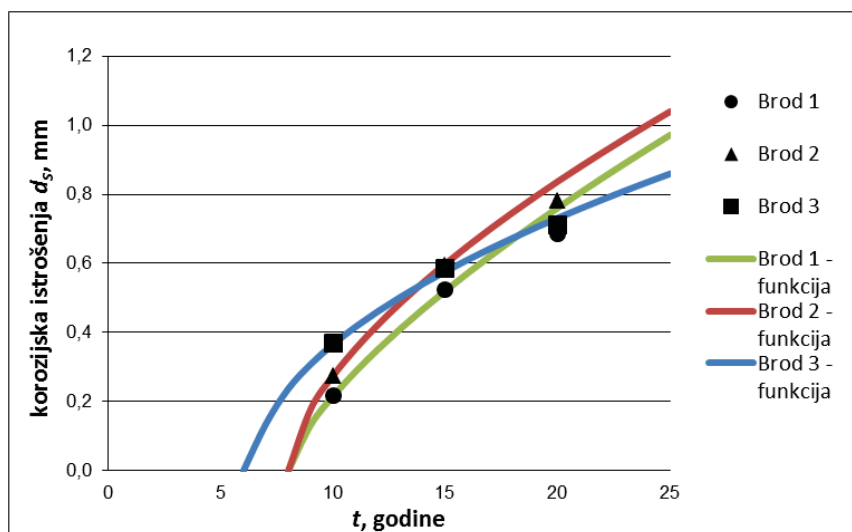


Slika 2.21 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozivnog istrošenja ploča palube balastnih tankova

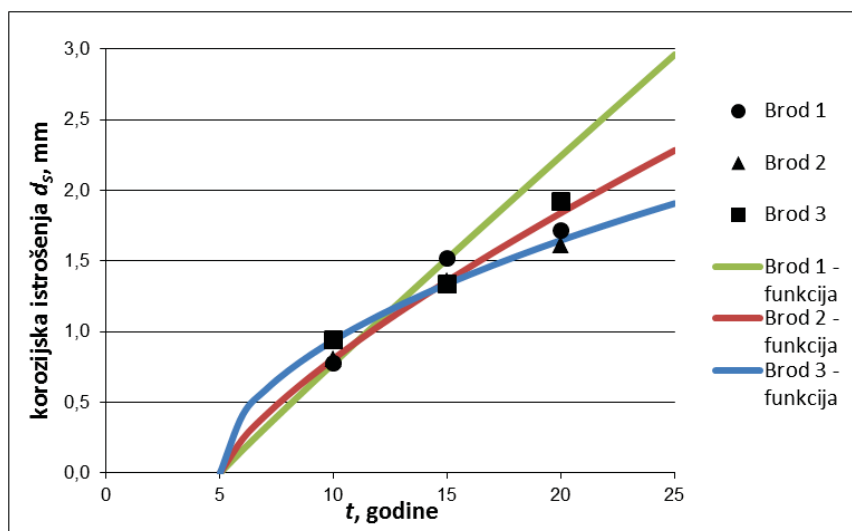


Slika 2.22 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozivnog istrošenja ploča palube balastnih tankova

Općenito, izmjerene vrijednosti istrošenja za uzdužnjake u tankovima balasta su vrlo slične onima za ploče u tankovima balasta (Slike 2.23 i 2.24). Vijek trajanja zaštitnog premaza za uzdužnjake palube u balastnim tankovima je procijenjen na 5 godina za ekstremnu vrijednost, a procjena za srednju vrijednost korozijskog istrošenja je 6.5 i 8 godina. Predviđanje srednjih vrijednosti korozijskih istrošenja nakon 20 godina blago precjenjuje izmjerene vrijednosti. Za ekstremne vrijednosti krivulje predviđanja za Brodove 1 i 2 blago podcjenjuju izmjerene vrijednosti, dok ih za Brod 3 precjenjuju.



Slika 2.23 - Izmjerena i predviđena srednja vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube balastnih tankova



Slika 2.24 - Izmjerena i predviđena ekstremna vrijednost korozijskog istrošenja uzdužnjaka palube balastnih tankova

2.6.2.3. Određivanje statističke nesigurnosti i regresijska analiza modela lokalne korozije

Izmjereni rezultati i teorijska predviđanja srednjih i ekstremnih istrošenja prikazani su u tablicama 2.7-2.9. Prosječni omjer izmjerenog i pretpostavljenog korozijskog istrošenja iznosi 1.01 za srednje i 0.96 za ekstremne vrijednosti, dok su njihove odgovarajuće standardne devijacije 0.30 i 0.24. Ovi se rezultati mogu interpretirati na način da korozijski model u prosjeku nema otklona, ali je nesigurnost predviđanja prilično velika.

Kad se uzmu u obzir samo tankovi tereta tada omjer za srednje i ekstremne vrijednosti korozijskih istrošenja izmjereno/pretpostavljeno iznosi 1.01 i 0.92, dok je standardna devijacija 0.38 i 0.23. Kad se uzmu u obzir samo tankovi balasta tada omjer za srednje i ekstremne vrijednosti korozijskih istrošenja izmjereno/pretpostavljeno iznosi 1.01 i 1.00, dok je standardna devijacija 0.22 i 0.26. Može se zaključiti da je slaganje pretpostavljenih i izmjerenih istrošenja bolje za balastni tank nego za tank (skladište) tereta.

Tablica 2.7 - Usporedba pretpostavljenih i izmjerenih istrošenja za Brod 1, mm

| Element | Prostor | Srednja vr. (pretpostavljena) | Srednja vr. (izmjerena) | Ekstremna (pretpostavljena) | Ekstremna (izmjerena) |
|-----------|---------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Ploča | Teret | 0.96 | 1.62 | 2.01 | 2.65 |
| | Balast | 0.64 | 0.93 | 1.58 | 2.27 |
| Uzdužnjak | Teret | 1.89 | 1.65 | 3.29 | 2.85 |
| | Balast | 0.76 | 0.69 | 2.25 | 1.72 |

Tablica 2.8 - Usporedba pretpostavljenih i izmjerenih istrošenja za Brod 2, mm

| Element | Prostor | Srednja vr. (pretpostavljena) | Srednja vr. (izmjerena) | Ekstremna (pretpostavljena) | Ekstremna (izmjerena) |
|-----------|---------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Ploča | Teret | 1.47 | 1.01 | 2.99 | 2.05 |
| | Balast | 0.79 | 0.66 | 1.95 | 1.54 |
| Uzdužnjak | Teret | 2.20 | 1.54 | 3.90 | 2.98 |
| | Balast | 0.84 | 0.78 | 1.84 | 1.61 |

Tablica 2.9 - Usporedba pretpostavljenih i izmjerenih istrošenja za Brod 3, mm

| Element | Prostor | Srednja vr. (pretpostavljena) | Srednja vr. (izmjerena) | Ekstremna (pretpostavljena) | Ekstremna (izmjerena) |
|-----------|---------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Ploča | Teret | 1.45 | 1.76 | 2.69 | 2.78 |
| | Balast | 0.65 | 0.64 | 1.93 | 1.93 |
| Uzdužnjak | Teret | 2.00 | 1.85 | 4.62 | 3.97 |
| | Balast | 0.73 | 0.71 | 1.65 | 1.92 |

Kriterij prihvatljivosti rezultata može se opisati koeficijentom determinacije R^2 , koji pokazuje stupanj korelacije izmjerenih varijabli i njihovih procijenjenih vrijednosti. R^2 se u slučaju linearne regresijske analize kreće od 0 do 1, ali može poprimiti i vrijednosti van tog intervala ako se mjeri odstupanje od modela koji nije dobiven regresijskom jednadžbom. To je slučaj u ovom radu, gdje se koristio jednostavan linearni regresijski model $y = x$, koji nije dobiven linearnom regresijom izmjerenih podataka. x predstavlja izmjereno korozijsko istrošenje, dok je y istrošenje određeno nelinearnim teorijskim modelom za opis propagacije (napredovanja) korozije. Koeficijent determinacije R^2 se u tom slučaju određuje kao:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{err}}{SS_{tot}} \quad (2.12)$$

gdje je SS_{tot} ukupna suma kvadratnih odstupanja izmjerenih vrijednosti x_i od srednje izmjerene vrijednosti \bar{x} :

$$SS_{tot} = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.13)$$

Srednja vrijednost \bar{x} u izrazu (2.13) se određuje na uobičajeni način:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i x_i \quad (2.14)$$

SS_{err} koji se pojavljuje u jednadžbi (2.12) je suma kvadrata reziduuma:

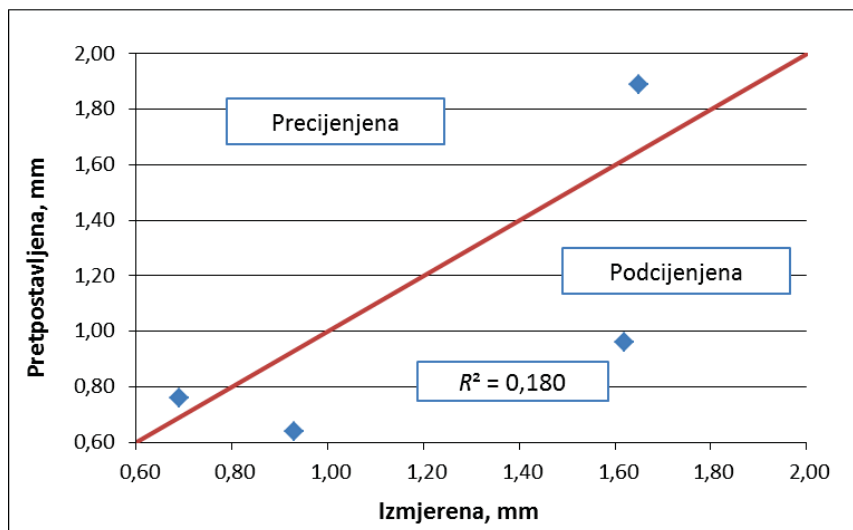
$$SS_{err} = \sum_i (y_i - x_i)^2 \quad (2.15)$$

Svaki pribrojnik u sumi izraza (2.15) predstavlja odstupanje predviđene vrijednosti korozijskog istrošenja y_i od pripadajuće izmjerene vrijednosti x_i .

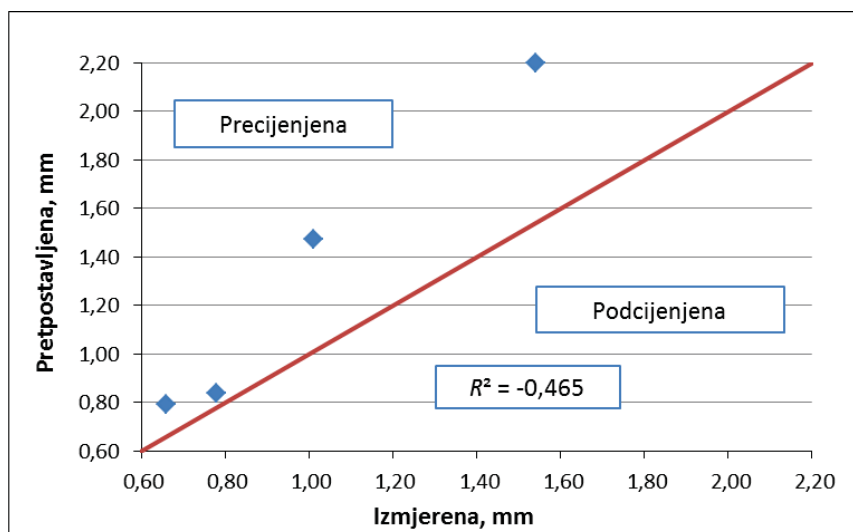
Koeficijent determinacije je definiran obzirom na pravac $y = x$, što omogućava slikoviti prikaz procijenjenih u odnosu na izmjerene podatke. Donji trokut područja dijagrama (ispod pravca $y = x$) pokriva podcijenjeno područje, a gornji trokut (iznad pravca $y = x$) precijenjeno područje. Kada je $R^2 = 1$ pretpostavljeno odstupanje je idealno tj. predviđanje nelinearnog korozijskog modela se može smatrati u potpunosti reprezentativnim.

U radu je najprije izvršena regresijska analiza srednjih vrijednosti istrošenja palubnih opločenja i uzdužnjaka za svaki od tri broda, promatrajući zajedno tankove balasta i skladišta tereta (po 4 točke), što je prikazano na dijagramima slika 2.25, 2.26 i 2.27. Zatim su analizirana istrošenja u skladištima tereta (nafte) za sva tri broda zajedno (opločenja i uzdužnjaci), što je prikazano s po 6 točaka na dijagramu 2.28 i 6 točaka istrošenja u balastnim

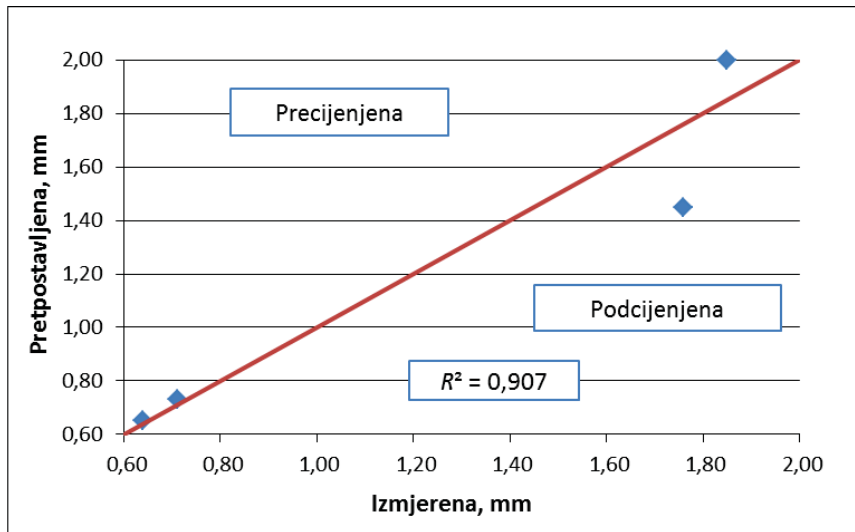
tankovima na dijagramu 2.29. Na kraju su uspoređene vrijednosti svih istrošenja (balast i teret) za sva 3 broda (12 točaka u dijagramu 2.30).



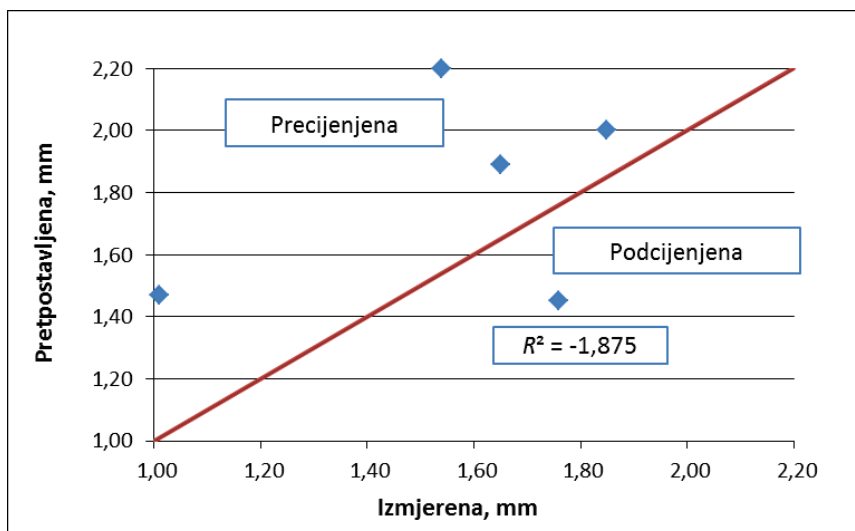
Slika 2.25 - Regresijska analiza za Brod 1



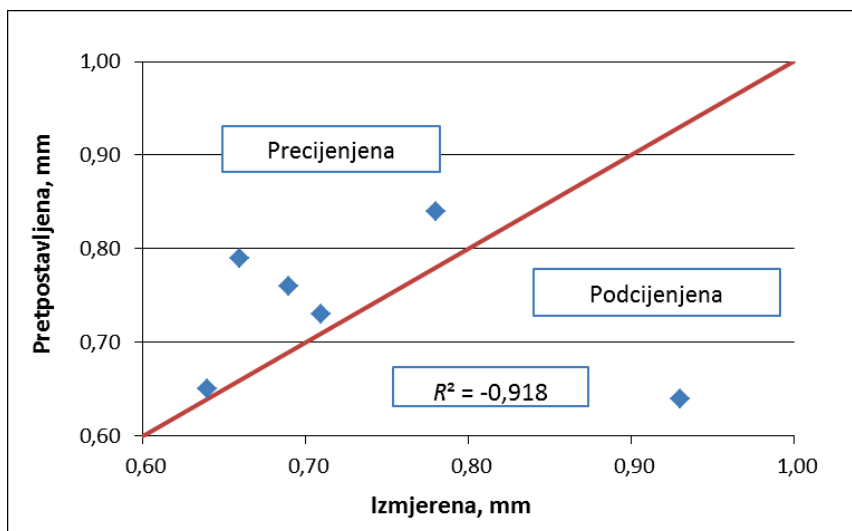
Slika 2.26 - Regresijska analiza za Brod 2



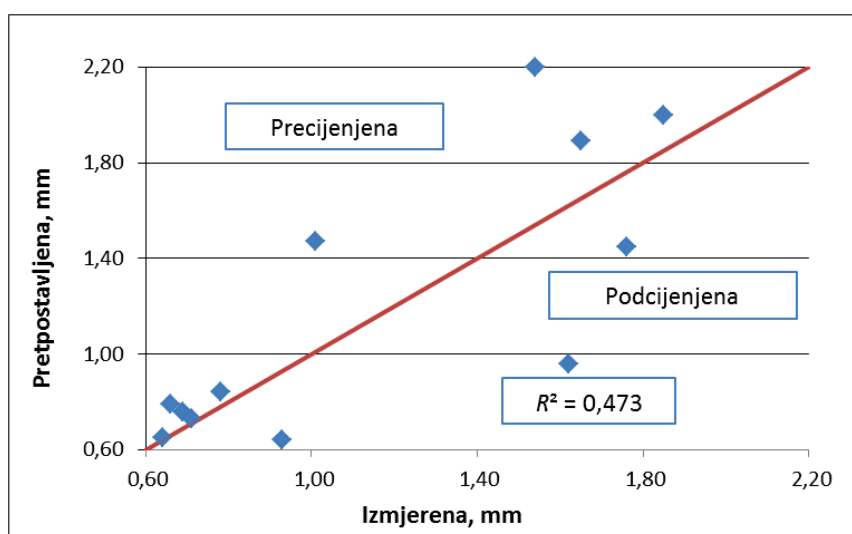
Slika 2.27 - Regresijska analiza za Brod 3



Slika 2.28 - Regresijska analiza za sva tri broda u skladištima tereta (opločenja i uzdužnjaci)



Slika 2.29 - Regresijska analiza za sva tri broda u balastnim tankovima (opločenja i uzdužnjaci)



Slika 2.30 - Regresijska analiza za sva tri broda u balastnim tankovima i skladištima tereta (opločenja i uzdužnjaci)

Na temelju provedene statističke analize i analize prihvatljivosti rezultata mogu se iznijeti sljedeći zaključci:

1. Korozijska istrošenja u tankovima tereta su veća od onih u balastnim tankovima, dok palubni uzdužnjaci u tankovima tereta imaju najveća istrošenja od svih promatranih strukturnih elemenata broskog trupa.

2. Nelinearni dugoročni model korozijskih istrošenja koji se temelji na izmjerama nakon 10 i 15 godina se općenito dobro slaže s izmjerenim istrošenjima nakon 20 godina. Međutim, nesigurnost mjerena sa standardnom devijacijom je poprilično velika. Regresijska analiza je pokazala da Brod 1 ima najveće rasipanje rezultata istrošenja od tri promatrana modela i međusobna veza točaka na dijagramu spada u red slabe jakosti. Brod 3 ima dobro slaganje točaka oko regresijske jednadžbe i ostvaruje čvrstu vezu između rezultata istrošenja (R^2 najbliži jedinici). Svi rezultati (točke) zajedno ostvaruju također dobru vezu, odnosno vezu srednje jakosti.
3. Također, utvrđena je bolja točnost i pouzdanost korozijskog modela u tankovima balasta nego u skladištima tereta.
4. Na temelju analize rezultata cjelokupnog smanjenja momenta otpora glavnog rebra (HGSM) i lokalnog istrošenja palubne konstrukcije ne može se povući paralela. Na primjer paluba može biti značajno istrošena korozijom dok smanjenje globalnog momenta otpora može ostati na jako maloj razini. Shodno navedenom korozija lokalno istrošenih palubnih ploča i globalnog smanjenja momenta otpora glavnog rebra (HGSM) mora se razmatrati odvojeno.
5. S obzirom na provedenu regresijsku analizu može se zaključiti da se R^2 kreće između 0.18 i 0.91, osim za slučajeve kad je koeficijent determinacije R^2 negativan broj. Razlog negativnih rezultata R^2 za Brod 2, te za slučajeve tankova tereta i balasta je značajno odstupanje točaka u dijagramima od odabranog pravca (zadane regresijske jednadžbe) $y = x$. Odstupanja se uglavnom nalaze u području gornjeg trokuta (precijenjeno). Za slučaj Broda 3, R^2 je najbliži jedinici i samim time daje najbolje rezultate, dok je najgori slučaj zbog velikog rasipanja rezultata u tankovima (skladištima) tereta tj. ostvarena je slaba veza između točaka modela. Također, model podcjenjuje mjerenje kod dvije točke Broda 1 i kod jedne točke Broda 3. Isto se može uočiti na slici 2.30, gdje su na jednom dijagramu prikazane sve točke modela zajedno.

3. ČVRSTOĆA UKREPLJENIH PANELA OSLABLJENIH DJELOVANJEM KOROZIJE I ZAMORNIH PUKOTINA

Ukrepljeni paneli osnovni su konstrukcijski elementi broskog trupa. Izloženi su opterećenjima okomitim na ravninu panela uslijed tlaka tereta i morske vode te opterećenjima u ravnini izazvanih globalnim savijanjem broskog trupa. Tlačna opterećenja u ravnini panela posebno su opasna jer mogu dovesti do elasto-plastičnog izvijanja, odnosno kolapsa panela [34]. Čvrstoća ukrepljenih panela opada s vremenom, jer je brodska konstrukcija tijekom godina eksploatacije podložna trošenju i propadanju.

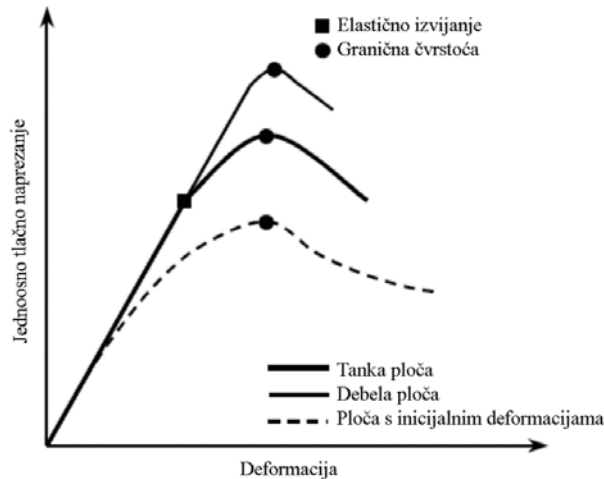
Pretpostavka o učinkovitom oslanjanju panela na podupiruće konstrukcijske elemente veće krutosti omogućuje izdvojenu analizu ukrepljenih panela, što predstavlja značajno pojednostavljenje problema. Stranice panela omeđene su strukturnim elementima koji imaju znatno veću krutost na savijanje od njih samih. Komponente poput nosača u dvodnu, uzdužne pregrade, palubne podveze, predstavljaju takve podupiruće rubove panela.

Iznos tlačnog ili vlačnog naprezanja koji preuzima panel zavisi prvenstveno o lokaciji panela unutar konstrukcije broda. Palubni paneli preuzimaju velika opterećenja u vlastitoj ravnini i relativno male poprečne tlakove, dok paneli dna mogu biti izloženi velikim opterećenjima u vlastitoj ravnini uz značajne poprečne tlakove. Tlačna opterećenja u ravnini panela posebno su opasna jer mogu dovesti do elasto-plastičnog izvijanja, odnosno kolapsa panela. Takva tlačna opterećenja panela palubne konstrukcije pretežito uzrokuju momenti savijanja kada je brod u stanju progiba [1], [18].

U ovom su poglavlju uspoređene tri metode za proračun kolapsa panela: pojednostavljene formule iz Usuglašeni pravila za gradnju naftnih tankera s dvostrukom oplatom (CSR D-H OT) [1], program PULS klasifikacijskog društva DnV te nelinearna analiza metodom konačnih elemenata (NMKE) primjenom programa Femap s NX Nastranom. Model ukrepljenog panela za primjenu NMKE predstavlja najjednostavniji model koji se može primijeniti a da se još uvijek dobiju vjerodostojni rezultati. Jednostavnost modela je preduvjet da bi se mogao primjenjivati u svakodnevnoj praksi klasifikacijskih društava. Takav model sadrži inovativne elemente u opisu inicijalnih deformacija, rubnih uvjeta i verifikaciji rezultata te predstavlja znanstveni doprinos ostvaren tijekom izrade ovog rada. Model je uspješno provjeren usporedbom s metodom iz CSR pravila te programom PULS. Nadalje je predložena primjena tako kalibriranog proračunskog postupka NMKE za analizu panela oštećenih pukotinama i nejednolikom korozijom, što također predstavlja izvorni doprinos ostvaren u ovom radu.

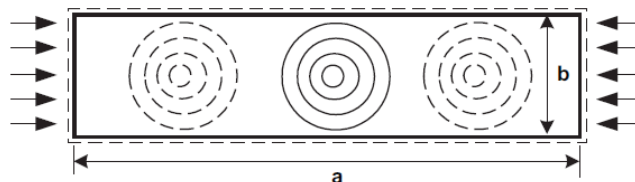
3.1. Značajke kolapsa ploča i ukrepljenih panela

3.1.1. Kolaps neukrepljenih jednoosno opterećenih ploča



Slika 3.1 - Krivulja naprezanje/deformacija čeličnih ploča pod tlačnim opterećenjem [18]

U fazi prije izvijanja, odziv ploče na opterećenje slijedi Hookov zakon, odnosno vrijedi linearan odnos između opterećenja i deformacije. Kada tlačno opterećenje dosegne "kritično opterećenje izvijanja" ploče, dolazi do pojave izvijanja [10]. Čvrstoća na izvijanje može se definirati kao krajnje naprezanje kod kojeg se prvi put pojavljuje oblik izvijanja kod ploče (obično u obliku polu-valova približno jednake duljine) tijekom inkrementalnog opterećivanja (Slika 3.2). Kod tankih ploča obično dolazi do elastičnog, a kod debelih do neelastičnog izvijanja. Ploče s inicijalnim (početnim) deformacijama počinju se savijati odmah nakon djelovanja jednoosnog tlačnog opterećenja i zbog toga kod njih ne dolazi do izraženog prijelaza između elastičnog i plastičnog područja izvijanja. Granična čvrstoća na izvijanje ploča s inicijalnim deformacijama je u pravilu manja od istih "savršeno ravnih" ploča.



Slika 3.2 - Slobodno oslonjena ploča pod osnim opterećenjem [38]

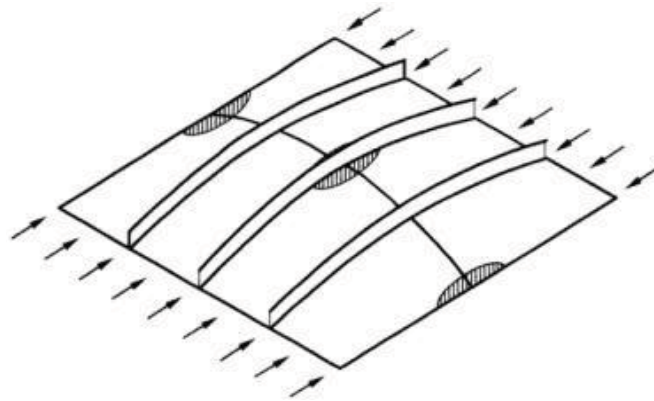
3.1.2. Kolaps ukrepljenih panela palubne konstrukcije

Mogu se razlučiti četiri oblika elasto-plastične nestabilnosti kod ukrepljenih panela s obzirom na dominantna tlačna opterećenja [11]:

- Globalni kolaps ukrepljenog panela (oplate i uzdužnjaka),
- Gredno-štapno izvijanje ukrepljenog panela,
- Izvijanje struka uzdužnjaka ukrepljenog panela,
- Savojno-torzijsko izvijanje uzdužnjaka ("tripping") ukrepljenog panela.

3.1.2.1. Globalni kolaps ukrepljenog panela

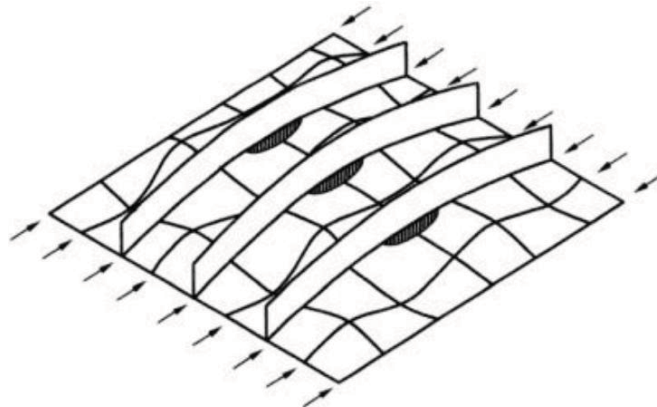
Do ovog oblika oštećenja dolazi kada su uzdužnjaci relativno slabi. Radi se najčešće o zajedničkom elastičnom gubitku stabilnosti ploče i uzdužnjaka.



Slika 3.3 - Globalni kolaps ukrepljenog panela [11]

3.1.2.2. Gredno-štapno izvijanje ukrepljenog panela

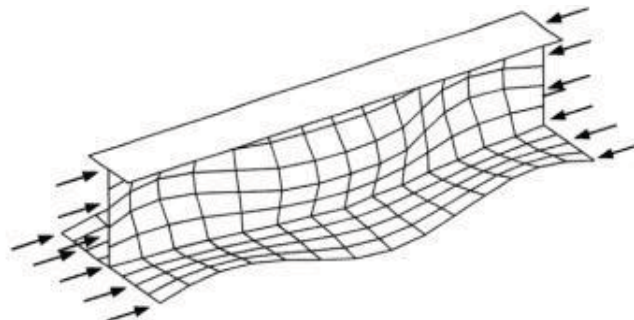
Ovaj oblik oštećenja odnosi se na područje kod kojeg je granična čvrstoća dosegnuta tečenjem ukrepljenog panela u sredini raspona. Do ovakvog oštećenja dolazi kod prosječnih dimenzija uzdužnjaka, odnosno kada uzdužnjaci nisu niti izrazito prejaki ni preslabi. Iz slike 3.4 vidimo da se svaki od uzdužnjaka i pripadajućeg opločenja u ukrepljenom panelu ponaša slično prilikom kolapsa.



Slika 3.4 - Gredno-štapno izvijanje ukrepljenog panela [11]

3.1.2.3. Izvijanje struka uzdužnjaka

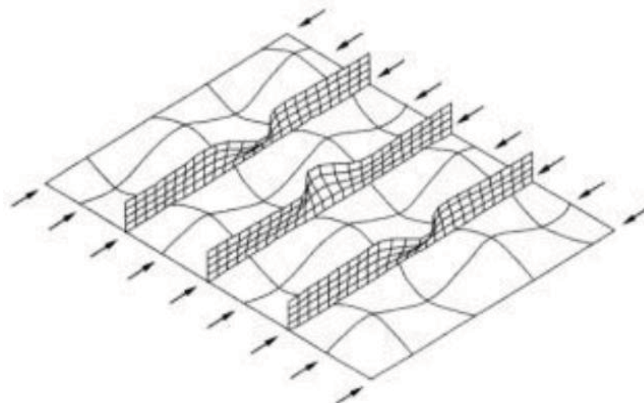
Ovaj oblik oštećenja uglavnom se događa kada je omjer visine naspram debljini struka uzdužnjaka velik i/ili kada je prirubnica uzdužnjaka preslaba da bi ostala ravna. Za posljedicu imamo izvijanje struka uzdužnjaka koje dovodi do kolapsa panela.



Slika 3.5 - Izvijanje struka uzdužnjaka [11]

3.1.2.4. Savojno-torzijsko izvijanje uzdužnjaka

Bočno savojno-torzijsko izvijanje uzdužnjaka ("tripping") predstavlja izvijanje uzdužnjaka oko linije spoja s pločom, kako se može vidjeti na slici 3.6. Opterećenje panela uzrokovano izvijanjem uzdužnjaka uzrokuje iznenadni kolaps ukrepljenog panela.



Slika 3.6 - Torzijsko izvijanje uzdužnjaka [11]

3.1.3. Metode proračuna kolapsa ukrepljenih panela

Ponašanje ploča i ukrepljenih panela pod tlačnim opterećenjem proučava se dugi niz godina. Mnoge teoretske, eksperimentalne i numeričke metode korištene su s ciljem procjene nosivosti konstrukcije ukrepljenih panela. U početku su se primjenjivale analitičke metode koje su uglavnom, zbog složenosti problematike, ograničene na pojednostavljene slučajeve. Objavljeni su brojni eksperimenti koji su unaprjeđivali spoznaje o kolapsnom ponašanju brodske konstrukcije. Uz brz razvoj računalne tehnologije NMKE postaje važan alat za analizu granične čvrstoće numeričkom simulacijom.

U ovom su radu uspoređene sljedeće, često korištene, metode proračuna kolapsa jednoosno opterećenih ploča i ukrepljenih panela:

- Metoda usuglašenih pravila (CSR)
- PULS (Panel Ultimate Limit State)
- Nelinearna metoda konačnih elemenata (NMKE).

3.1.3.1. Metoda usuglašenih pravila (CSR)

Kolaps jednoosno opterećenih ploča

Kolaps jednoosno opterećene ploče u CSR pravilima je definiran Franklandovom formulom:

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) \text{ za } \beta_E > 1.25 \quad (3.1)$$

$$\sigma_u = \sigma_y \text{ za } \beta_E < 1.25$$

Gdje je:

σ_u - granična čvrstoća

σ_y - granica tečenja

β_E - koeficijent vitkosti ploče:

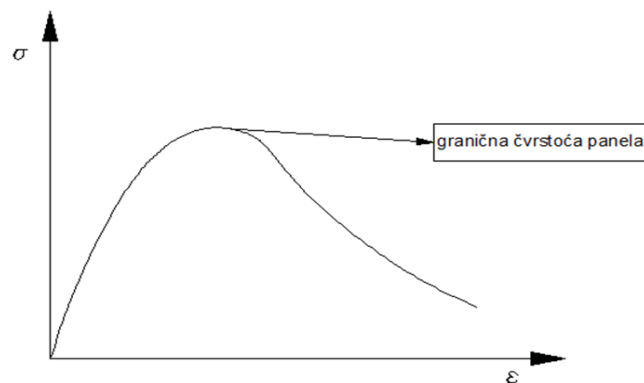
$$\beta_E = \frac{b}{t_{pl}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3.2)$$

Kolaps jednoosno opterećenih ukrepljenih panela

U CSR se koriste krivulje koje predočavaju odnos naprezanja i deformacija $\sigma - \varepsilon$ zvanih "load-end shortening curves" [1] ili krivulje koje opisuju krajnje djelujuće opterećenje prije oštećenja (sloma). Krivulje se konstruiraju posebno za tri osnovna oblika kolapsnog oštećenja:

- gredno-štapni kolaps,
- savojno-torzijski kolaps,
- kolaps uslijed lokalnog izvijanja struka uzdužnjaka.

Ekstremna vrijednost $\sigma - \varepsilon$ dijagrama predstavlja graničnu čvrstoću za taj oblik kolapsa. Najmanja granična čvrstoća za svaki od tri oblika kolapsa usvaja se kao granična čvrstoća ukrepljenog panela. Tipična $\sigma - \varepsilon$ krivulja za pojedini oblik kolapsa prikazana je na slici 3.7:

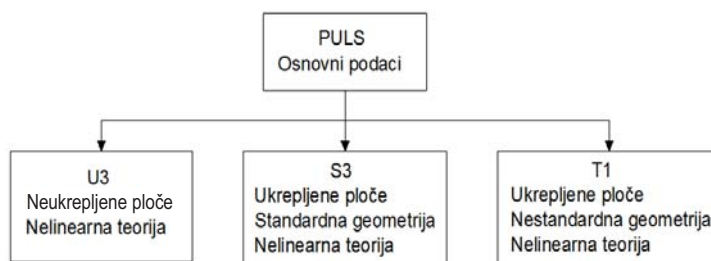


Slika 3.7 - Izgled krivulje $\sigma - \varepsilon$ za slom putem gredno – štapnog izvijanja [1]

3.1.3.2. PULS (Panel Ultimate Limit State)

PULS je polu-analitički računalni kod koji je razvilo klasifikacijsko društvo Det Norske Veritas za procjenu kolapsne čvrstoće ploča i ukrepljenih panela brodske konstrukcije [51]. Utemeljen je na naprednim polu-analitičkim modelima i implementiran u jednostavno i intuitivno sučelje.

Prednosti PULSa su preciznije procjene izvijanja i granične nosivosti tankostijenih elemenata trupa i široki opseg primjene u odnosu na jednostavnije poluempirijske kodove. Stoga, prevencija lokalnih preopterećenja, trajnih oštećenja i kolapsa može se provoditi s većom sigurnošću nego što je to moguće s jednostavnijim formulacijama iz pravila.



Slika 3.8 - PULS osnovni podaci

Element U3: Neukrepljeni panel

Područje primjene: Integrirani elementi trupa između bočnih krutih elemenata kao što su rebra i pregrade. Pravokutna ploča bez ukrepa. Temelji se na nelinearnoj teoriji.

Materijal: Čelik i aluminij

Opterećenja: Može se procijeniti čvrstoća na izvijanje i granična nosivost za linearno promjenjiva uzdužna tlačno\vlačna, linearno promjenjiva poprečna tlačno\vlačna i jednolika smična opterećenja, kao i za sve kombinacije opterećenja u ravnini. Bočni se tlak također može definirati.

Rubni uvjeti: Za sve kombinacije opterećenja slobodno oslonjeni rubovi van ravnine (slobodna rotacija, bočno spriječeni pomaci) i zglobno oslonjeni u ravnini (T(1,1,0)) su standardno pretpostavljeni za sva četiri ruba. Korisnik može po mogućnosti definirati alternativne rubne uvjete.

Element S3: Jednoosno ukrepljeni panel

Područje primjene: Integrirani elementi trupa između bočnih krutih elemenata kao što su rebra i pregrade. Pravokutna ploča s ukrepama prvog reda u aksijalnom smjeru. Temelji se na nelinearnoj teoriji.

Ukrepe prvog reda: Zavareni otvoreni profili, L profili, T profili, ravni profili.

Ukrepe drugog reda: Okomito na ukrepe prvog reda, pojednostavljena teorija.

Materijal: Čelik i aluminij.

Opterećenja: Može se procijeniti čvrstoća na izvijanje i granična nosivost za jednolika uzdužna tlačno\vlačna, linearno promjenjiva poprečna tlačno\vlačna i smična opterećenja, kao i za sve moguće kombinacije opterećenja u ravnini. Bočni se tlak može definirati i za pretpostaviti je da djeluje u smjeru neprekinute ukrepe prvog reda.

Rubni uvjeti: Za sve kombinacije opterećenja slobodno oslonjeni rubovi van ravnine (slobodna rotacija, bočno spriječeni pomaci) i zglobno oslonjeni u ravnini (T(1,1,0)) su standardno pretpostavljeni za sva četiri ruba. Korisnik može po mogućnosti definirati alternativne rubne uvjete.

Element T1: Ukrepljeni panel s nestandardnom geometrijom

Područje primjene: Elementi trupa između bočnih krutih elemenata kao što su rebra, pregrade. Pravokutna ploča s proizvoljno orijentiranim ukrepama. Temelji se na linearnoj teoriji.

Ukrepe: Zavareni otvoreni profili, L profili, T profili, ravni profili.

Materijal: Čelik i aluminij.

Opterećenja: Može se procijeniti čvrstoća na izvijanje za linearno promjenjiva aksijalna i poprečna tlačno\vlačna i jednolika smična opterećenja, kao i za sve moguće kombinacije opterećenja u ravnini.

3.1.3.3. Nelinearna metoda konačnih elemenata (NMKE)

Nelinearna metoda konačnih elemenata važan je suvremeni alat u analizi ponašanja konstrukcija koje uključuju geometrijske nelinearnosti i nelinearnosti materijala. Danas se NMKE smatra dovoljno razvijenom za korištenje u dnevnoj praksi pri projektiranju konstrukcije i procjenu čvrstoće.

Međutim, treba napomenuti da rješenja metode konačnih elemenata mogu biti nevjerodostojna ako tehnike modeliranja nisu korištene pravilno. Cijeli niz znanstvenih

radova bavi se teorijom metode konačnih elemenata, ali nedostaje radova koji se bave vrstama i tehnikama modeliranja.

Problem neovisan o vremenu kod analize konačnim elementima obično se izražava sljedećom jednadžbom krutosti.

$$\{R\}=[K]\{U\} \quad (3.3)$$

Gdje je:

$\{R\}$ - vektor opterećenja

$\{U\}$ - vektor pomaka

$[K]$ - matrica krutosti

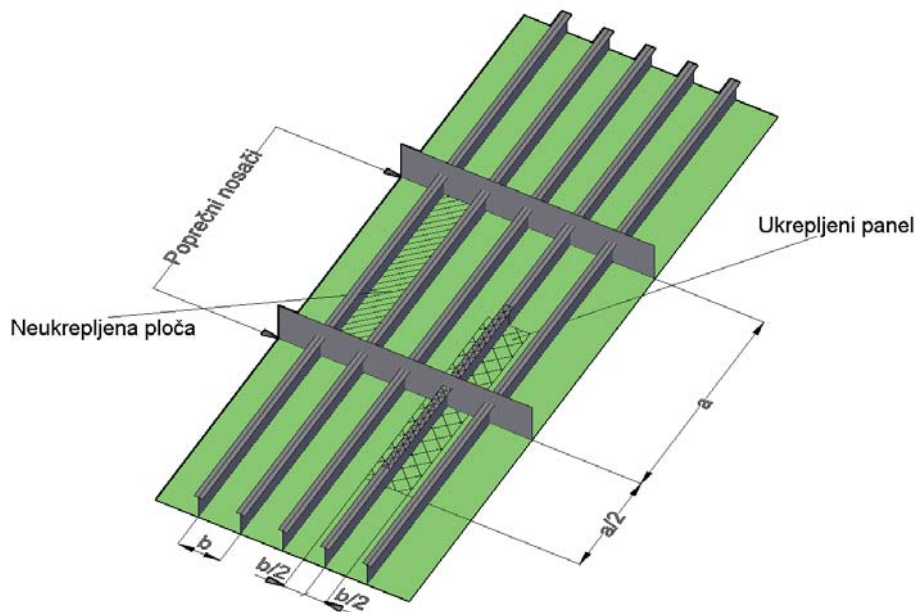
Matrica krutosti je funkcija geometrije i svojstva materijala konstrukcije. Ako su ova svojstva konstantna, problem je linearan. Ako su svojstva ovisna o $\{R\}$ ili $\{U\}$, problem je nelinearan jer se matrica $[K]$ mijenja tijekom opterećivanja konstrukcije. Kod problema kolapsa ploča i ukrepljenih panela, susreću se obje vrste nelinearnosti: geometrijska nelinearnost zbog velikih pomaka te materijalna nelinearnost uslijed nelinearnog ponašanja materijala.

Postupci rješavanja ovih nelinearnih problema su sljedeći [11]:

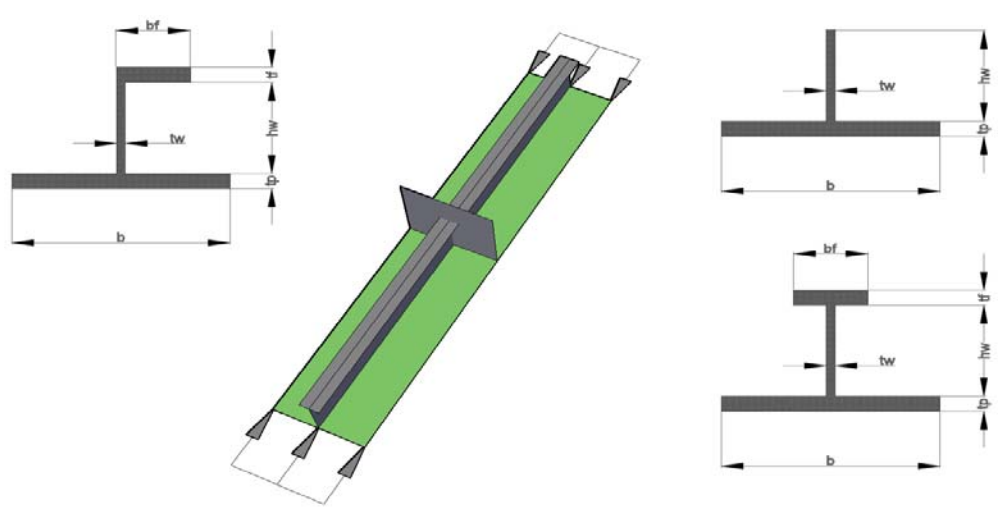
- Iterativna aproksimacija,
- Inkrementalna metoda,
- Newton-Raphsonova iteracija,
- Modificirana Newton-Raphsonova iteracija,
- Metoda duljine luka.

Opseg modela

Za analizu kolapsa (sloma) ploča korišten je model, prikazan na slici 3.9, koji se u uzdužnom smjeru prostire između dvije susjedne okvirne sponje, a u poprečnom između dva uzdužnjaka. Za analizu kolapsa ukrepljenog panela koristi se model koji uzdužno obuhvaća pola razmaka rebara prije i nakon okvirne sponje, a poprečno pola razmaka uzdužnjaka sa svake strane promatranog uzdužnjaka. Takav je model prethodno korišten i preporučen za daljnje istraživanje u radu [35].



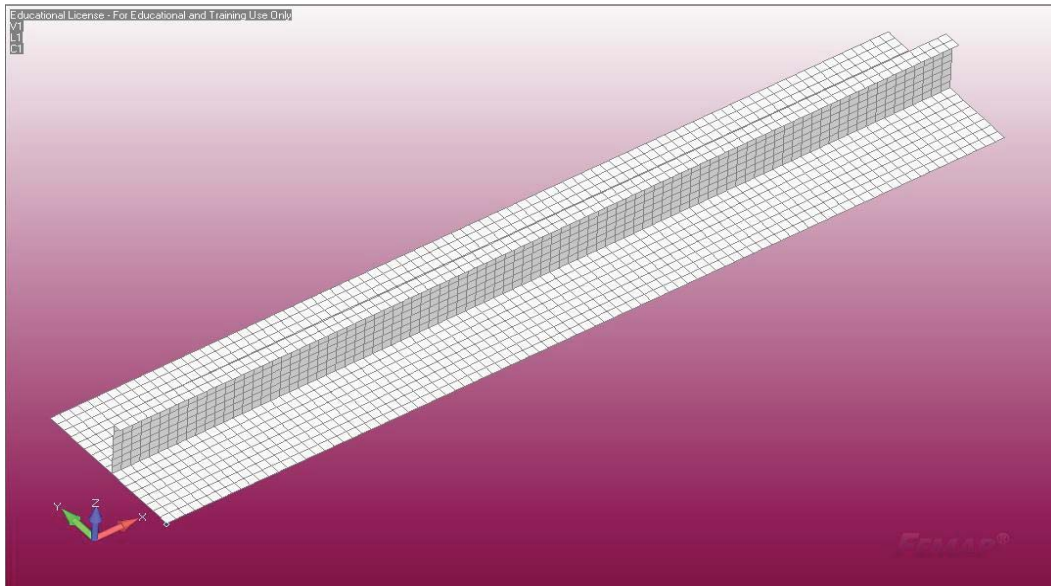
Slika 3.9 - Korišteni opseg modela ploče



Slika 3.10 - Korišteni opseg modela ukrepljenog panela palube pod jednoosnim opterećenjem s glavnim dimenzijama

Tipovi i veličina konačnih elemenata

Za nelinearnu analizu tankostijenih ili pločastih konstrukcija preferiraju se, zbog njihove veće točnosti, pravokutni u odnosu na trokutaste pločaste elemente. U dostupnoj literaturi se najčešće koriste pločasti elementi s četiri čvora, te su takvi elementi primijenjeni i u ovom radu.



Slika 3.11 - Model ukrepljenog panela s pravokutnim pločastim konačnim elementima

Iako finija mreža daje bolja i preciznija rješenja, nije nužno najbolja u praksi. Približna točnost može se dobiti i s grubljom mrežom uz značajno smanjenje računalnih troškova. U pravilu se razmatra usklađivanje između dovoljne točnosti i računalnih troškova. Zbog toga je preporučljiva jednostavna provjera konvergencije odgovarajućih nelinearnih analiza mijenjanjem veličine konačnih elemenata da bi se odredila njihova najveća prihvatljiva veličina.

U radu su korišteni elementi dimenzija 50×50 mm, što je ispitano u prethodnoj studiji [35].

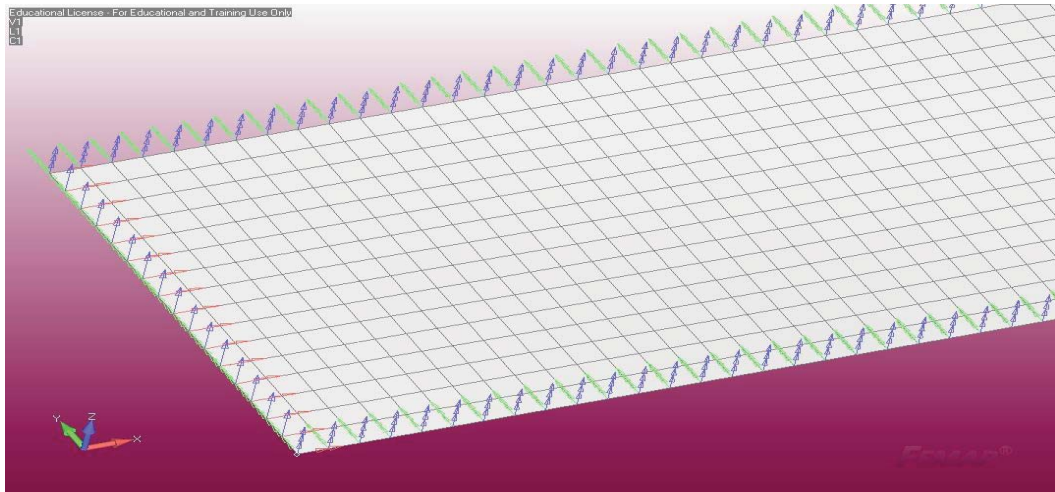
Rubni uvjeti

Kada su rubovi analizirane konstrukcije povezani sa susjednom strukturom, potrebno je pažljivo definiranje rubnih uvjeta da bi se adekvatno nadomjestilo djelovanje okolne konstrukcije. Ovaj problem je posebno izražen kod provođenja analize na malom dijelu zadane konstrukcije, stvarajući time umjetne granice. Primjerice, jaki nosač koji ne smije biti deformiran i koji sprječava pomake i/ili rotaciju može se zamijeniti krutim ograničenjem (upeti oslonac), a slabi nosač se može zanemariti (bez ograničenja-slobodno oslonjen). Međutim, kada stupanj ograničenja nije nula ni beskonačan, nužno je opreznije postavljanje rubnih uvjeta. Potrebno je dobro razumijevanje stvarnih rubnih uvjeta prije njihove idealizacije. Ako postoji nesigurnost u zadavanju stvarnih rubnih uvjeta koji bi zamijenili

naslanjajuću strukturu, potrebno je proširiti proračunski model, iako se time povećava opseg problema.

Rubni uvjeti za ploču

Rubni uvjeti mogu uvelike utjecati na čvrstoću ploče. U ovoj analizi korišten je model ploče između dva čvrsta poprečna oslonca, gdje je ploča slobodno oslonjena na uzdužnim rubovima, a ukliještena na poprečnim. Ovaj model se može koristiti kod jednoosnih opterećenja, dok je znatno složeniji model potreban kod dvoosnih opterećenja i bočnih tlakova.



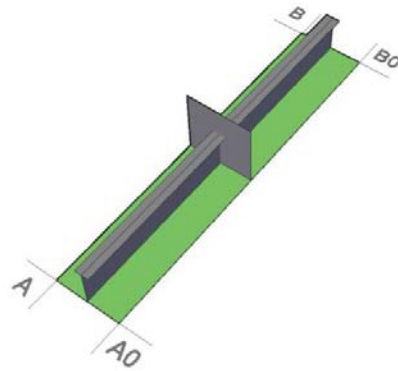
Slika 3.12 - Rubni uvjeti - ploča

Rubni uvjeti za ukrepljeni panel

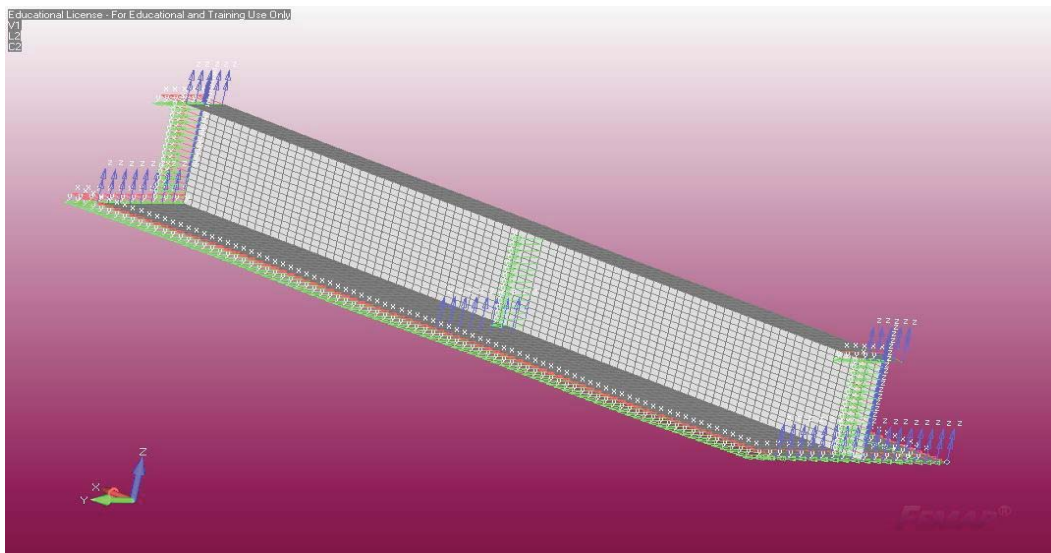
U radu su primijenjeni sljedeći rubni uvjeti za ukrepljeni panel: $T[x, y, z]$ označava translacijska ograničenja, a $R[x, y, z]$ rotacijska ograničenja s obzirom na x -, y - i z koordinatu, i to kako slijedi; "0" se odnosi na ograničenje (spriječena translacija ili rotacija), a "1" označava da nema ograničenja (slobodna translacija ili rotacije) [35].

Prema oznakama stranica strukturnog elementa prikazanih na slici 3.13:

- Simetrični uvjeti za $A-A_0$: $R[1, 0, 0]$ s tim da svi čvorovi ploče i uzdužnjaka imaju jednak pomak u smjeru x .
- Simetrični uvjeti za $B-B_0$: $T[0, 1, 1]$ i $R[1, 0, 0]$
- Simetrični uvjeti za $A-B$ i A_0-B_0 : $T[1, 0, 1]$ i $R[0, 1, 1]$
- Na mjestu poprečnjaka: $T[1, 1, 0]$ za čvorove ploče, i $T[1, 0, 1]$ za čvorove struka uzdužnjaka.



Slika 3.13 - Shematski model za definiranje rubnih uvjeta



Slika 3.14 - Rubni uvjeti - ukrepljeni panel

Inicijalne deformacije

Zavarene metalne konstrukcije uvijek imaju određene početne nepravilnosti u obliku inicijalnih deformacija i zaostalih naprezanja, koji nastaju učestalim širenjem i smanjivanjem dimenzija konstrukcije tijekom grijanja i hlađenja [38].

Tri tipa inicijalnih deformacija su bitna kod zavarenih metalnih ukrepljenih panela:

- Inicijalne deformacije opločenja između nosača,
- Gredno-štapne inicijalne deformacije nosača.
- Postranične inicijalne deformacije nosača.

Važno je napomenuti da veličina i oblik svakog tipa inicijalnih deformacija ima važnu ulogu kod kolapsnog izvijanja, stoga je bitno što bolje razumijevanje konfiguracije stvarnih deformacija. Preciznije rečeno, prije nego što počne modeliranje konstrukcije potrebno je imati informacije o inicijalnim deformacijama. Obzirom na veliki broj nepoznanica uključenih u stvaranje inicijalnih deformacija tijekom proizvodnje, u današnjoj industrijskoj pomorskoj praksi prosječna veličina inicijalnih deformacija se često pretpostavlja, a za njihov oblik se usvaja oblik elastičnog izvijanja. Potvrđeno je da inicijalne deformacije često uistinu imaju oblik elastičnog izvijanja, a također je takav oblik najnepovoljniji obzirom na elasto-plastično granično stanje konstrukcije.

Inicijalne deformacije ploče

Amplituda ili maksimalna veličina pomaka inicijalne deformacije ploče određena je kao:

w_{opl} - maksimalna vrijednost inicijalne deformacije ploče

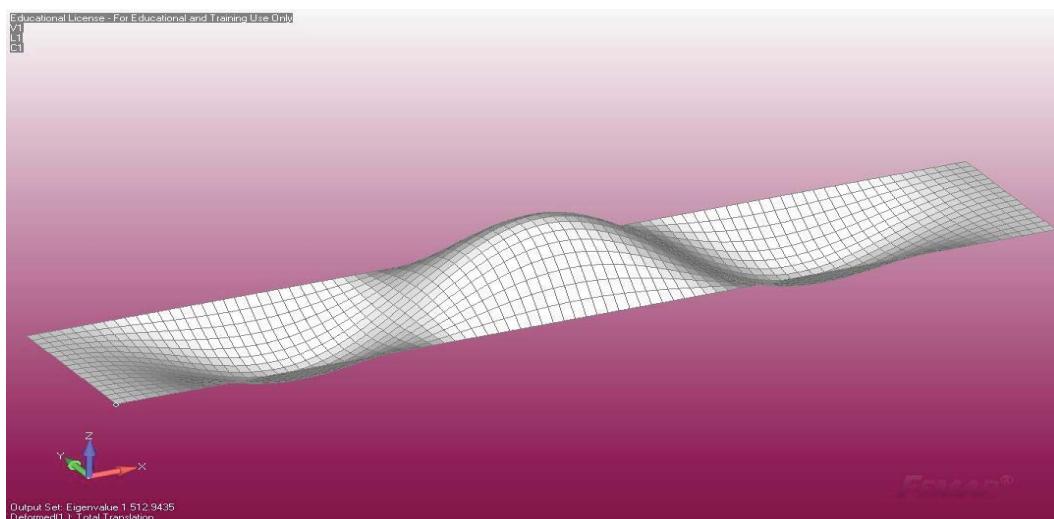
$$w_{opl} = 0.1 \cdot \beta_E^2 \cdot t_{pl} \quad (3.4)$$

gdje je:

t_{pl} - debljina ploče:

β_E - koeficijent vitkosti ploče, izraz (3.2)

Oblik inicijalnih deformacija određen je linearnom analizom elastične stabilnosti ploče. Primjer inicijalnih deformacija je prikazan na slici 3.15.



Slika 3.15 - Inicijalne deformacije ploče

Inicijalne deformacije ukrepljenog panela

Inicijalne deformacije ukrepljenog panela također trebaju imati oblik elastičnog izvijanja. Važno je napomenuti da, za razliku od analize neukrepljenih ploča, pretpostavljanje oblika inicijalnih deformacija ukrepljenih panela na osnovi rezultata linearne analize stabilnosti ne dovodi do fizikalno prihvatljivih vrijednosti granične čvrstoće. Umjesto direktnom linearnom analizom elastične stabilnosti, inicijalne deformacije ukrepljenog panela je potrebno predefinirati analitičkim izrazima koji vjerodostojno opisuju linearne oblike izvijanja. Zajedno se razmatraju tri tipa inicijalnih deformacija [37]:

- Inicijalna deformacija ploče s maksimalnim iznosom $w_{opl} = \frac{b}{200}$, te oblikom:

$$w_p = w_{opl} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi \cdot y}{b}\right) \quad (3.5)$$

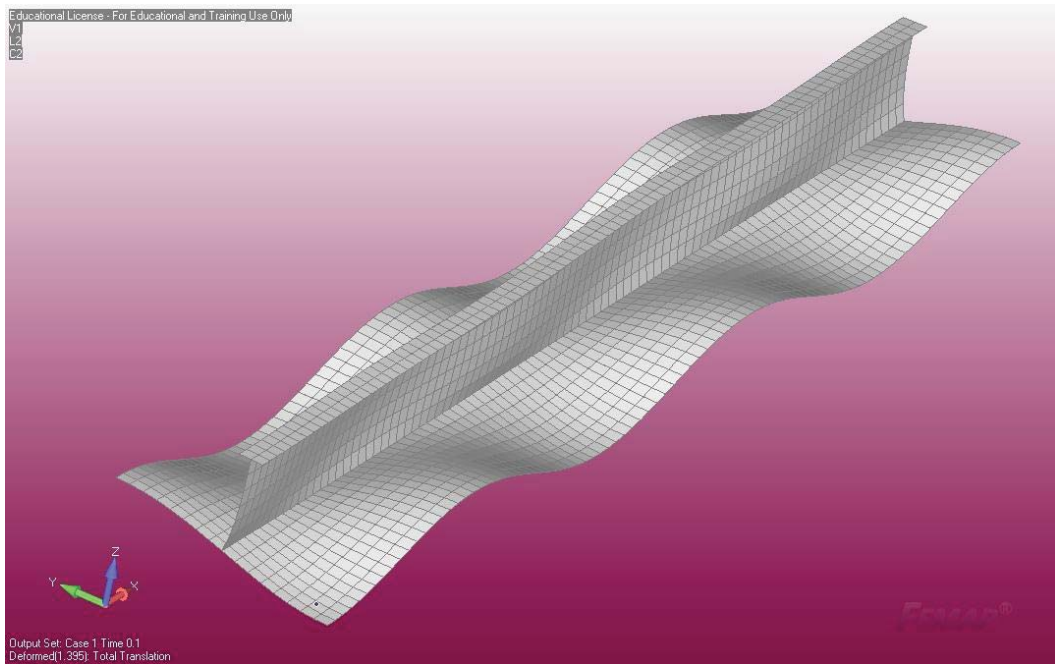
- Gredno-štapne inicijalne deformacije s maksimalnom maksimalnim iznosom $w_{oc} = \frac{a}{1000}$, te oblikom:

$$w_o^c = w_{oc} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{a}\right) \quad (3.6)$$

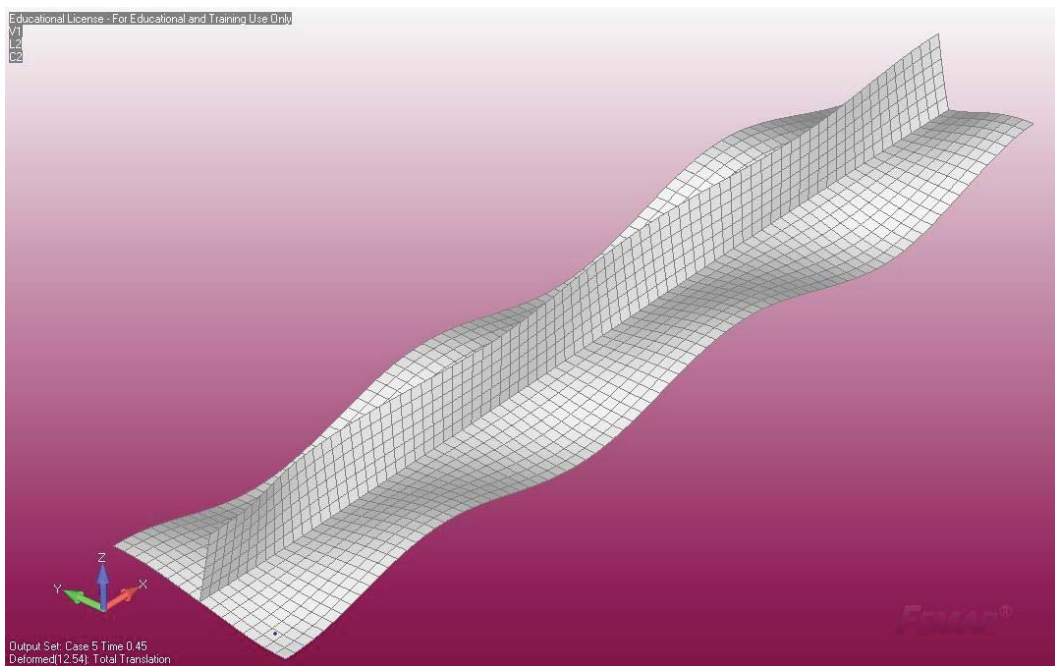
- Bočne inicijalne deformacije struka uzdužnjaka s najvećom vrijednosti inicijalne deformacije $w_{os} = \frac{a}{1000}$, te oblikom:

$$w_o^s = w_{os} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{0.5 \cdot \pi \cdot z}{h_w}\right) \quad (3.7)$$

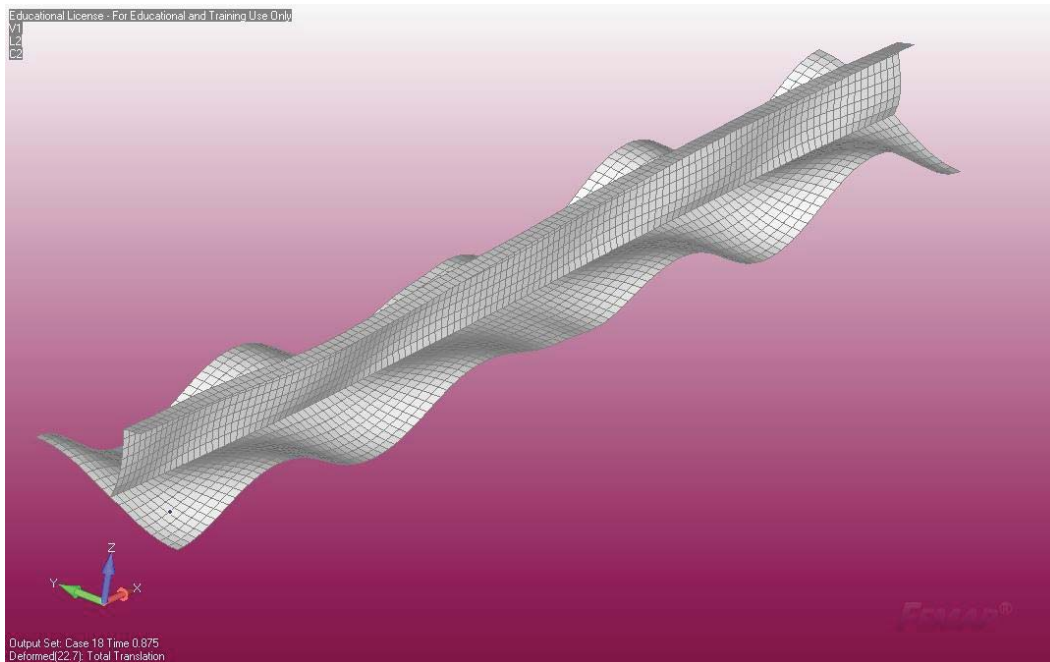
Inicijalne deformacije ploče su pretpostavljene u obliku približnom obliku izvijanja neukrepljene ploče $m = \frac{a}{b}$, dok se oblik deformacija za gredno štapne i bočne pomake pretpostavlja kao oblik izvijanja koji rezultira minimalnom otpornošću uzdužnjaka na izvijanje. (m predstavlja broj polu-valova izvijanja koji kod dugačkih ploča ovisi samo o omjeru duljina stranica a i b). Ukupne inicijalne deformacije modela su pokazane na slikama 3.16, 3.17 i 3.18.



Slika 3.16 - Inicijalne deformacije T-profila



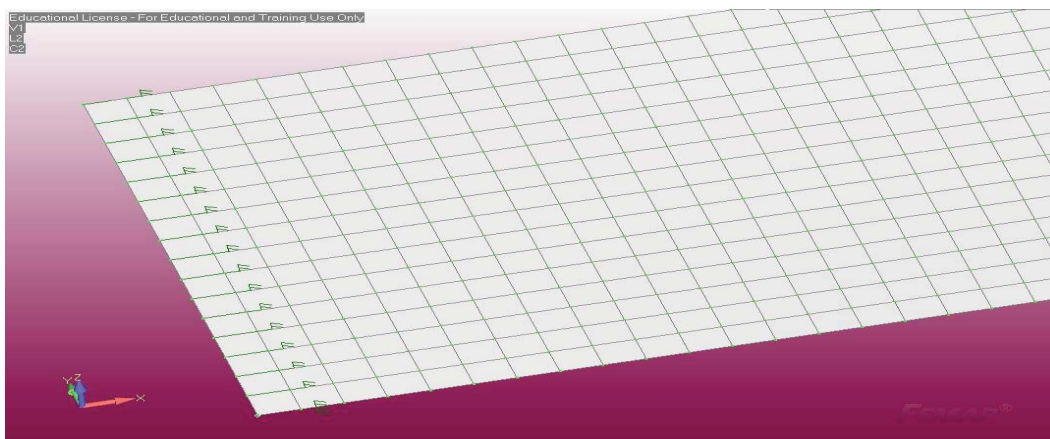
Slika 3.17 - Inicijalne deformacije ravnog profila



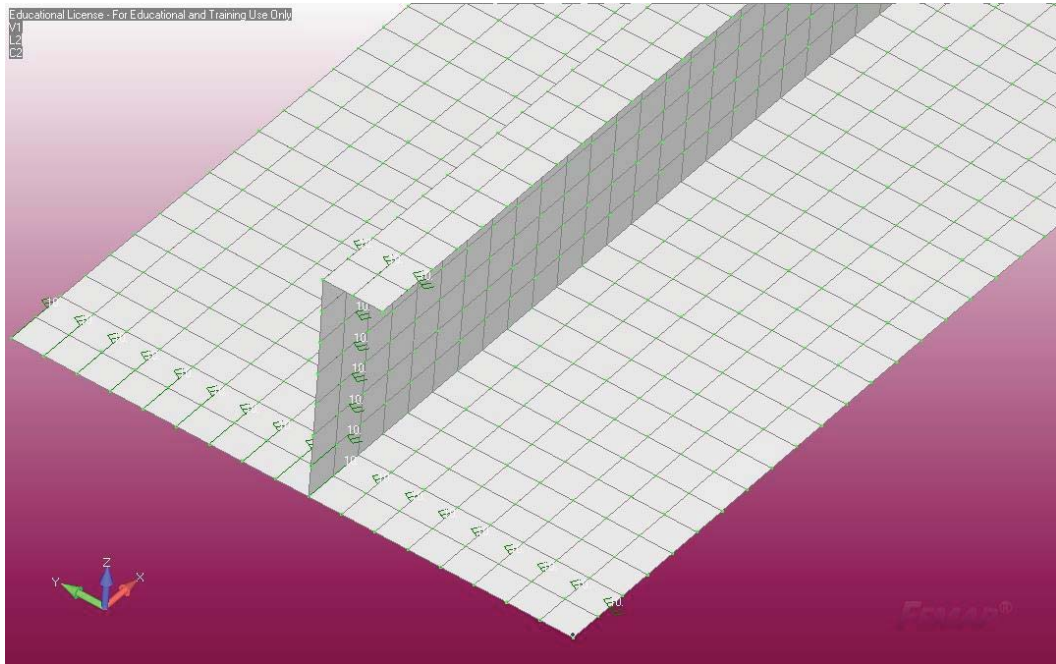
Slika 3.18 - Inicijalne deformacije L-profila

Opterećenja

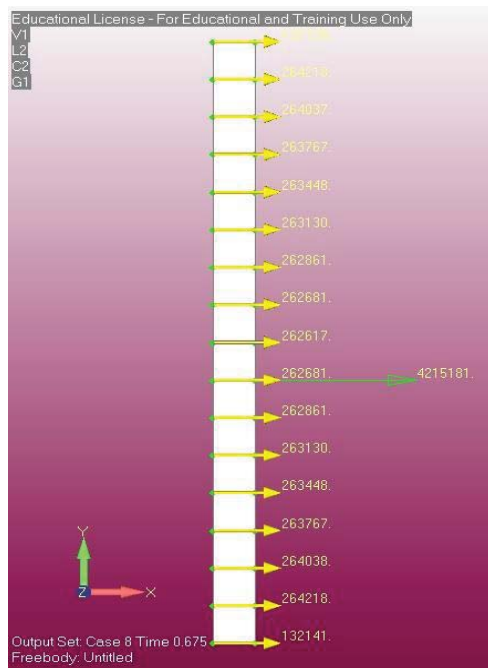
Opterećenje je nametnuto u vidu prisilnih pomaka na jednom od dva kraća ruba (slike 3.19 i 3.20). Pomaci se povećavaju postepeno rezultirajući koncentriranom silom s obzirom na spriječene stupnjeve slobode (Slika 3.21 i 3.22). Ukupna sila podijeljena je s površinom kraćeg ruba što daje prosječno primijenjeno naprezanje. Kolapsnu čvrstoću predstavlja najveće naprezanje koje se javlja u takvom postupku inkrementalnog povećavanja rubnih pomaka.



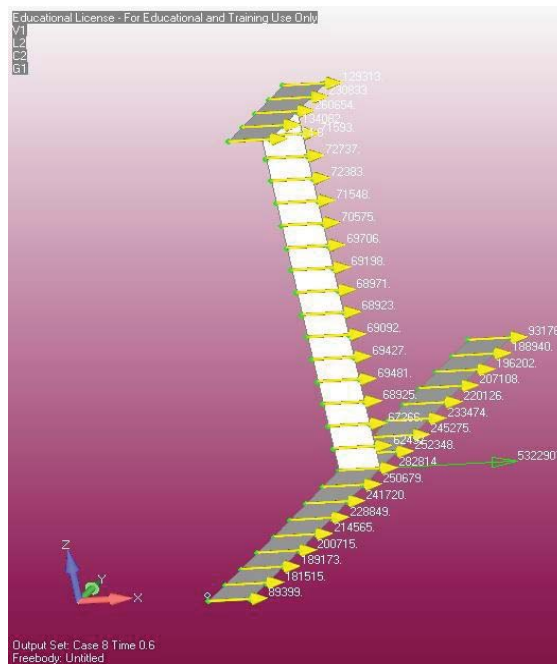
Slika 3.19 - Narinuto opterećenje-ploča



Slika 3.20 - Narinuto opterećenje-ukrepljeni panel



Slika 3.21 - Rezultirajuća sila-ploča



Slika 3.22 - Rezultirajuća sila-ukrepljeni panel

Programski paket Femap s NX Nastranom

Za modeliranje ploča i ukrepljenih panela te prikaz rezultata u radu je korišten program FEMAP (Finite Element Modeling and Postprocessing), koji predstavlja napredni inženjerski softver za izradu modela konačnih elemenata kompleksnih inženjerskih proizvoda i sustava te za prikazivanje rezultata njihovih proračuna [52]. Za rješavanje nelinearnog sustava jednadžbi iterativno-inkrementalnim postupkom korišten je NX Nastran. Do sada u literaturi nisu objavljeni proračuni ovakvog tipa provedeni u FEMAPu s NX Nastranom te je s te strane predočeno istraživanje inovativno.

3.1.4. Usporedba metoda

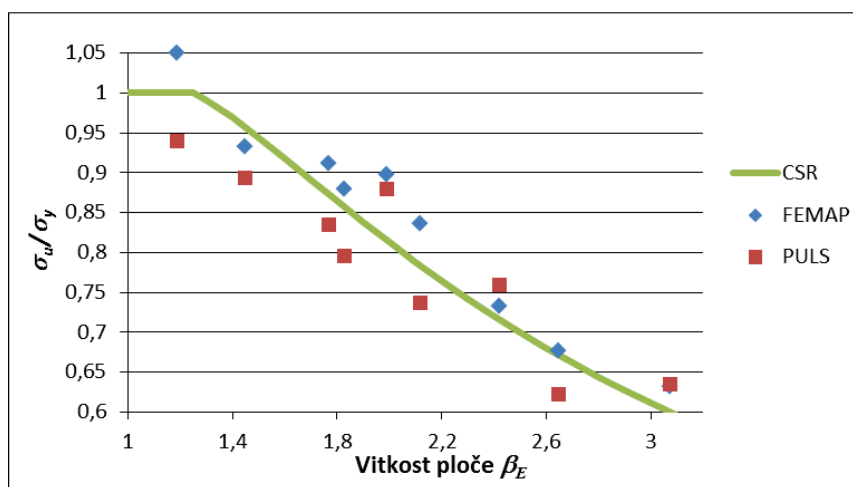
Ploče

U prvom dijelu analize razmatrano je devet ploča, od tri različite vrste materijala i za svaki materijal tri debljine, kako je prikazano u tablici 3.1. Vrijednost vitkosti ploča β_E u rasponu je od 1.19 do 3.075, što predstavlja raspon vitkosti koji se javlja u praksi. Sve ploče su dimenzija 4300×815 mm. Tablica 3.1 prikazuje rezultate granične čvrstoće dobivene metodom konačnih elemenata, programom PULS i Franklandovom formulom (CSR). Iz usporedbe je vidljivo da je postignuta odlična podudarnost rezultata dobivenih svim trima

metodama. Time se potvrđuje pouzdanost korištene NMKE. Srednja vrijednost postotnog omjera granične čvrstoće NMKE u odnosu na CSR iznosi 3.9%, dok je standardna devijacija odstupanja 3.6%. Maksimalno odstupanje NMKE u odnosu na CSR iznosi 10.2%.

Tablica 3.1 - Usporedba NMKE, CSR & PULS za različite debljine i vrste materijala

| debljina t_{pl} mm | materijal | vitkost β_E | $\left(\frac{\sigma_U}{\sigma_Y}\right)_{CSR}$ | $\left(\frac{\sigma_U}{\sigma_Y}\right)_{FEMAP}$ | $\left(\frac{\sigma_U}{\sigma_Y}\right)_{PULS}$ | $\frac{\sigma_U_{FEMAP}}{\sigma_U_{CSR}}, \%$ |
|----------------------------|-----------|----------------------|--|--|---|---|
| 15 | GR.A | 1.83 | 0.85 | 0.88 | 0.796 | 3.53 |
| 19 | GR.A | 1.45 | 0.957 | 0.933 | 0.894 | -2.51 |
| 23 | GR.A | 1.19 | 1.01 | 1.05 | 0.940 | 3.96 |
| 12 | AH32 | 2.65 | 0.672 | 0.677 | 0.622 | 0.74 |
| 15 | AH32 | 2.12 | 0.783 | 0.836 | 0.737 | 6.77 |
| 18 | AH32 | 1.77 | 0.872 | 0.912 | 0.835 | 4.59 |
| 11 | AH36 | 3.075 | 0.6 | 0.632 | 0.635 | 5.33 |
| 14 | AH36 | 2.42 | 0.716 | 0.733 | 0.759 | 2.37 |
| 17 | AH36 | 1.99 | 0.815 | 0.898 | 0.879 | 10.18 |



Slika 3.23 - Usporedba rezultata za graničnu čvrstoću panela palube tankera prema različitim metodama

Ukrepljeni paneli

Osam ukrepljenih panela, svi od istog materijala - čelika povišene čvrstoće AH32, analizirano je nelinearnom analizom metodom konačnih elemenata koristeći program NX Nastran. Razmatrana su tri tipa ukrepa: ravni profili, L-profil i T-profil. Geometrijske

karakteristike ukrepljenih panela, u milimetrima, kao i rezultati nelinearne analize konačnih elemenata za procjenu granične čvrstoće prikazani su u tablici 3.2. Granična čvrstoća σ_U za osam ukrepljenih panela izračunata NMKE u rasponu je od $0.60 \sigma_Y$ do $0.83 \sigma_Y$.

Tablica 3.2 - Geometrijske karakteristike osam ukrepljenih panela i rezultati NMKE

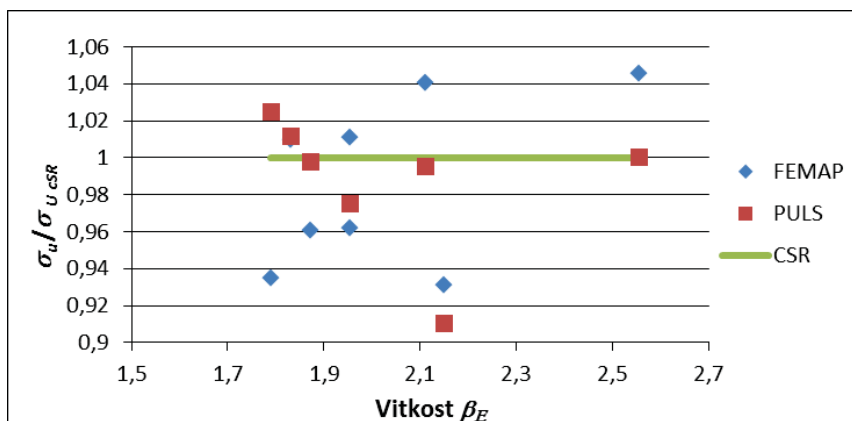
| Panel br. | a | b | t | h_w | t_w | h_f | t_f | Tip ukrepe | $(\frac{\sigma_U}{\sigma_Y})_{FEMAP}$ |
|-----------|------|-----|------|-------|-------|-------|-------|------------|---------------------------------------|
| 1 | 2630 | 715 | 13 | 155 | 12 | 0 | 0 | FB | 0.600 |
| 2 | 3500 | 810 | 15 | 300 | 11 | 90 | 16 | L | 0.830 |
| 3 | 3840 | 820 | 17.5 | 251.6 | 11 | 50.8 | 28.4 | L | 0.798 |
| 4 | 4300 | 815 | 17.8 | 463 | 8 | 172 | 17 | T | 0.799 |
| 5 | 4500 | 850 | 17 | 350 | 11 | 90 | 16 | L | 0.818 |
| 6 | 4500 | 850 | 17 | 350 | 11 | 90 | 16 | T | 0.776 |
| 7 | 5500 | 910 | 19 | 400 | 12 | 100 | 18 | L | 0.783 |
| 8 | 6500 | 850 | 13 | 350 | 11 | 90 | 16 | L | 0.719 |

Usporedba rezultata dobivenih pomoću NMKE, programa PULS i CSR za osam ukrepljenih panela iz tablice 3.2 prikazana je u tablici 3.3. Usporedba rezultata je također prikazana grafički na slikama 3.24 i 3.25 u ovisnosti o β_E i λ .

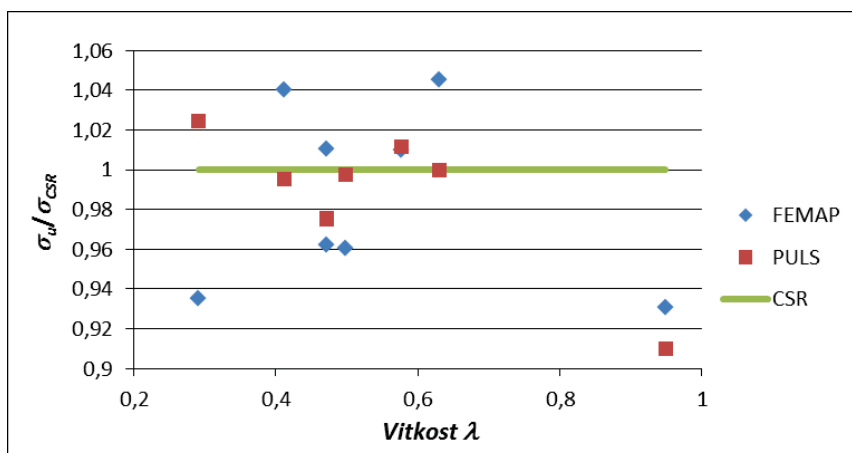
Tablica 3.3 - Usporedba rezultata dobivenih na temelju NMKE, CSR & PULS za ukrepljene panele

| Panel br. | β_E | λ | $(\frac{\sigma_U}{\sigma_Y})_{FEMAP}$ | $(\frac{\sigma_U}{\sigma_Y})_{CSR}$ | $(\frac{\sigma_U}{\sigma_Y})_{PULS}$ | $\frac{\sigma_U_{FEMAP}}{\sigma_U_{CSR}}, \%$ |
|-----------|-----------|-----------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | 2.15 | 0.948 | 0.600 | 0.645 | 0.587 | -6.91 |
| 2 | 2.11 | 0.412 | 0.830 | 0.798 | 0.794 | 4.04 |
| 3 | 1.83 | 0.577 | 0.798 | 0.791 | 0.800 | 0.98 |
| 4 | 1.79 | 0.291 | 0.799 | 0.855 | 0.876 | -6.49 |
| 5 | 1.95 | 0.472 | 0.818 | 0.810 | 0.790 | 1.07 |
| 6 | 1.95 | 0.472 | 0.776 | 0.807 | 0.787 | -3.80 |
| 7 | 1.87 | 0.498 | 0.783 | 0.815 | 0.813 | -3.94 |
| 8 | 2.55 | 0.630 | 0.719 | 0.688 | 0.688 | 4.54 |

Postignuto je veoma dobro podudaranje rezultata kolapsne čvrstoće ukrepljenih panela dobivene različitim metodama. Najveća razlika između rezultata dobivenih pomoću NMKE i CSR je nešto manja od 7%, što je zadovoljavajuće s inženjerskog stanovišta. Srednja vrijednost postotnog omjera granične čvrstoće NMKE u odnosu na CSR iznosi -0.33%, dok je standardna devijacija odstupanja 4.52%.



Slika 3.24 - Usporedba metoda s obzirom na β



Slika 3.25 - Usporedba metoda s obzirom na λ

Na osnovi usporedbe rezultata triju metoda, može se zaključiti da oni dobiveni metodom NMKE za ploče i ukrepljene panele imaju veliku podudarnost s rezultatima iz Usuglašenih pravila i programom PULS, što je bio osnovni cilj provedene komparativne analize.

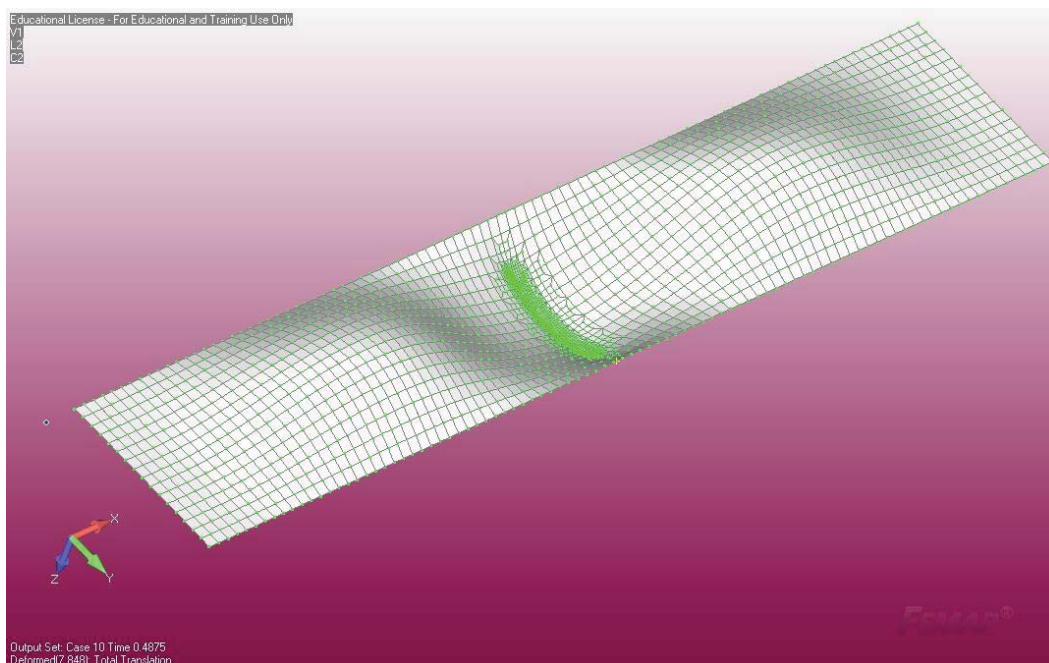
3.2. Primjena metoda na provjeru nosivosti ukrepljenih panela i ploča sa zamornim pukotinama, te rupičastom korozijom i korozijom u žlijebu zavarenog spoja

U poglavlju 3.1 pokazano je da je nelinearna analiza metodom konačnih elemenata učinkovita, primjenjiva i da se može efikasno iskoristiti u praksi za ocjenu sigurnosti nekorodiranih te jednoliko korodiranih ploča i ukrepljenih panela. Prednosti ove metode u

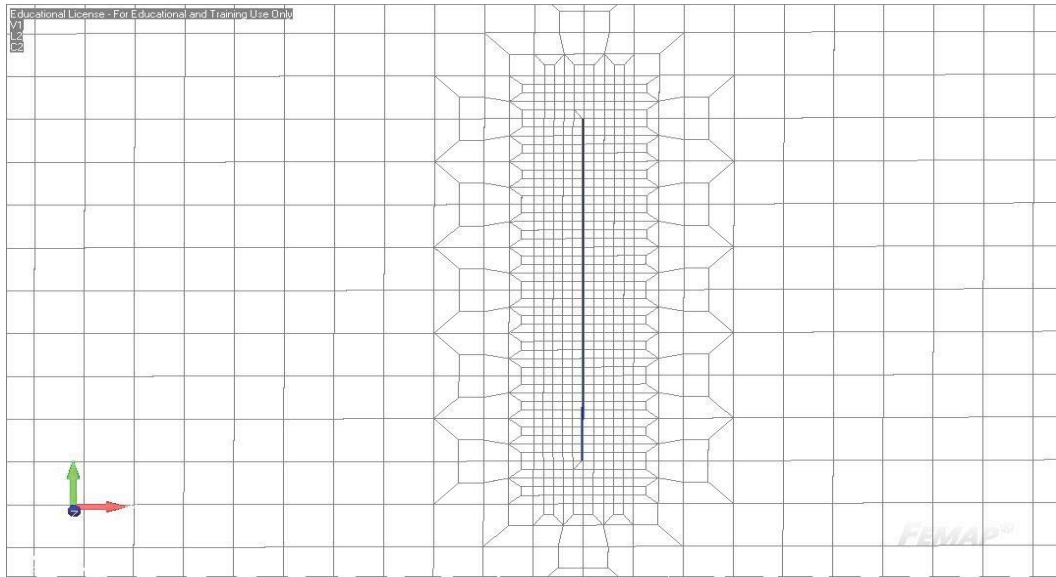
odnosu na analitičke formule iz Usuglašanih pravila i programa PULS je niz mogućnosti promjene parametara i uvjeta opterećenja koji se događaju brodu tijekom plovidbe, a nisu uključena u pojednostavljenu analizu prema pravilima klasifikacijskih društava. Pojave kao što su pukotine na ploči, pukotine na ukrepljenom panelu, žljebasta korozija (grooving), te rupičasta korozija (pitting) često se susreću na brodu u službi nakon više godina u eksploataciji. Ovakvi uvjeti se mogu simulirati pomoću nelinearne analize metodom konačnih elemenata, a zatim i proračunavati, što s ostale dvije metode nije slučaj. U narednim potpoglavljima 3.21-3.24 prikazane su neke od tih pojava i pokazano je kako utječu na čvrstoću panela palubne konstrukcije.

3.2.1. Pukotina ploče

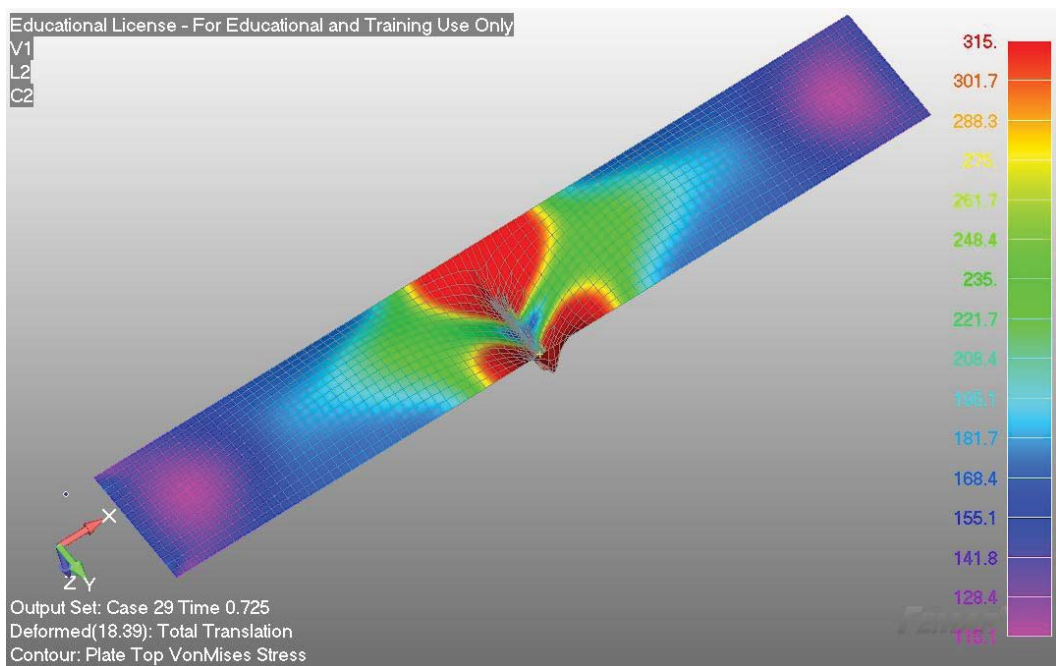
Simulirana je pojava pretpostavljene pukotine širine 200 mm, te širine 400 mm. Model i prikaz von Misesovih napreznja u trenutku kolapsa su dani na slikama 3.26-3.30. Također su prikazane krivulje koje predočavaju odnos napreznja i deformacija za krajnje djelujuće opterećenje prije sloma ("load-end shortening curves") na slici 3.31. Na slici 3.31 se može primjetiti degradirajući utjecaj pukotina na graničnu čvrstoću i na sam izgled krivulja.



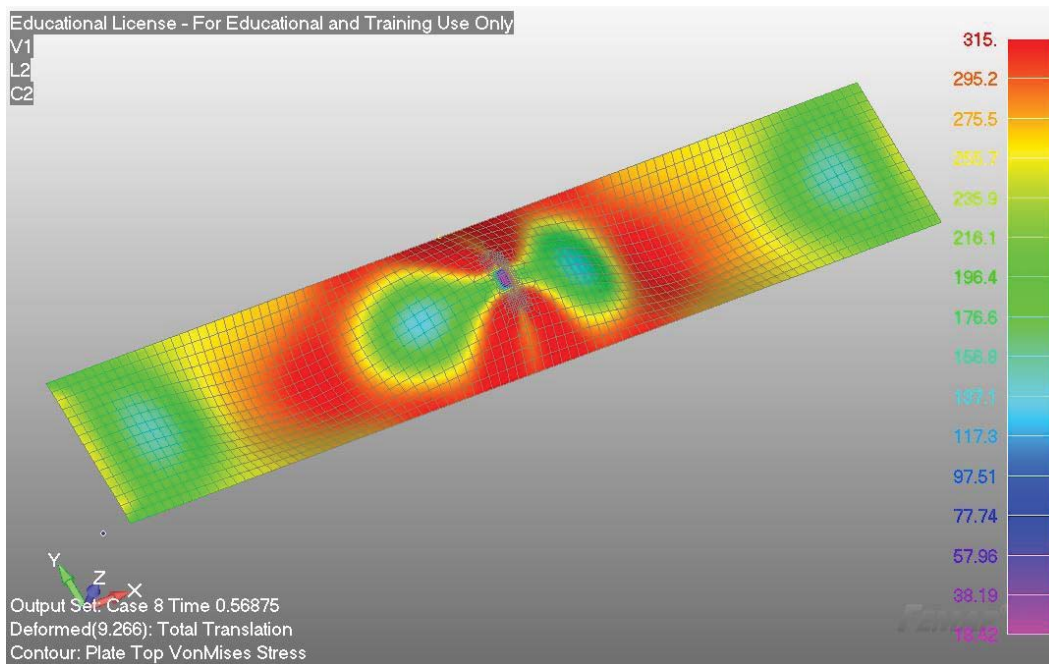
Slika 3.26 - Prikaz pukotine ploče s finijom mrežom konačnih elemenata



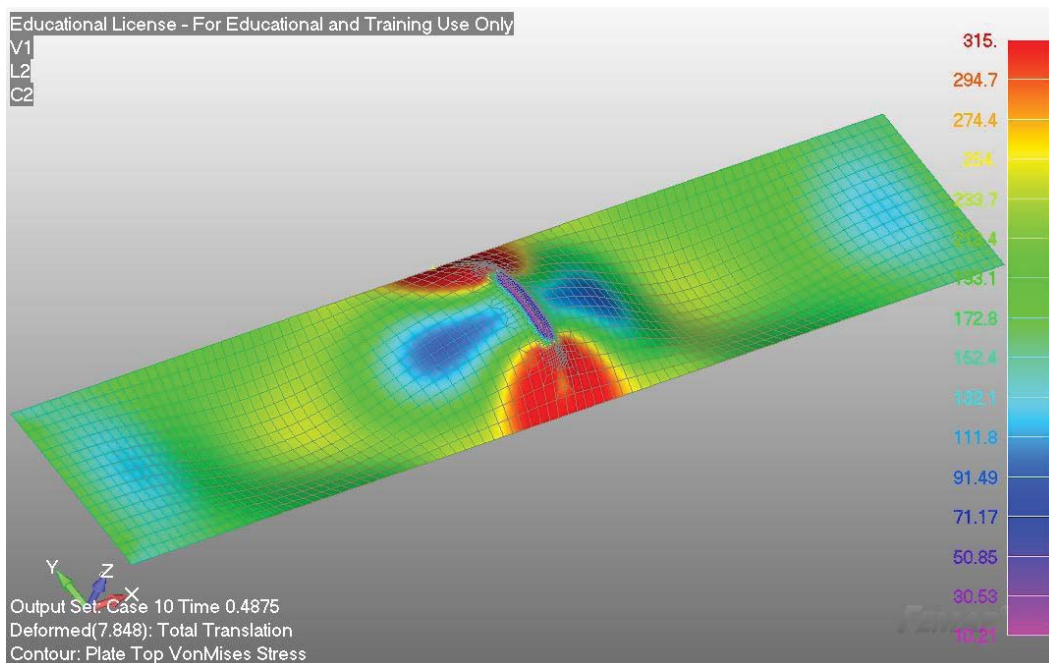
Slika 3.27 - Uvećani prikaz pukotine ploče s finijom mrežom konačnih elemenata



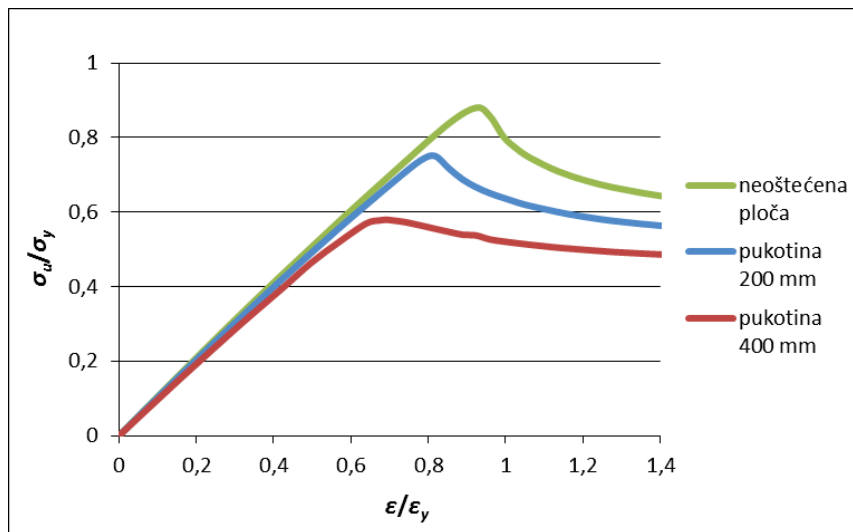
Slika 3.28 - Porast naprežanja kod ploče s pukotinom



Slika 3.29 - Kolaps ploče s pukotinom od 200 mm



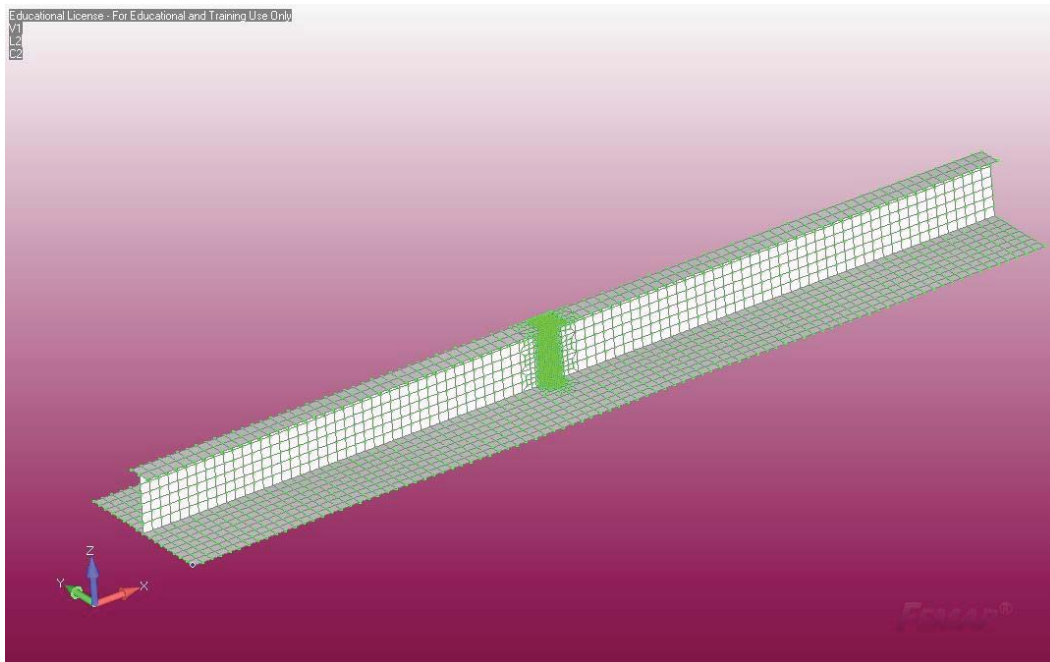
Slika 3.30 - Kolaps ploče s pukotinom od 400 mm



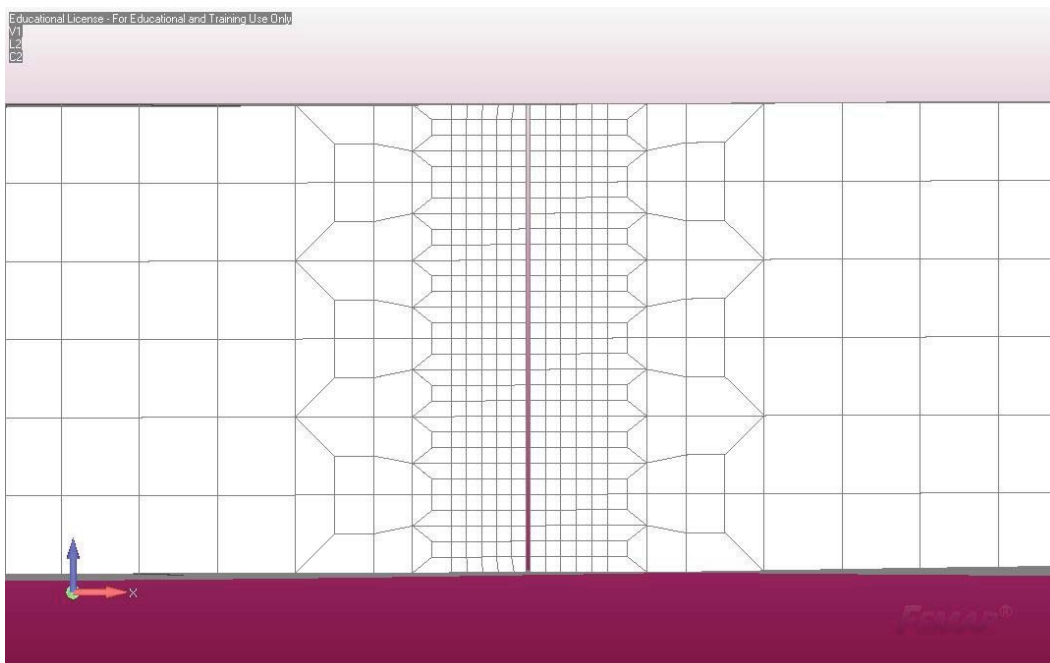
Slika 3.31 - Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za ploču s pukotinom dužine 200 mm, 400 mm i neoštećenu ploču

3.2.2. Pukotina ukrepljenog panela

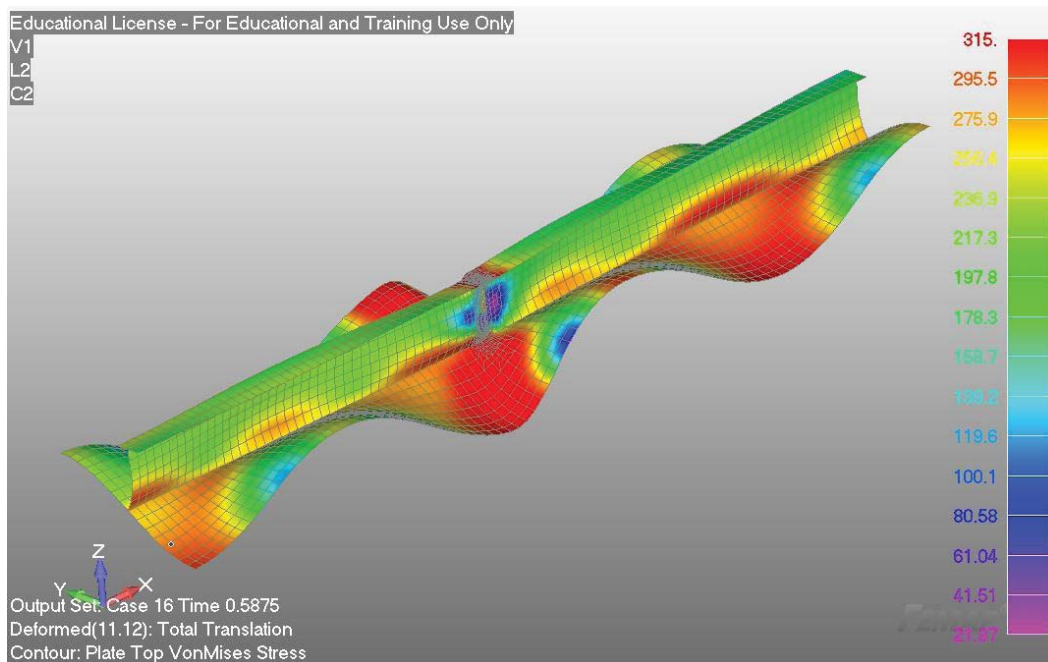
Jedna od čestih pojava kod brodova u službi nakon godina eksploatacije je pojava pukotine na uzdužnjaku u blizini poprečne oslanjajuće strukture. Pretpostavljena je i modelirana pukotina u iznosu polovice visine struka uzdužnjaka, te po cijeloj visini struka uzdužnjaka. Model i osnovni rezultati se mogu vidjeti na slikama 3.32-3.35. Krivulje koje predočavaju odnos naprezanja i deformacija za krajnje djelujuće opterećenje prije sloma predočene su na slici 3.36.



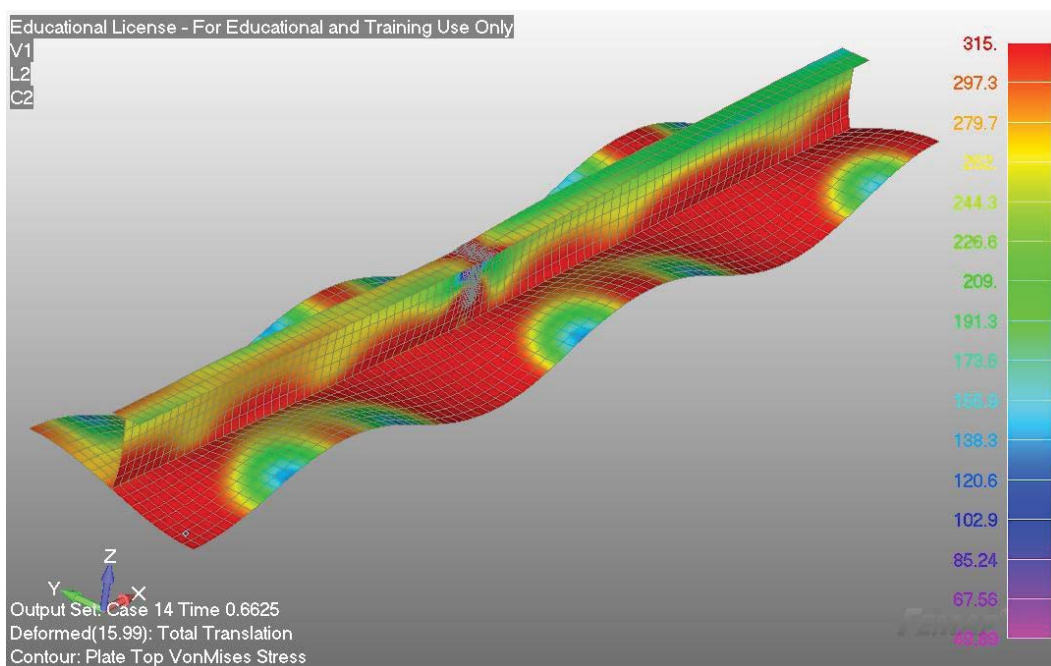
Slika 3.32 - Prikaz pukotine uzdužnjaka s finijom mrežom konačnih elemenata



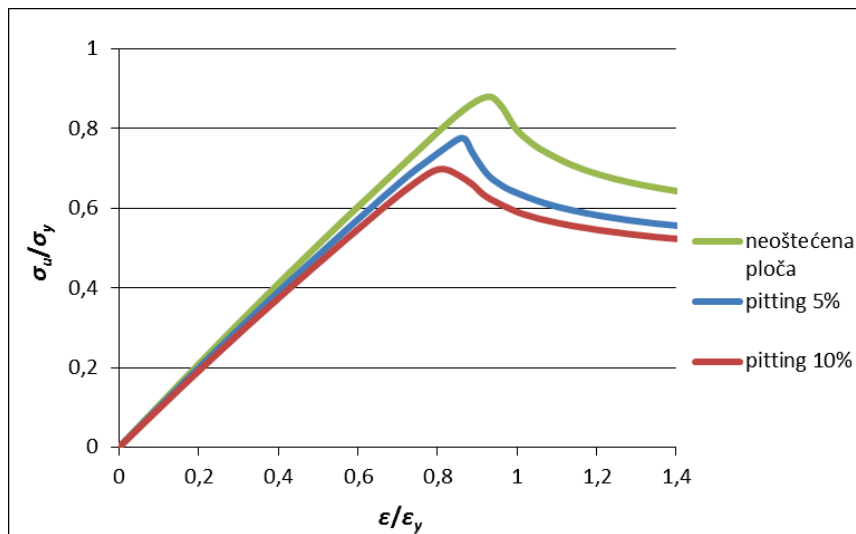
Slika 3.33 - Uvećani prikaz pukotine struka uzdužnjaka s finijom mrežom konačnih elemenata



Slika 3.34 - Kolaps panela s pukotinom duž cijele širine struka uzdužnjaka



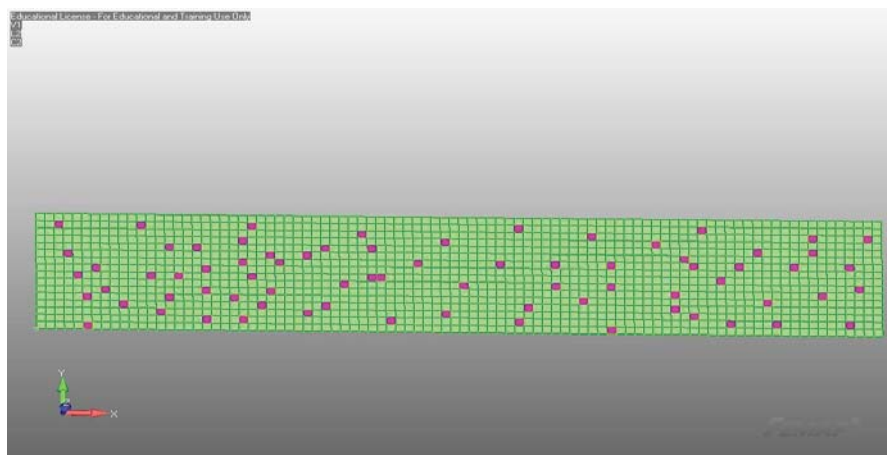
Slika 3.35 - Kolaps panela s pukotinom duž pola širine struka uzdužnjaka



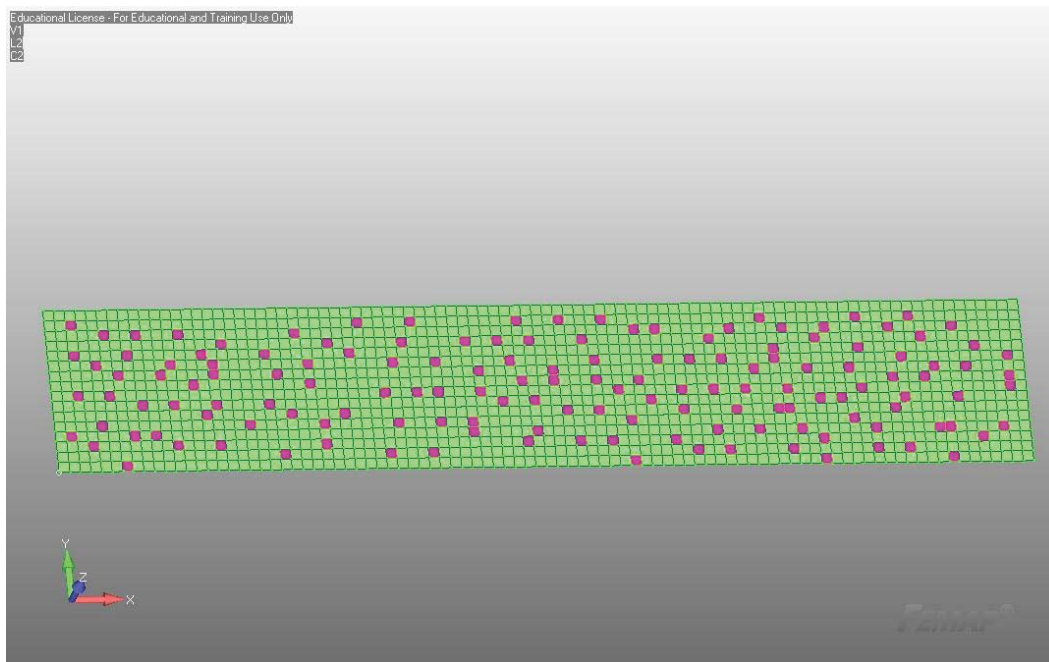
Slika 3.36 - Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za ukrepljeni panel s pukotinom dužine kroz pola struka uzdužnjaka, cijeli struk uzdužnjaka, i neoštećeni panel

3.2.3. Rupičasta korozija ploče (pitting)

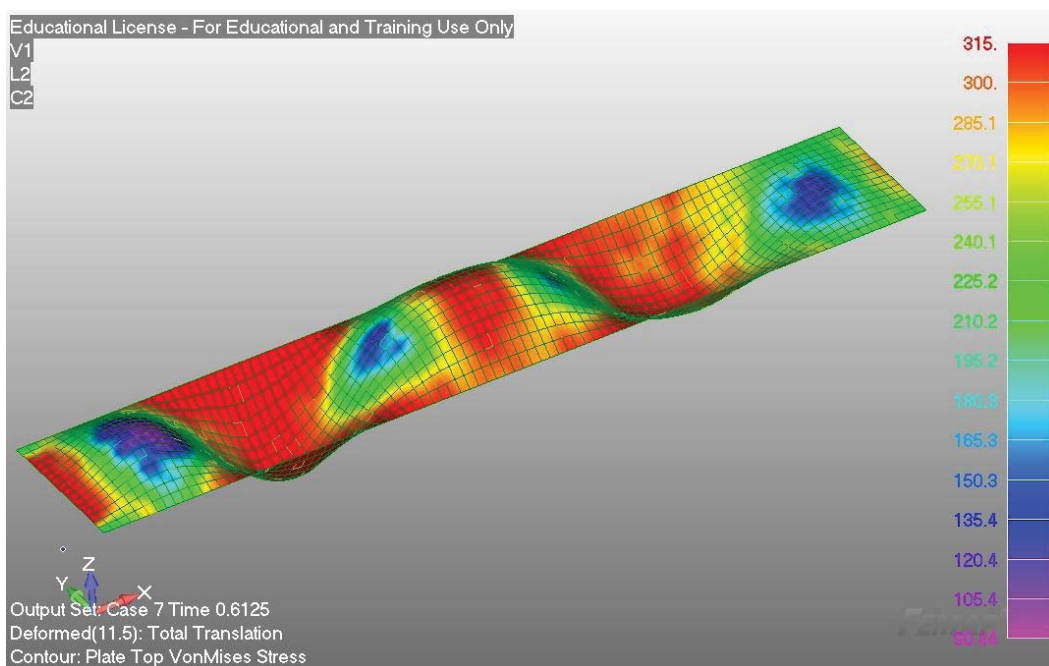
Rupičasta korozija je simulirana smanjenjem debljine materijala ploče na mjestu rupica za pola, i to na 5% ukupne površine ploče te 10% ukupne površine. Model i rezultati su vidljivi na slikama 3.37-3.40. Krivulje koje predočavaju odnos napreznanja i deformacija za krajnje djelujuće opterećenje prije sloma prikazane su na slici 3.41.



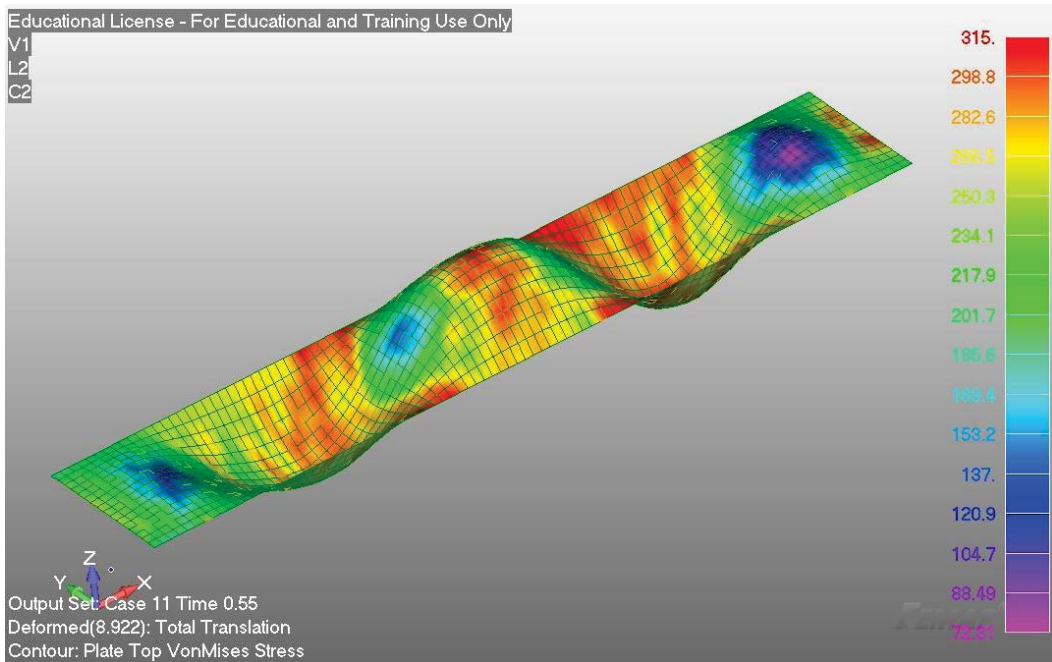
Slika 3.37 - Rupičasta korozija ploče, 5% površine



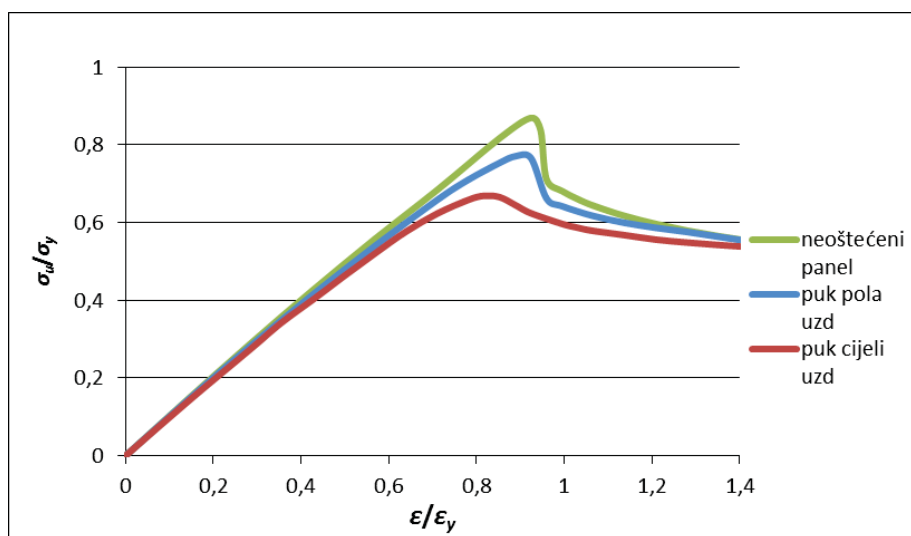
Slika 3.38 - Rupičasta korozija ploče, 10% površine



Slika 3.39 - Kolaps ploče s 5% rupičaste korozije



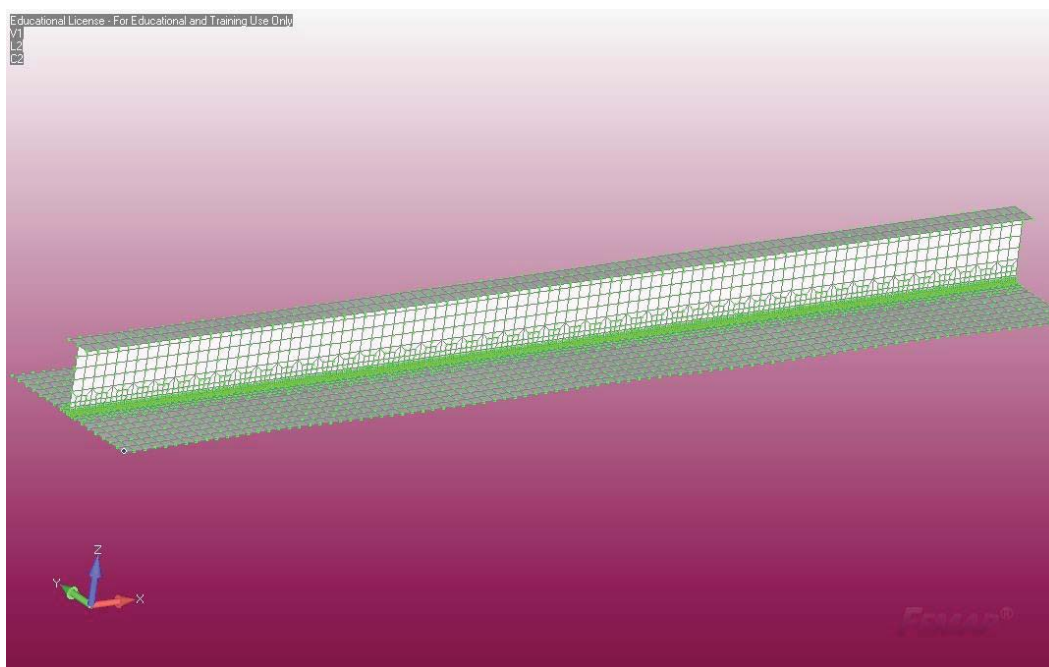
Slika 3.40 - Kolaps ploče s 10% rupičaste korozije



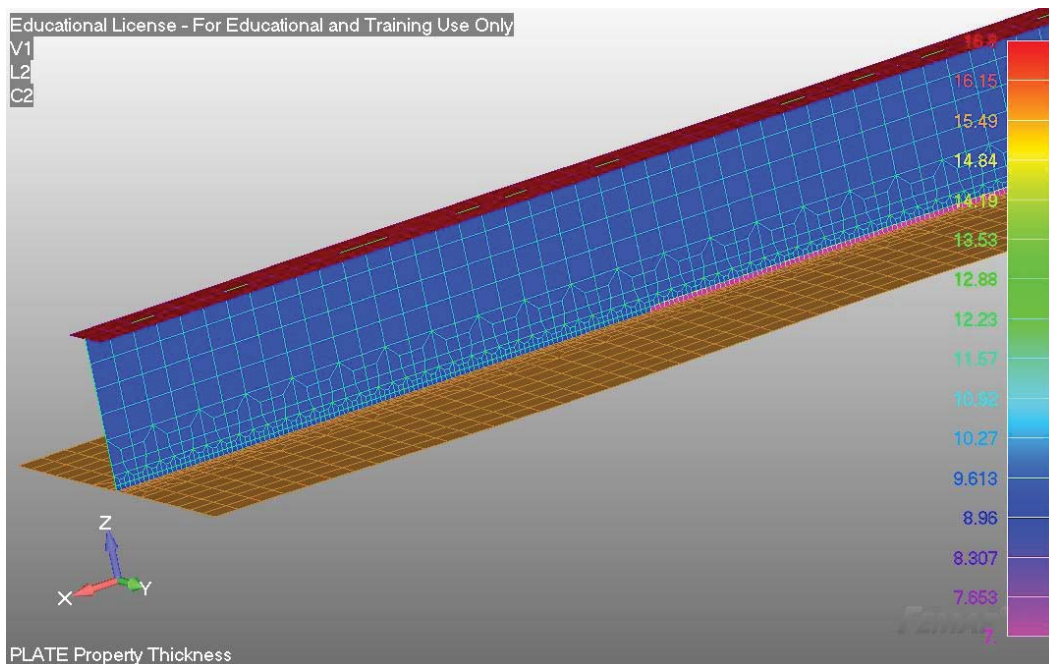
Slika 3.41 - Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za ploču s rupičastom korozijom koja obuhvaća 5% površine, 10% površine i neoštećenu ploču

3.2.4. Žljebasta korozija (grooving)

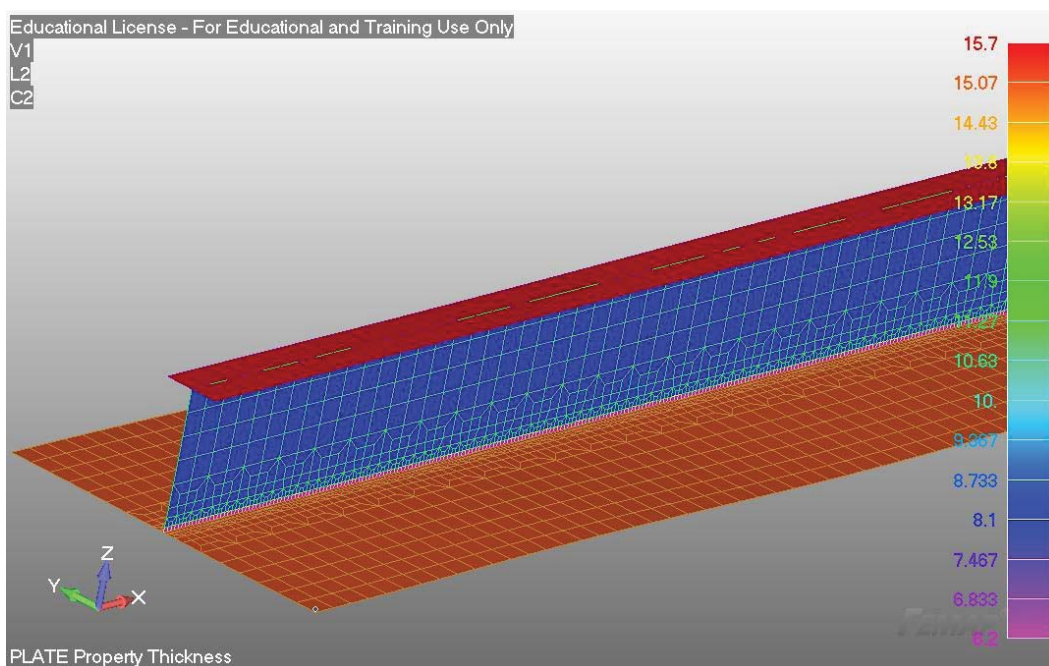
Korozija u žlijebu zavarenog spoja je simulirana smanjenjem debljine struka uzdužnjaka za 25% na spoju s pločom duž pola duljine uzdužnjaka, odnosno smanjenjem debljine struka uzdužnjaka za 25% duž cijele duljine uzdužnjaka. Na slikama 3.42, 3.43 i 3.44 može se vidjeti prikaz finije mreže konačnih elemenata u području zavora uzdužnjaka i ploče, gdje se pojavljuje žljebasta korozija. Naprezanja na deformiranom modelu u trenutku kolapsa su prikazana na slikama 3.45 i 3.46. Također su prikazane krivulje koje predočavaju odnos naprezanja i deformacija za krajnje djelujuće opterećenje prije sloma na slici 3.47. Na slici se može primjetiti da korozija u žlijebu zavora ima najmanji utjecaj na graničnu čvrstoću od svih razmatranih načina oštećenja panela.



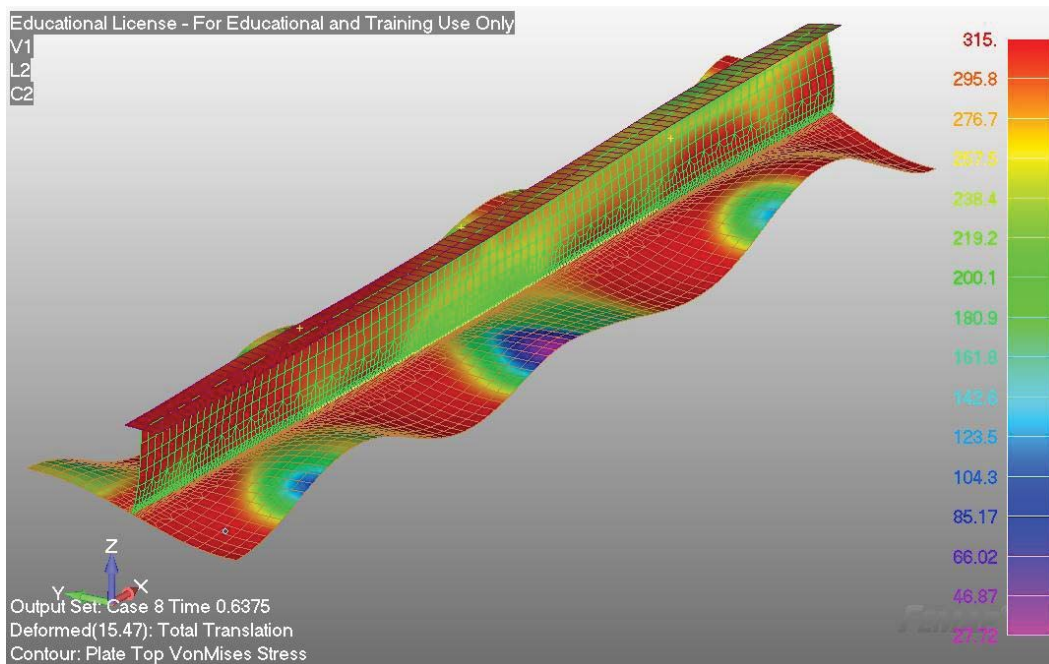
Slika 3.42 - Žljebasta korozija u području zavora



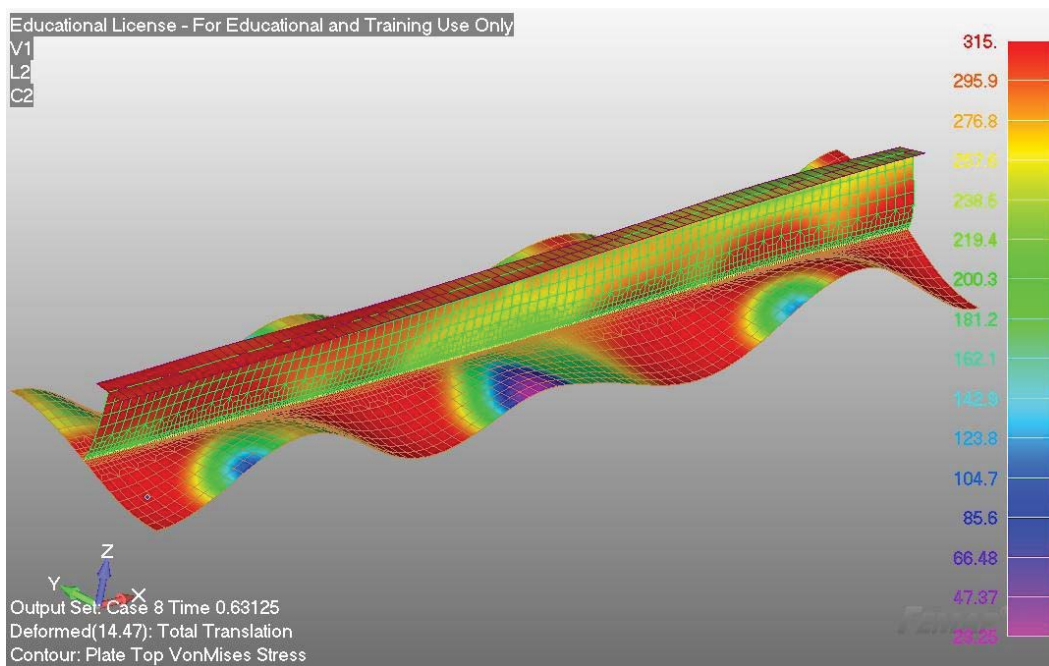
Slika 3.43 - Žljebasta korozija u području zavora duž pola duljine struka uzdužnjaka



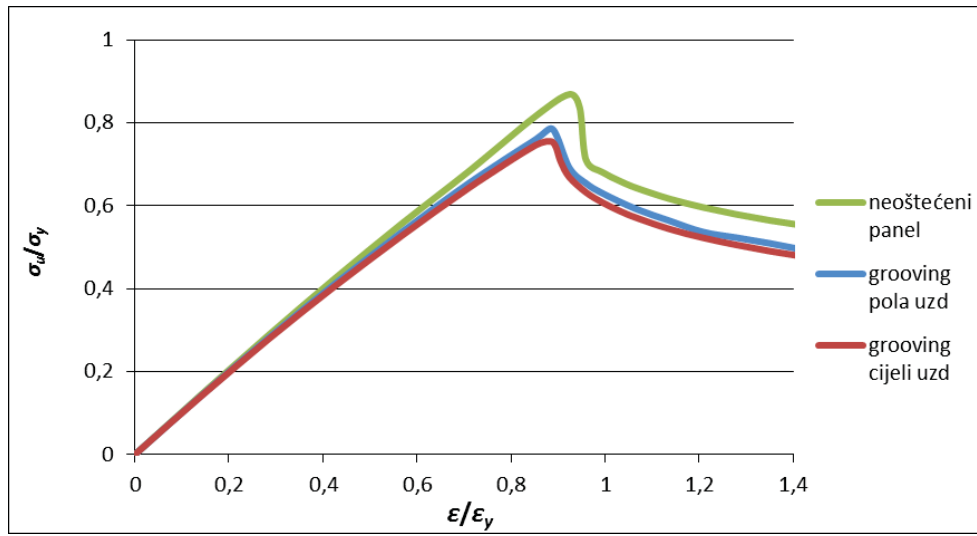
Slika 3.44 - Žljebasta korozija u području zavora duž cijele duljine struka uzdužnjaka



Slika 3.45 - Kolaps panela sa žljebastom korozijom duž pola duljine uzdužnjaka



Slika 3.46 - Kolaps panela sa žljebastom korozijom duž cijele duljine uzdužnjaka



Slika 3.47 - Izgled krivulje $\sigma - \epsilon$ za ukrepljeni panel s korozijom u žlijebu zavarenog spoja dužine pola struka uzdužnjaka, cijelog struka uzdužnjaka, i neoštećeni panel

4. GRANIČNA ČVRSTOĆA KORODIRANE BRODSKE KONSTRUKCIJE

Tijekom svoje eksploatacije brodska konstrukcija izložena je djelovanju raznih opterećenja uslijed tereta koji se prevozi, valova i ostalih vremenskih nepogoda na moru. Za vrijeme plovidbe brodski trup se progiba (sagging) i pregiba (hogging), a u tim stanjima najveća naprezanja trpe konstrukcijski elementi koji su najudaljeniji od neutralne osi poprečnog presjeka broda (paluba i brodsko dno). Zbog toga postoji opasnost da kad naprezanje u tim elementima prijeđe granicu tečenja materijala, oni dožive plastične deformacije uslijed kojih nisu više u stanju nositi narinuto opterećenje. Prenapregnuti konstrukcijski elementi tada popuštaju i može doći do pucanja palube ili broskog dna što za posljedicu može imati lom poprečnog presjeka na sredini broskog trupa. Stoga problem krajnje nosivosti poprečnog presjeka, tj. granične čvrstoće trupa postaje nezaobilazan segment u proračunu čvrstoće broda. Danas se kriterij granične čvrstoće smatra fizikalno opravdanim mjerilom čvrstoće broskog trupa i nezaobilazan je kriterij u fazi projektiranja konstrukcije. Kao logična posljedica nameće se i potreba istraživanja granične čvrstoće dotrajalih brodskih konstrukcija.

Naravno, i usuglašena pravila za gradnju tankera (CSR) [1] nezaobilazno propisuju pravila za proračun granične čvrstoće i po tim pravilima je proveden proračun graničnog vertikalnog momenta savijanja za dotrajale naftne tankere koji su proučavani u ovom radu. Prema CSR-u, dvije su metode na raspolaganju za proračun granične uzdužne čvrstoće trupa: metoda jednog koraka i metoda progresivnog kolapsa (PCA).

U ovom poglavlju rada određeni su granični momenti savijanja za tri različita stanja broskog trupa, koja se razlikuju u dimenzijama (debljinama) elemenata trupa koji doprinose uzdužnoj čvrstoći broda. Svi proračuni su izvršeni koristeći obje spomenute metode što omogućava njihovu međusobnu usporedbu.

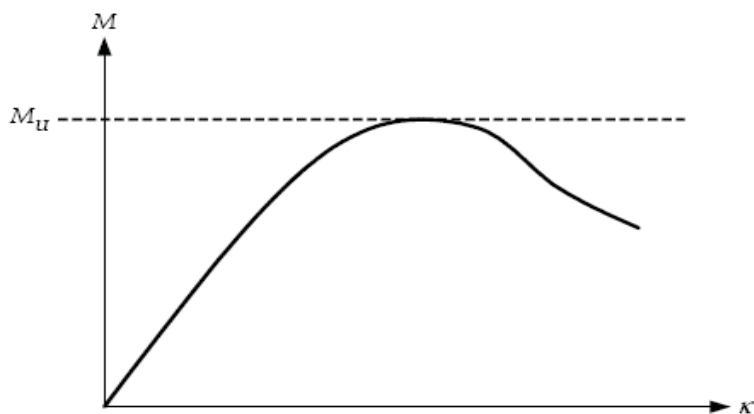
Analizirana su sljedeća stanja broskog trupa:

- "AS BUILT"* – debljine konstrukcijskih elemenata odgovaraju debljinama za potpuno novi brod,
- "SURVEY"* – debljine elemenata su određene inspekcijskim pregledom broda nakon 10, 15 i 20 godina eksploatacije broda za jednoliku koroziju.
- "OŠTEĆENI TRUP"* – pretpostavljene su pojave pukotine na opločanju između dva uzdužnjaka, žljebaste korozije uz gubitak jednog ili dva uzdužnjaka (grooving) i rupičasta nejednolika korozija uzdužnjaka i opločenja (pitting).

Dok su postupci proračuna granične čvrstoće za stanje "As-built" ili jednoliku koroziju relativno jednostavni i slijede proceduru opisanu u CSR, dotle je proračun oštećenog trupa van standarda te je metodologija proračuna osmišljena u ovom radu. Proračun granične nosivosti trupa s nejednolikim korozijskim oštećenjima je od iznimne važnosti za klasifikacijska društva kod procjene sigurnosti konstrukcije dotrajalih brodova.

4.1. Kolaps brodskog trupa

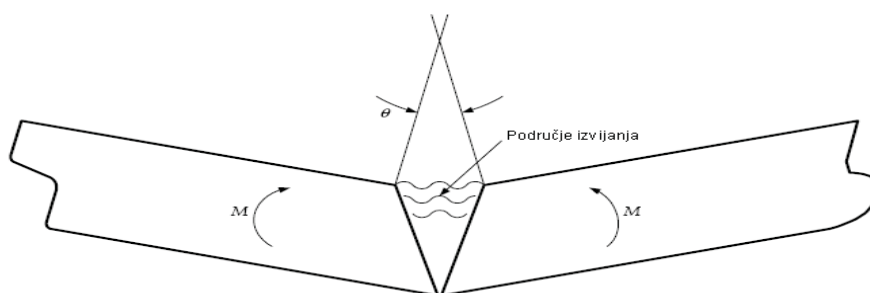
Pod pojmom kolapsa trupa se misli na lom trupa kao grede, što znači da trup nije više u stanju podnijeti narinuta opterećenja (vertikalno i horizontalno savijanje, smično i torzijsko opterećenje). Drugim riječima, kolaps trupa predstavlja gubitak krutosti grede na savijanje, torziju ili smik [1]. Kod globalnog uzdužnog sloma trupa dominantno opterećenje predstavlja vertikalni moment savijanja broda kao grednog nosača, a glavni odziv je savijanje, što se može izraziti preko zakrivljenosti grede κ . Granični moment savijanja brodskog trupa kao grede, M_U , po definiciji predstavlja maksimalni moment savijanja brodskog trupa iznad kojeg dolazi do kolapsa (loma) trupa [1]. Izgled krivulje ovisnosti momenta savijanja i zakrivljenosti prikazan je na slici 4.1.



Slika 4.1 - Ovisnost momenta savijanja o zakrivljenosti trupa [1]

Metodom kojom se računa granično opterećenje brodskog trupa određuju se kritična stanja kad dolazi do loma svih glavnih uzdužnih strukturnih elemenata. Za tankere u progibnom stanju, kritični oblik je elasto-plastično izvijanje ukrepljenih panela palube [11] uslijed čega može doći do kolapsa trupa.

Kao što je prikazano na slici 4.1, granični moment savijanja je onaj moment pri kojem nagib krivulje $M - \kappa$ postaje nula. Svako povećanje opterećenja iznad ove vrijednosti dovelo bi do naglog i nekontroliranog porasta deformacija.



Slika 4.2 - Progib broda – pucanje trupa zbog izvijanja panela palube [1]

Konstruktivski elementi koji su opterećeni na tlak iznad vlastitih granica izvijanja imaju smanjenu sposobnost podnošenja opterećenja, iako ona i dalje postoji (Slika 4.2). Svi oblici kolapsa koji dovode do loma pojedinih elemenata kao što su izvijanje opločenja, torzijsko izvijanje uzdužnjaka, lateralno ili globalno izvijanje uzdužnjaka i njihovo međudjelovanje, moraju se provjeriti kako bi se odredila najmanja vrijednost opterećenja (naprezanja) koja dovodi do loma pojedinog konstrukcijskog elementa. Tijekom globalnog sloma razni paneli nalaze se u različitim stupnjevima slamanja i unutar svakog panela glavni efekt opterećenja je produženje ili skraćenje koje gredi nameće moment savijanja kao rezultat zakrivljenosti κ .

Pri proračunu granične savojne nosivosti pretpostavlja se da se brodski trup ponaša po teoriji grede, odnosno da poprečni presjeci, iako zakrivljeni, ostaju u svojoj ravnini. Prema tome, uzdužna se deformacija zbog savijanja grede dobije iz izraza $\varepsilon = z/\kappa$, kako vrijedi za linearno elastično savijanje grede. Budući da je svaki panel izložen procesu loma što uključuje popuštanje, izvijanje ili oboje, odgovarajuća raspodjela naprezanja preko presjeka kritičnog segmenta je vrlo nelinearna. Čak i unutar svakog panela odnos između srednjeg naprezanja i deformacije varira kako opterećenje raste. Unatoč tome, raspored deformacija ostaje približno linearan sve do sloma grede. Prema tome, granične vrijednosti elemenata koje imaju najveću važnost u uzdužnom slomu su vrijednosti granične deformacije ε_U ukrepljenih panela. Za svaki panel granična deformacija je količina nametnute tlačne deformacije koja uzrokuje slom tog panela. Kako bi se mogao izračunati granični moment, potrebno je odrediti

graničnu čvrstoću svakog panela, tj. količinu tlačnog opterećenja koje panel nosi u trenutku sloma. To se izražava srednjim naprežanjem panela u trenutku njegovog sloma $\sigma_{i,U}$ [39].

4.2. Proračun graničnog momenta savijanja za slučaj opće (jednolike) korozije brodskog trupa

4.2.1. Metoda jednog koraka

Metoda jednog koraka za proračun graničnog momenta savijanja je pojednostavljena metoda temeljena na reduciranoj krutosti na savijanje brodskog trupa u trenutku kolapsa broda kao grednog nosača [1].

Granični moment savijanja M_U se računa prema:

$$M_U = Z_{red} \cdot \sigma_Y \cdot 10^{-3}, \text{ kNm} \quad (4.1)$$

gdje je:

$$Z_{red} = \frac{I_{red}}{z_{dk-mean} - z_{NA-mean}} \quad \begin{array}{l} \text{- reducirani moment otpora palube (obzirom na} \\ \text{srednju visinu palube), m}^3 \end{array}$$

$$I_{red} \quad \begin{array}{l} \text{- reducirani moment tromosti poprečnog presjeka, m}^4 \end{array}$$

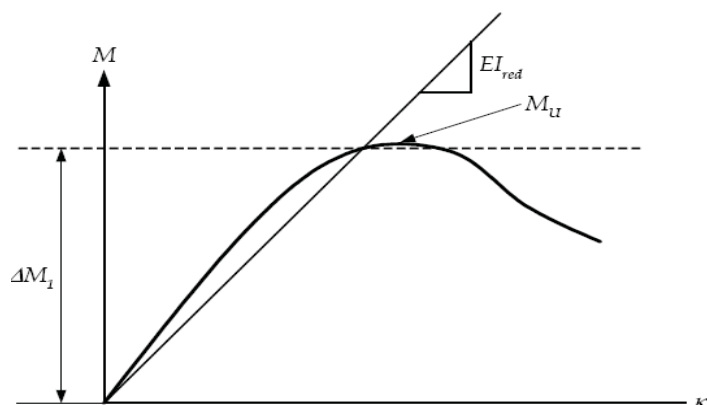
$$A_{eff} = \frac{\sigma_U}{\sigma_Y} \cdot A \quad \begin{array}{l} \text{- efektivna površina nakon izvijanja ukrepljenog panela palube} \\ \text{(površina koja podnosi opterećenje nakon izvijanja), m}^2 \end{array}$$

$$\sigma_U \quad \begin{array}{l} \text{- granično naprežanje izvijanja ukrepljenog panela, N/mm}^2 \end{array}$$

$$\sigma_Y \quad \begin{array}{l} \text{- granica tečenja materijala, N/mm}^2 \end{array}$$

$$z_{dk-mean} \quad \begin{array}{l} \text{- vertikalna udaljenost između srednje visine palube i dna broda, m} \end{array}$$

$$z_{NA-mean} \quad \begin{array}{l} \text{- vertikalna udaljenost između neutralne osi reduciranog poprečnog} \\ \text{presjeka i dna broda, m} \end{array}$$



Slika 4.3 - Utjecaj fleksijske krutosti trupa na granični moment savijanja [1]

Pretpostavka ove metode je da je granični kapacitet kod progiba tankera ona točka kad se dosegne granični kapacitet ukrepljenog panela palube. Nakon ove točke odmah dolazi do pucanja trupa, odnosno povećavanjem napreznja iznad granične vrijednosti, panel neće doći u stanje smanjene nosivosti, već u točki graničnog napreznja dolazi do njegova loma [1].

4.2.1.1. Rezultati metode jednog koraka uz primjenu programa PULS

Za određivanje graničnog momenta savijanja metodom jednog koraka korišten je računalni program PULS primijenjen na tlačno opterećivanje panela palube.

Svrha proračuna ovom metodom jest određivanje graničnog momenta savijanja M_U "iz jednog koraka", odnosno dovoljno je odrediti graničnu vrijednost napreznja σ_U , kod kojeg dolazi do loma panela palube, da bi proračun bio definiran. Granično napreznje σ_U je određeno ispitivanjem ukrepljenog panela palube, uz pomoć računalnog programa PULS. Za ulazne podatke korištene su geometrijske karakteristike panela i pripadajućih uzdužnjaka, kao i njihove karakteristike materijala.

Rezultati proračuna provedeni su metodom jednog koraka za tri broda analizirana u radu: Brod 1, Brod 2 i Brod 3. U proračun su uzete vrijednosti nove ("As-built") konstrukcije trupa i vrijednosti sa smanjenim geometrijskim karakteristikama poprečnih presjeka brodova nakon 10, 15 i 20 godina u službi ("Survey"). Stanja trupa prikazana su u sljedećim tablicama 4.1, 4.2 i 4.3:

Tablica 4.1 - Rezultati proračuna metodom jednog koraka za Brod 1

| Brod 1 | AS BUILT Novi brod | SURVEY 10 god | SURVEY 15 god | SURVEY 20 god |
|--------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| σ_Y , N/mm ² | 315 | 315 | 315 | 315 |
| σ_U , N/mm ² | 261 | 260 | 258 | 256 |
| Z_{red} , m ³ | 22.32 | 21.85 | 21.2781 | 20.79 |
| I_{red} , m ⁴ | 249.58 | 244.79 | 238.73 | 234.17 |
| A_{red} , m ² | 3.87 | 3.79 | 3.70 | 3.65 |
| M_U , kNm | 7 031 899 | 6 883 283 | 6 702 603 | 6 548 413 |

Tablica 4.2 - Rezultati proračuna metodom jednog koraka za Brod 2

| Brod 2 | AS BUILT Novi brod | SURVEY 10 god | SURVEY 15 god | SURVEY 20 god |
|--------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| σ_Y , N/mm ² | 235 | 235 | 235 | 235 |
| σ_U , N/mm ² | 198 | 197 | 196 | 194 |
| Z_{red} , m ³ | 24.71 | 24.28 | 23.81 | 23.27 |
| I_{red} , m ⁴ | 246.52 | 242.37 | 238.66 | 234.59 |
| A_{red} , m ² | 4.17 | 4.07 | 4.02 | 3.98 |
| M_U , kNm | 5 807 017 | 5 703 846 | 5 596 257 | 5 467 651 |

Tablica 4.3 - Rezultati proračuna metodom jednog koraka za Brod 3

| Brod 3 | AS BUILT Novi brod | SURVEY 10 god | SURVEY 15 god | SURVEY 20 god |
|--------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|
| σ_Y , N/mm ² | 235 | 235 | 235 | 235 |
| σ_U , N/mm ² | 198 | 197 | 195 | 193 |
| Z_{red} , m ³ | 24.71 | 24.20 | 23.41 | 22.93 |
| I_{red} , m ⁴ | 246.52 | 241.69 | 236.64 | 233.53 |
| A_{red} , m ² | 4.17 | 4.05 | 4.00 | 3.97 |
| M_U , kNm | 5 807 017 | 5 687 437 | 5 501 680 | 5 389 055 |

4.2.2. Metoda progresivnog kolapsa (PCA)

Metoda se zasniva na inkrementalno-iterativnoj proceduri [1], [11], [40]. Inkrementalni dio se očituje u postupnom povećavanju zakrivljenosti broskog trupa kao grede, a zakrivljenost svakog koraka κ_i dobije se zbrajanjem zakrivljenosti u prethodnom koraku κ_{i-1} i inkrementa $\Delta\kappa$. Inkrement zakrivljenosti trupa odgovara inkrementu kuta rotacije poprečnog presjeka brodske grede (Slika 4.2) oko svoje neutralne osi. Iterativnim postupkom se u svakom koraku povećava zakrivljenost trupa i dobiva se novi položaj neutralne linije. Taj

novi položaj neutralne linije je dobiven iz uvjeta ravnoteže da je suma sila koje djeluju u elementima iznad neutralne linije jednaka sumi sila koje djeluju u elementima ispod neutralne linije. Na kraju svakog koraka računa se moment savijanja zbrajanjem doprinosa momentu savijanja svakog pojedinog elementa [39].

Kod ove metode granični moment savijanja M_U je definiran kao vršna vrijednost krivulje vertikalnog momenta savijanja M u ovisnosti o zakrivljenosti poprečnog presjeka brodskog trupa (slika 4.1). Krivulja $M-\kappa$ je dobivena inkrementalno - iterativnim postupkom računanja momenta savijanja M_i koji djeluje na poprečni presjek trupa zbog zakrivljenosti presjeka. Zakrivljenost poprečnog presjeka oko horizontalne neutralne osi stvara uzdužnu deformaciju u svakom konstrukcijskom elementu trupa. U progibnom stanju, konstrukcijski elementi ispod neutralne linije se produljuju, a elementi iznad neutralne linije se skraćuju. Pojava uzdužne deformacije uzrokovat će naprezanje u svakom konstrukcijskom elementu. To naprezanje će se odrediti iz krivulja naprezanje- deformacija za pojedini element. U CSR [1] je propisano šest vrsta krivulja koje opisuju ponašanje strukturnih elemenata u nelinearnom elasto-plastičnom području pri procesu sloma brodskog trupa. Vrsta krivulje koja se koristi za opisivanje ponašanja pojedinog elementa ovisi o njegovom tipu, tj. da li je riječ o tzv. krutom kutu (eng. hard corner), poprečno ukrepljenom opločanju ili uzdužno ukrepljenom panelu. Naravno, vrsta krivulje ovisi i o tome je li element podložan tlačnom ili vlačnom opterećenju, odnosno ovisi i o njegovoj poziciji u odnosu na neutralnu os.

Sila koja djeluje u pojedinim elementu dobije se iz umnoška površine elementa i naprezanja koje djeluje na pojedini element. Ravnoteža naprezanja preko cijelog poprečnog presjeka trupa se postiže time da je suma sila elemenata iznad neutralne linije jednaka sumi sila elemenata ispod neutralne linije. Jednadžba uvjeta ravnoteže glasi:

$$\sum A_i \cdot \sigma_i = \sum A_j \cdot \sigma_j, \quad (4.2)$$

gdje indeks i označava elemente ispod, a indeks j elemente iznad neutralne linije.

Ako za pojedinu neutralnu liniju nije postignuta ravnoteža sila "gornjih" i "donjih" elemenata, potrebno je naći novi položaj neutralne linije koji daje ravnotežu "gornjih" i "donjih" elemenata, a to se postiže pomicanjem neutralne linije u novi položaj, ponovnim računanjem deformacija, naprezanja i sila kako bi se postigla ravnoteža sila. Ovo je iterativan postupak kojeg je potrebno nekoliko puta ponoviti sve dok ukupni zbroj sila ne bude jednaka nuli.

Nakon što je izračunat položaj neutralne linije za pojedini korak, postignuta je pravilna raspodjela naprezanja po poprečnom presjeku za pojedini korak. Moment savijanja oko

neutralne linije zbog zakrivljenost poprečnog presjeka dobije se sumiranjem doprinosa napreznja svih elemenata presjeka ukupnom momentu savijanja.

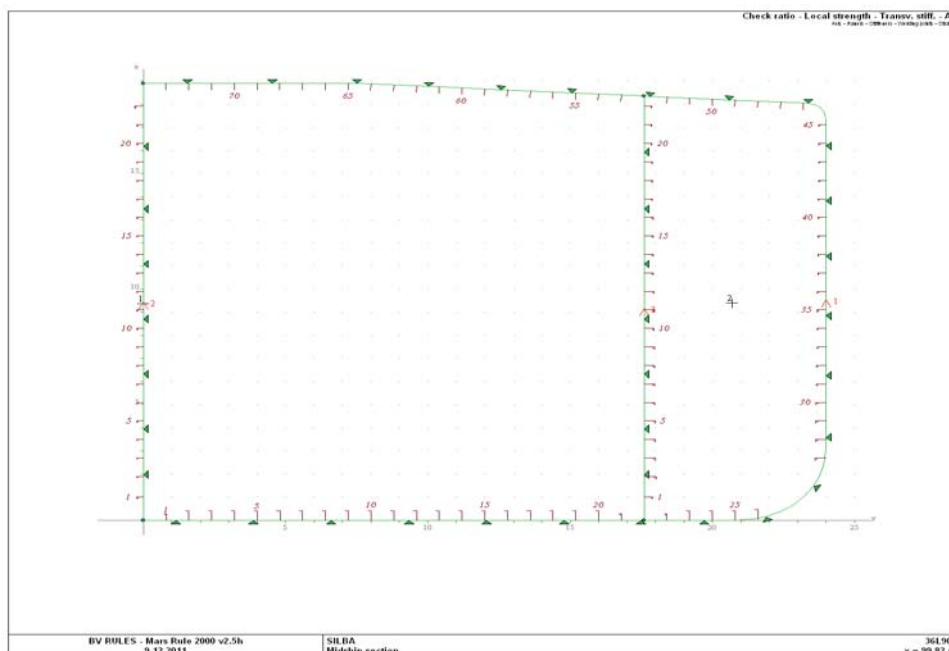
4.2.2.1. Rezultati proračuna programom *MARS*

Program *MARS* je namijenjen proračunu uzdužne i lokalne čvrstoće presjeka trupa, te ima implementiran kod za proračun granične čvrstoće analizom progresivnog kolapsa razvijen na Tehničkom Sveučilištu u Szczecinu u Poljskoj. U proračunu uzdužne čvrstoće uključena su pravila Bureau Veritas-a, kao i nova CSR pravila.

U programu *MARS* najprije je potrebno modelirati poprečni presjek glavnog rebra broda, sa svim elementima koji doprinose uzdužnoj čvrstoći. U primjerima tankera sa jednostrukom oplatom, koji su predmet proučavanja u ovom radu, modelira se jedna strana poprečnog presjeka, koji se sastoji od centralnog teretnog tanka i bočnih balastnih tankova. Ova tri prostora su odvojena bočnim uzdužnim pregradama.

Programom *MARS* je izvršen proračun granične čvrstoće trupa za tri promatrana broda i četiri stanja trupa. Promjenom debljina elemenata mijenjaju se geometrijske karakteristike poprečnog presjeka, a samim time i granična čvrstoća.

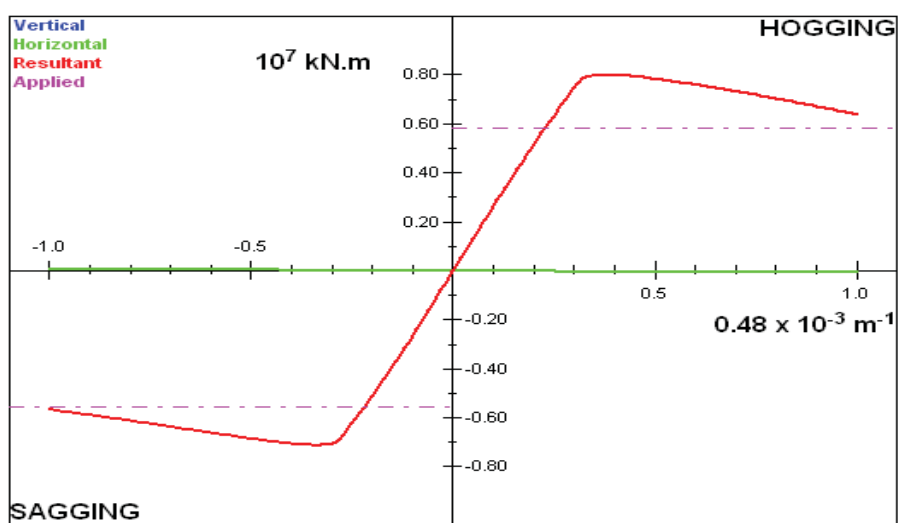
Na slici 4.4 prikazana je polovina glavnog rebra Broda 2 modelirana u programu *MARS* v 2.0 s.



Slika 4.4 - Poprečni presjek na glavnom rebru Broda 2 modeliranog u programu *MARS*

U tablicama 4.4-4.6 prikazani su izlazni rezultati granične čvrstoće promatranih brodova Brod 1, Brod 2 i Brod 3 iz programa *MARS* za četiri različita stanja trupa: nova konstrukcija ("As built") i korodirana konstrukcija nakon 10, 15 i 20 godina, mjerene na obnovnim pregledima trupa ("Survey"). Krivulje koje prikazuju ovisnost inkrementalnog momenta koji djeluje na trup i zakrivljenosti trupa su prikazane na slikama 4.5-4.7 za nove brodove ("As built").

Rezultati za AS BUILT i SURVEY stanja broskog trupa Brod 1:



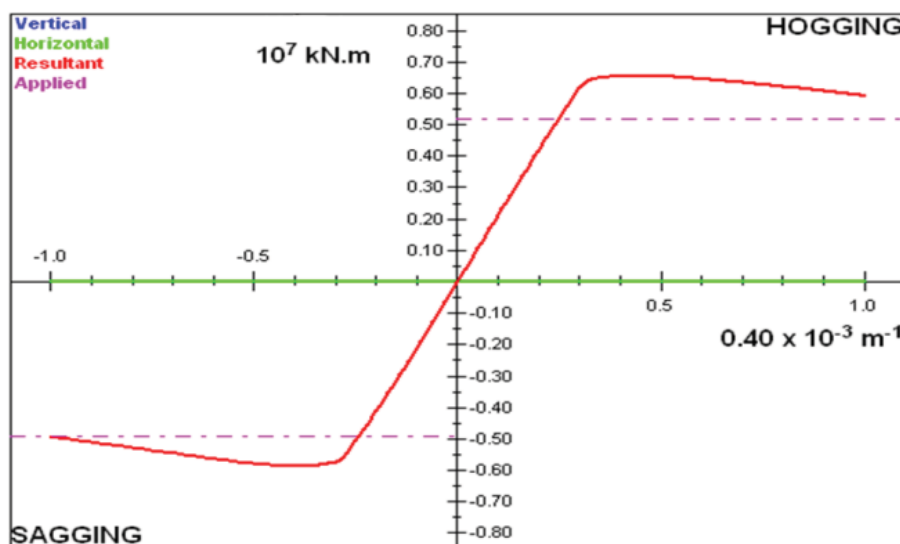
Slika 4.5 - Ovisnost momenta savijanja M_U o zakrivljenosti k broskog trupa za stanje trupa AS BUILT (novi brod) Brod 1

NAPOMENA: Crvena krivulja u dijagramu predstavlja krivulju ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti dobivenu programom *MARS*, dok ucrtana ljubičasta krivulja predstavlja opterećenja uslijed momenta progiba i pregiba.

Tablica 4.4 - Rezultati proračuna metodom PCA pomoću programa MARS za Brod 1 i sva četiri stanja trupa navedenog broda

| Brod 1 Stanje trupa: | AS BUILT Novi brod | SURVEY 10 god. | SURVEY 15 god. | SURVEY 20 god. |
|--|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $A_{gl.reb.}, m^2$ - površina poprečnog presjeka | 3.99 | 3.95 | 3.94 | 3.91 |
| $I_{gl.reb.}, m^4$ - moment inercije poprečnog presjeka | 269.1 | 266.1 | 264.6 | 260.8 |
| $Z_{nel.lin.}, m$ - udaljenost ruba presjeka od N.L. | 9.44 | 9.40 | 9.37 | 9.33 |
| $Z_{gl.reb.}, m^3$ - moment otpora poprečnog presjeka | 26.24 | 25.84 | 25.62 | 25.16 |
| M_U, kNm | 7 122 020 | 6 980 443 | 6 907 681 | 6 745 744 |

Rezultati za AS BUILT i SURVEY stanja trupa brodova blizanaca Brod 2 & 3:



Slika 4.6 - Ovisnost momenta savijanja M_U o zakrivljenosti poprečnog presjeka k brodskog trupa za stanje trupa AS BUILT (novi brod) Brod 2 i Brod 3

Tablica 4.5 - Rezultati proračuna metodom PCA pomoću programa Mars za Brod 2 i sva četiri stanja trupa navedenog broda

| Brod 2 Stanje trupa: | AS BUILT Novi brod | SURVEY 10 god. | SURVEY 15 god. | SURVEY 20 god. |
|--|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $A_{gl.reb.}$, m ² - površina poprečnog presjeka | 4.32 | 4.25 | 4.22 | 4.18 |
| $I_{gl.reb.}$, m ⁴ - moment inercije poprečnog presjeka | 260.3 | 256.8 | 254.2 | 250.8 |
| $Z_{nel.lin.}$, m - udaljenost ruba presjeka od N.L. | 8.89 | 8.86 | 8.84 | 8.70 |
| $Z_{gl.reb.}$, m ³ - moment otpora poprečnog presjeka | 28.56 | 28.15 | 27.73 | 27.18 |
| M_U , kNm | 5 867 654 | 5 752 190 | 5 659 675 | 5 516 960 |

Tablica 4.6 - Rezultati proračuna metodom PCA pomoću programa Mars za Brod 3 i sva četiri stanja trupa navedenog broda

| Brod 3 Stanje trupa: | AS BUILT Novi brod | SURVEY 10 god. | SURVEY 15 god. | SURVEY 20 god. |
|--|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $A_{gl.reb.}$, m ² - površina poprečnog presjeka | 4.32 | 4.24 | 4.19 | 4.16 |
| $I_{gl.reb.}$, m ⁴ - moment inercije poprečnog presjeka | 260.3 | 256.0 | 251.3 | 248.9 |
| $Z_{nel.lin.}$, m - udaljenost ruba presjeka od N.L. | 8.89 | 8.88 | 8.79 | 8.74 |
| $Z_{gl.reb.}$, m ³ - moment otpora poprečnog presjeka | 28.56 | 25.84 | 25.62 | 25.16 |
| M_U , kNm | 5 867 654 | 5 733 698 | 5 549 820 | 5 444 268 |

4.3. Usporedba rezultata proračuna metode progresivnog kolapsa i metode jednog koraka (program *PULS* i program *MARS*) za slučaj opće (jednolike) korozije

Usporedba dvije metode proračuna graničnog momenta savijanja za stanje trupa u progibu (sagging) kao funkcija smanjenja momenta otpora u ovisnosti o vremenu prikazana je u tablicama 4.7-4.9, te dijagramima 4.7-4.9. Na dijagramima je prikazana i horizontalna linija koja predstavlja IMO kriterij za minimalni zahtijevani moment otpora korodiranog trupa [43], [44]. Iako se IMO kriterij odnosi na gubitak momenta otpora, uobičajeno se koristi i na granični moment savijanja.

Tablica 4.7 - Usporedbe graničnih momenata savijanja M_U dobivenih dvjema metodama za Brod 1

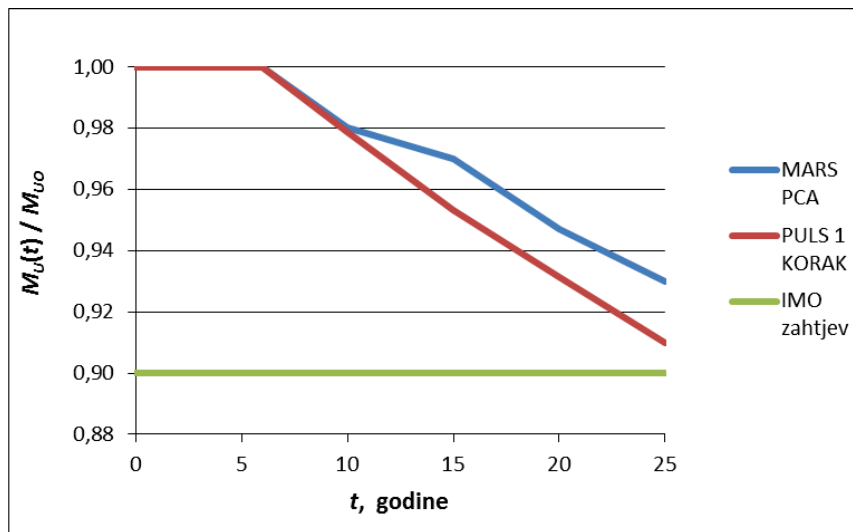
| Stanje trupa Brod 1 | AS BUILT Novi brod M_U [kNm] | SURVEY 10 god. M_U [kNm] | SURVEY 15 god. M_U [kNm] | SURVEY 20 god. M_U [kNm] |
|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Program <i>PULS</i> | 7 031 899 | 6 883 283 | 6 702 603 | 6 548 413 |
| Program <i>MARS</i> | 7 122 020 | 6 980 443 | 6 907 681 | 6 745 744 |
| Razlika, % | 1.27 | 1.39 | 2.97 | 2.93 |

Tablica 4.8 - Usporedbe graničnih momenata savijanja M_U dobivenih dvjema metodama za Brod 2

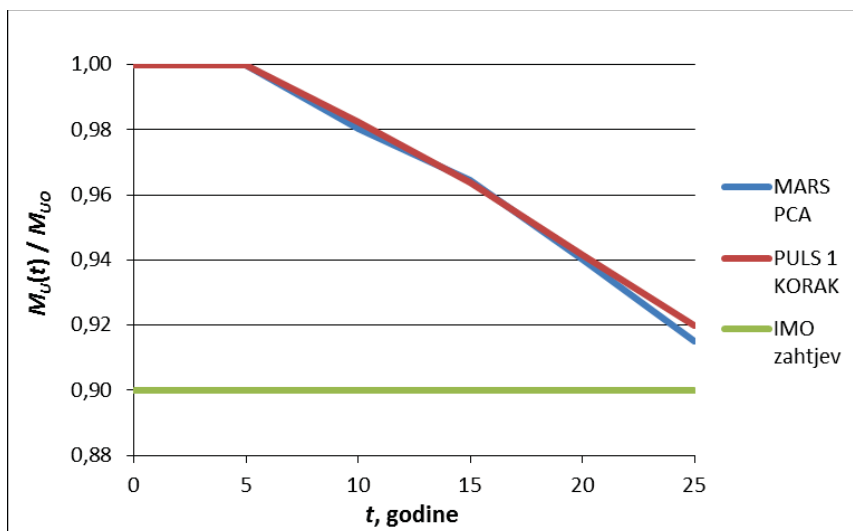
| Stanje trupa Brod 2 | AS BUILT Novi brod M_U [kNm] | SURVEY 10 god. M_U [kNm] | SURVEY 15 god. M_U [kNm] | SURVEY 20 god. M_U [kNm] |
|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Program <i>PULS</i> | 5 807 017 | 5 703 846 | 5 596 257 | 5 467 651 |
| Program <i>MARS</i> | 5 867 654 | 5 752 190 | 5 659 675 | 5 516 960 |
| Razlika, % | 1.03 | 0.84 | 1.12 | 0.89 |

Tablica 4.9 - Usporedbe graničnih momenata savijanja M_U dobivenih dvjema metodama za Brod 3

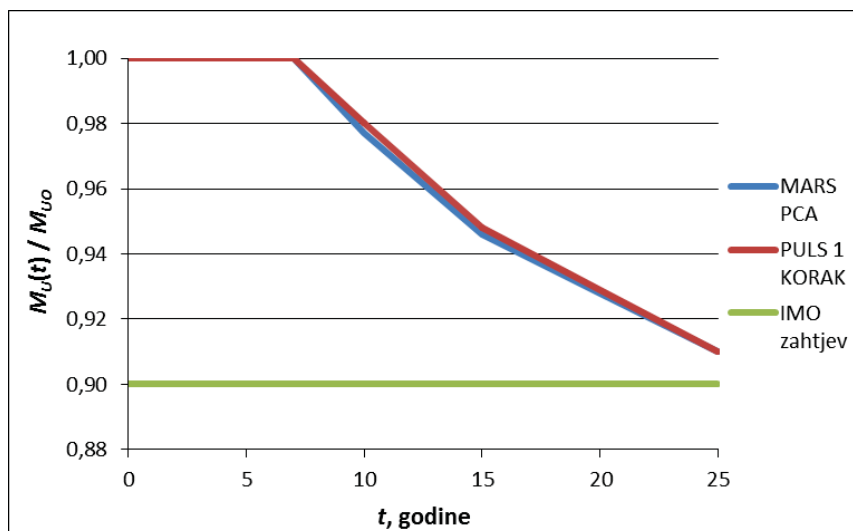
| Stanje trupa Brod 3 | AS BUILT Novi brod M_U [kNm] | SURVEY 10 god. M_U [kNm] | SURVEY 15 god. M_U [kNm] | SURVEY 20 god. M_U [kNm] |
|------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Program <i>PULS</i> | 5 807 017 | 5 687 437 | 5 501 680 | 5 389 055 |
| Program <i>MARS</i> | 5 867 654 | 5 733 698 | 5 549 820 | 5 444 268 |
| Razlika, % | 1.03 | 0.80 | 0.87 | 1.01 |



Slika 4.7 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u ovisnosti o vremenu za Brod 1



Slika 4.8 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u ovisnosti o vremenu za Brod 2



Slika 4.9 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u ovisnosti o vremenu za Brod 3

Uspoređivanjem tabličnih rezultata granične čvrstoće određenih ovim dvjema metodama vidimo da metoda progresivnog kolapsa daje rezultate 1 do 2% veće od metode jednog koraka. Razlog tome je to što se u metodi progresivnog kolapsa postepeno (u koracima) računa granični moment savijanja i pretpostavlja se da nakon što nastupi kolaps palube, trup globalno može podnijeti još dodatno opterećenje, a da pri tome ne dođe do loma, dok se metodom jednog koraka određuje granični moment pretpostavljajući da kolaps trupa nastupa odmah čim se dosegne vrijednost granične čvrstoće panela palube.

Također, uspoređivanjem rezultata iz gornjih dijagrama može se zaključiti da kod djelovanja opće (jednolike) korozije na sve elemente trupa, koji sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći za sva tri promatrana modela (Brod 1, Brod 2, Brod 3) nakon inspekcijskih pregleda za 10, 15 i 20 godina nije došlo do smanjenja uzdužne čvrstoće više od 10%, sukladno IMO zahtjevima. Kod svih modela promatranih brodova mogućnost takvog smanjenja se može dogoditi negdje u vremenskom periodu životnog vijeka broda od 25 do 30 godina. U tom vremenskom periodu, odnosno između 5 i 6 obnovnog pregleda, vrijednosti graničnog momenta savijanja mogu pasti ispod IMO zahtjeva od 10% za smanjenjem uzdužne čvrstoće.

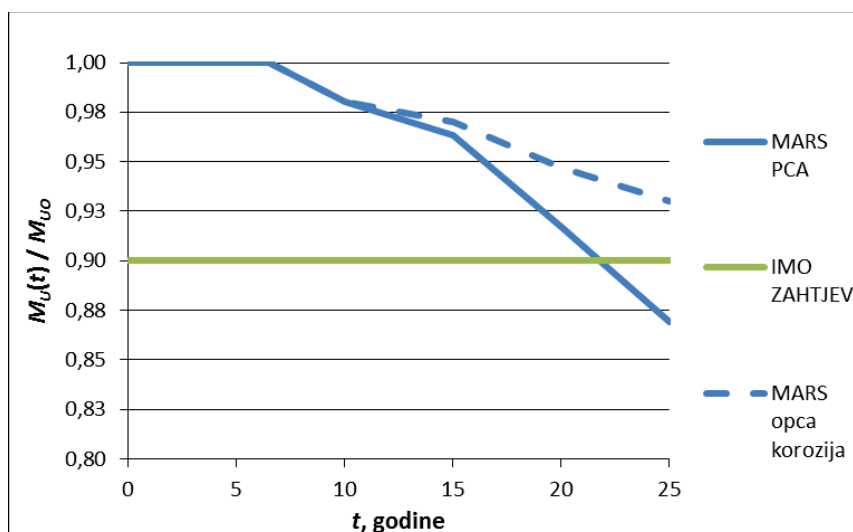
4.4. Granična čvrstoća trupa oslabljenog zamornim pukotinama, rupičastom korozijom i korozijom u žlijebu zavarenog spoja

U 3. poglavlju ovog rada pokazan je postupak određivanja graničnih naprezanja ukrepljenih panela oslabljenih uslijed djelovanja zamornih pukotina, rupičaste korozije

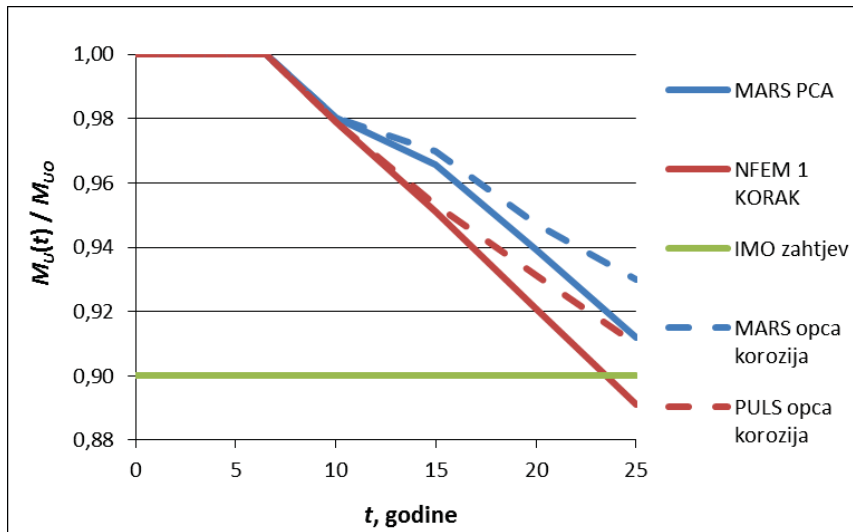
(pitting) i korozije u žlijebu zavarenog spoja (grooving). Program PULS, koji je korišten za provjeru nosivosti ukrepljenih panela i ploča pod djelovanjem opće (jednolike) korozije, nema mogućnosti simuliranja naprezanja kod pukotina i nejednolike korozije. Iz tog su razloga u proračunima granične čvrstoće metodom jednog koraka korišteni rezultati dobiveni nelinearnom analizom metodom konačnih elemenata (NMKE), a ne programom PULS. To je opravdano činjenicom da je model za primjenu NMKE uspoređen s programom PULS i verificiran u 3. poglavlju.

Simulacija ukrepljenog panela s pukotinom same ploče, a bez pukotine na pripadajućem nosaču, ne može dati vjerodostojne rezultate za model s jednim uzdužnjakom i njegovom sunosivom širinom, zbog nesimetričnosti konstrukcije tako oštećenog ukrepljenog panela. Jednostavni model ukrepljenog panela korišten u ovom radu bi bilo potrebno znatno proširiti da bi se moglo uzeti u obzir takve nesimetričnosti konstrukcije, što se nije razmatralo. Shodno tome navedeni tip oštećenja nije analiziran metodom jednog koraka.

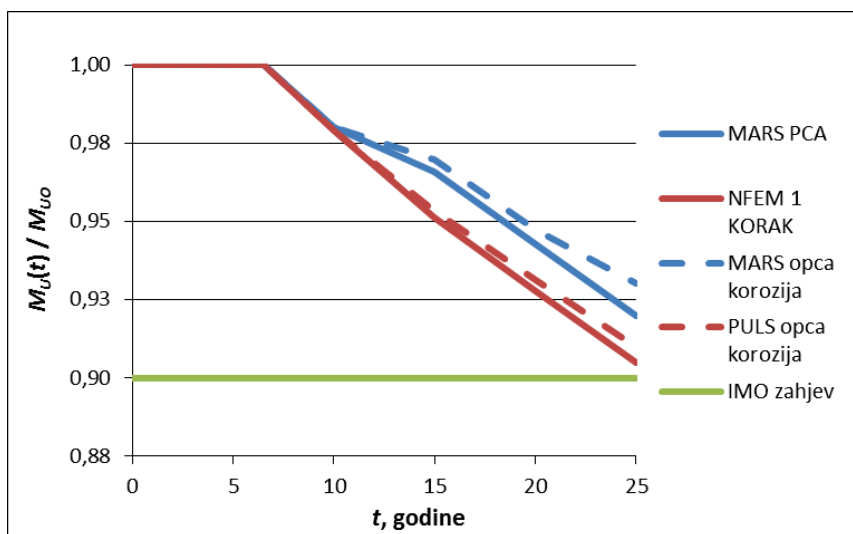
Programom MARS određene su pukotine uzdužnjaka palube na način da je na modelu poprečnog presjeka izostavljen po jedan nosač sa svake strane simetralne linije. Nejednolika korozija je modelirana smanjenjem debljine opločenja palube na minimalnu vrijednost, dok se kod grooving-a smanjivala debljina struka nosača. Kod metode jednog koraka, granična čvrstoća palubne konstrukcije određena je NMKE, kako je već opisano. Usporedba rezultata dobivenih metodom progresivnog kolapsa PCA i metodom jednog koraka prikazana je na slikama (dijagramima): 4.10, 4.11, 4.12 i 4.13.



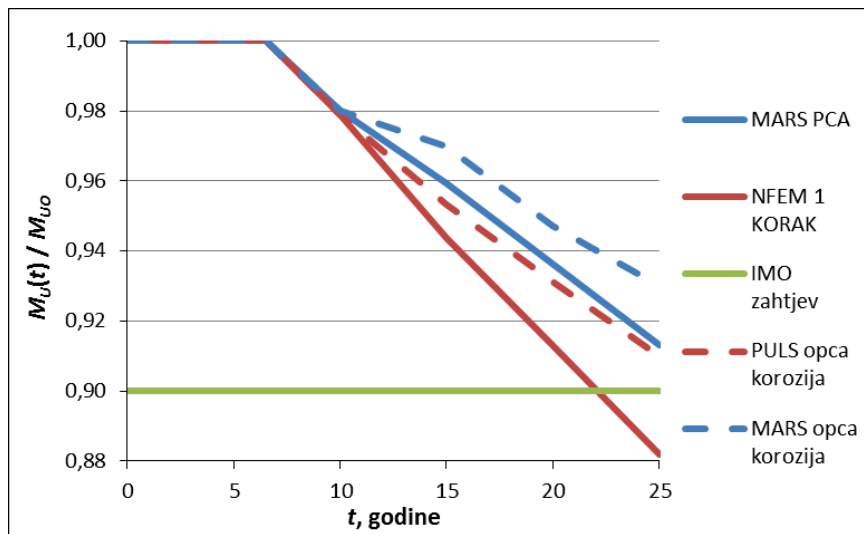
Slika 4.10 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed pukotine ploče palube



Slika 4.11 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed pukotine palubnih uzdužnjaka



Slika 4.12 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed korozije u žlijebu zavarenog spoja



Slika 4.13 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu uslijed nejednolike korozije "pittinga"

Iz gornjih dijagrama se može primijetiti dobro poklapanje rezultata određenih metodom jednog koraka upotrebom rezultata NMKE i metodom progresivnog kolapsa za sve tipove oštećenja. Sa slika 4.10-4.13 je vidljivo da u slučajevima pukotine palubnih ploča i uzdužnjaka te pri nejednolikoj koroziji, granični moment prema IMO zahtjevu se dostiže između 20-25 godina. Najmanji utjecaj na granični moment savijanja trupa ima "grooving" korozija. Potrebno je naglasiti da sve numeričke vrijednosti treba shvatiti uvjetno, jer su ovisne o pretpostavljenim vrijednostima oštećenja koja su navedena u 3. poglavlju.

5. PRIMJENA REZULTATA ZA UNAPREĐENJE STRATEGIJE INSPEKCIJE, ODRŽAVANJA I POPRAVAKA BRODOVA U SLUŽBI

U ovom se poglavlju predlažu primjeri praktičnih primjena koje mogu imati metode razvijene u poglavljima 2-4 kao pomoć u proceduri inspekcije i održavanja brodova u službi. Metode za predviđanje napredovanja korozijskih istrošenja obrađene u 2. poglavlju mogu se prikazati u obliku korozijskih mapa, čime bi se inspektorima u praksi olakšalo odlučivanje o skupim detaljnim pregledima i popravcima konstrukcije. Metode za proračun čvrstoće ploča i ukrepljenih panela oslabljenih djelovanjem nejednolike korozije i nastankom zamornih pukotina koje su razvijane u 3. poglavlju rada mogu se kombinirati s metodama za projektiranje konstrukcija koje propisuju klasifikacijska društva i na taj način se može racionalno nadzirati podobnost brodske konstrukcije u službi. Granična savojna nosivost broskog trupa, kao najvažniji suvremeni kriterij čvrstoće brodske konstrukcije također se može učinkovito nadzirati koristeći parcijalne faktore sigurnosti koje propisuju klasifikacijska društva te metode obrađene u 4. poglavlju rada. Naposljetku, metode za predviđanje korozijskih istrošenja omogućavaju bolju procjenu dinamičke izdržljivosti konstrukcije u odnosu na postojeću praksu klasifikacijskih društava.

U ovom poglavlju se analiziraju predloženi postupci koji predstavljaju nadopunu metodama koje koriste klasifikacijska društva u svojim procedurama obnavljanja i produljenja klase starih brodova [44], [45].

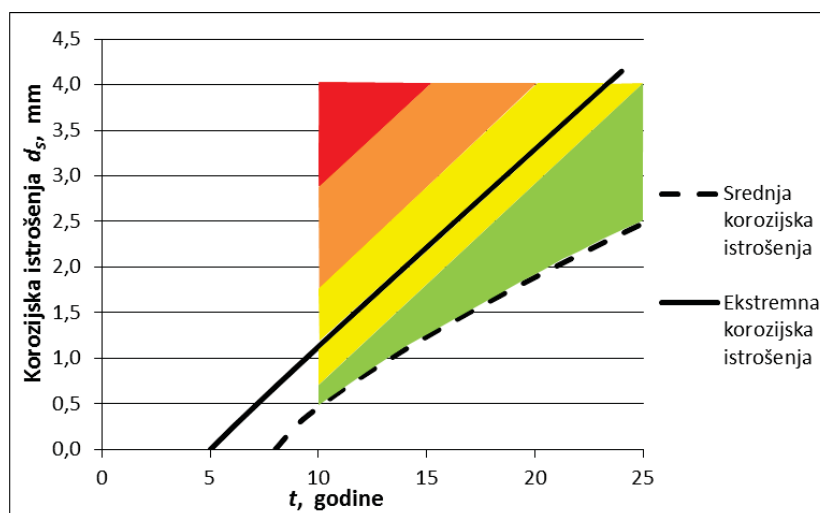
5.1. Korozijske mape

Nakon periodičnih pregleda brodske strukture naftnog tankera ultrazvučnim mjerenjem debljina elemenata trupa od strane inspektora klasifikacijskih društava i brodovlasnika, u izvještajima s mjerenja se nalazi veliki broj podataka (nekoliko tisuća brojeva) o istrošenjima limova. Da bi se rezultati mogli lakše interpretirati na temelju mjerenja i odrediti koje limove te nosače treba zamijeniti ili planirati njihovu izmjenu do sljedećeg obnovnog pregleda i suhog dokovanja, predlaže se selekcija područja upotrebom različitih boja u dijagramima.

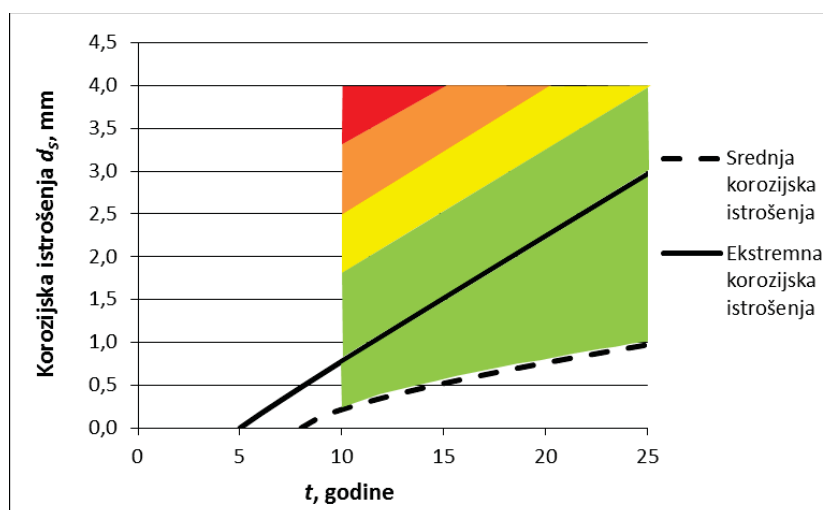
Kako je gore navedeno, obrada rezultata mjerenja iziskuje značajne napore pa bi mape s rezultatima o stanju strukture, prikazane u dijagramima na slikama od 5.1 do 5.4, trebale olakšati praktičan rad. Stanje strukture svrstano je u četiri kategorije: odlično (zeleno), dobro (žuto), prihvatljivo (narančasto) i loše (crveno). Kod kategorija za stanje strukture označene

kao odlično (žuto) i dobro (zeleno) ne trebaju se planirati nikakve aktivnosti održavanja. Kod stanja strukture označene s prihvatljivo (narančasto) moraju se u sljedećem vremenskom periodu od 5 godina, odnosno do isteka valjanosti svjedodžbe o klasi trupa planirati izmjene dotrajalih limova u nekom od remontnih brodogradilišta. Za slučaj stanja strukture označene s loše (crveno) nije moguće odgađanje izmjena, već je potrebno odmah izvršiti potrebne popravke, odnosno zamjenu dotrajalih limova s novima izvornih (as built) debljina. Pojasevi s različitim bojama su određeni na način da slijede trend propagacije korozije, što se postiže primjenom metoda obrađenih u 2. poglavlju rada.

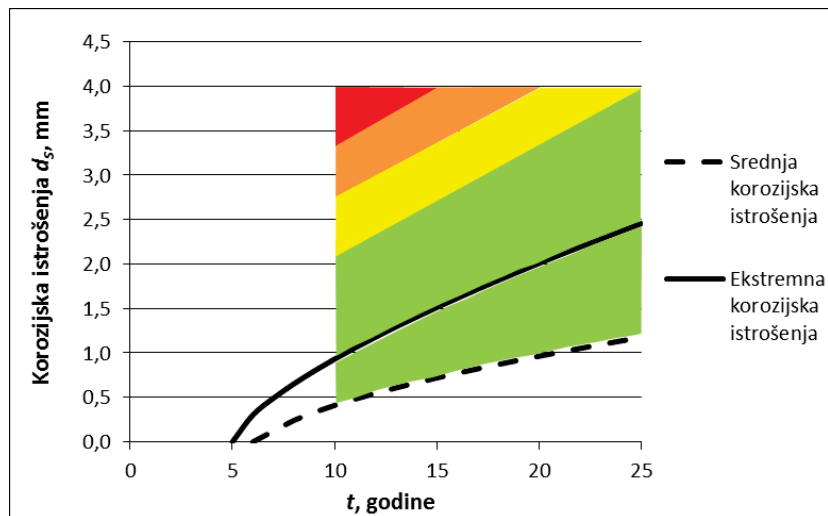
Predložena metoda bi mogla predstavljati značajnu pomoć, kako inspektorima na brodu, tako specijalistima u glavnim uredima klasifikacijskih društava i brodovlasnika.



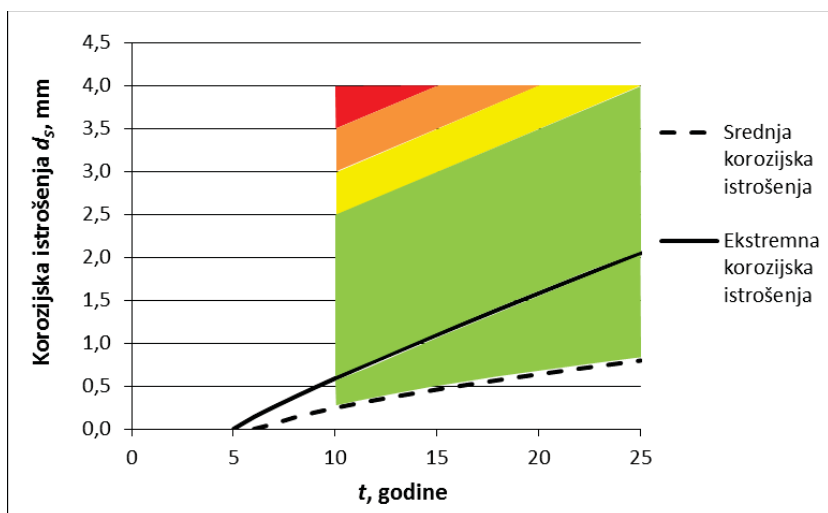
Slika 5.1 - Korozijna mapa palubnih uzdušnjaka u tankovima tereta za Brod 1



Slika 5.2 - Korozijna mapa palubnih uzdušnjaka u tankovima balasta za Brod 1



Slika 5.3 - Korozijska mapa palubnih opločenja u tankovima tereta za Brod 1



Slika 5.4 - Korozijska mapa palubnih opločenja u tankovima balasta za Brod 1

Grafična vrijednost dopuštenog smanjenja debljina od 4 mm predstavlja marginu do koje se uspoređuju vrijednosti stvarnih korozijskih istrošenja prema CSR pravilima. Iako se radi o novim usuglašenim Pravilima za naftne tankere navedena vrijednost se može smatrati dobrim ograničenjem jer se temelji na aktualnim istraživanjima unutar IACS grupe za čvrstoću brodskog trupa [12].

Uspoređujući određene kategorije stanja strukture, odnosno veličinu njihovih područja na slikama (dijagramima) od 5.1 do 5.4, može se primijetiti da je crvena kategorija najveća kod palubnih uzdužnjaka u tankovima tereta na slici 5.1, a zelena najmanja. Za opločenje u

tankovima balasta na slici 5.4 najmanja je crvena kategorija, a najveća zelena kategorija. Iz navedenog se može zaključiti da su, sukladno dijagramima lokalne korozije u drugom poglavlju rada, korozijska istrošenja najveća kod uzdužnjaka u tankovima tereta, a najmanja kod opločenja u tankovima balasta. Kao primjer upotrebe korozijskih mapa za pojedinačne slučajeve analiziran je Brod 1, ali slične mape se analogno mogu konstruirati i za preostale brodove.

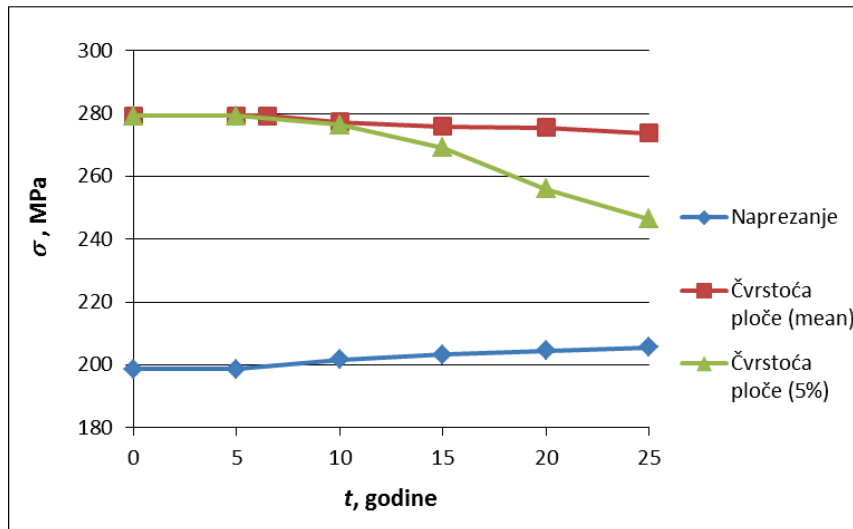
5.2. Utjecaj korozijskih istrošenja na kolapsnu čvrstoću ukrepljenih panela

Analiziran je porast naprezanja na palubi brodova uslijed gubitka momenta otpora te istovremeno smanjenje kolapsne čvrstoće palubne konstrukcije uslijed nepovoljnog djelovanja korozije. Na jednostavan način su prikazane točke u vremenu kada se očekuje da primijenjena naprezanja premaše čvrstoću ukrepljenih panela palubne konstrukcije. Korištena metodologija slijedi pristup Gua et al. [15] za kolaps ploča, ali je u ovom radu metoda proširena na kolaps uzdužnjaka palube.

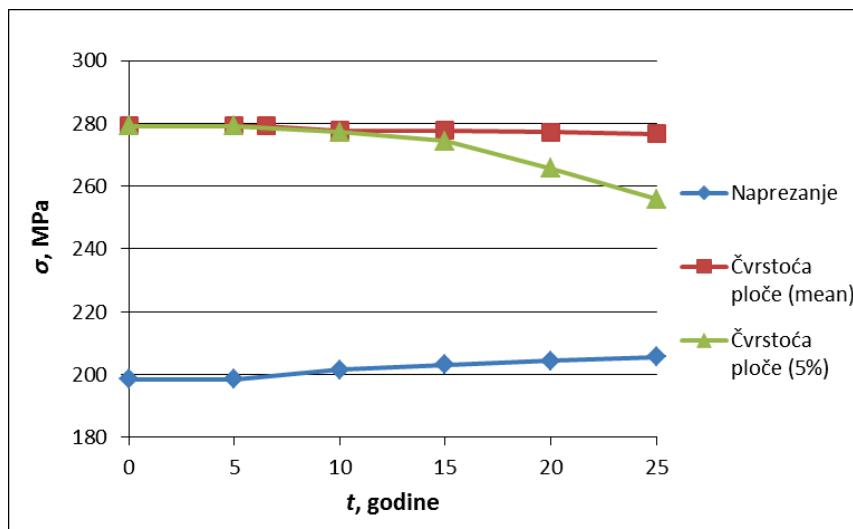
5.2.1. Jednolika korozijska istrošenja ploča i ukrepljenih panela palube

Gubitak momenta otpora uslijed korozijskih istrošenja tijekom godina službe dovodi do porasta naprezanja na glavnoj palubi. U isto vrijeme, korozijska istrošenja uvjetuju da se nosivost konstrukcijskih elemenata glavne palube smanjuje. Nakon nekog vremena, primijenjena naprezanja na glavnoj palubi postat će veća od granične nosivosti konstrukcijskih elemenata. Klasifikacijska društva nastoje izbjeći takvo nesigurno područje eksploatacije broda tako da se istrošeni limovi zamijene novima. Sljedeći dijagrami pokazuju u kojem vremenskom razdoblju može doći do takve neželjene situacije kada su naprezanja veća od nosivosti. Izvršena je detaljna analiza porasta naprezanja i smanjenja nosivosti za sva tri broda i to za slučajeve srednje i ekstremne jednolike (lokalne) korozije opločenja i ukrepljenih panela palubne konstrukcije. Također, analiza je provedena posebno za konstrukciju u tankovima (skladištima) tereta i balastnim tankovima. Svi proračuni potrebni za konstrukciju slika (dijagrama 5.5 - 5.16) dobiveni su primjenom nelinearne metode konačnih elemenata, kako je opisano u poglavlju 3 (točka 3.1.3).

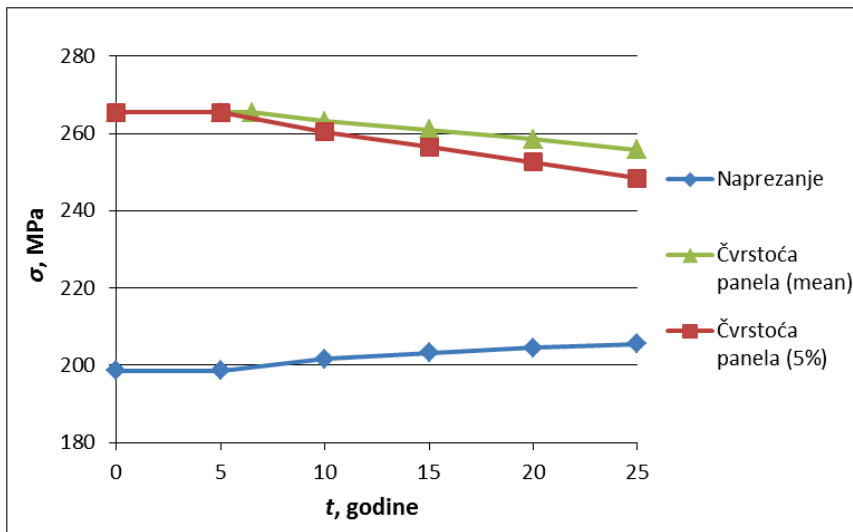
Brod 1



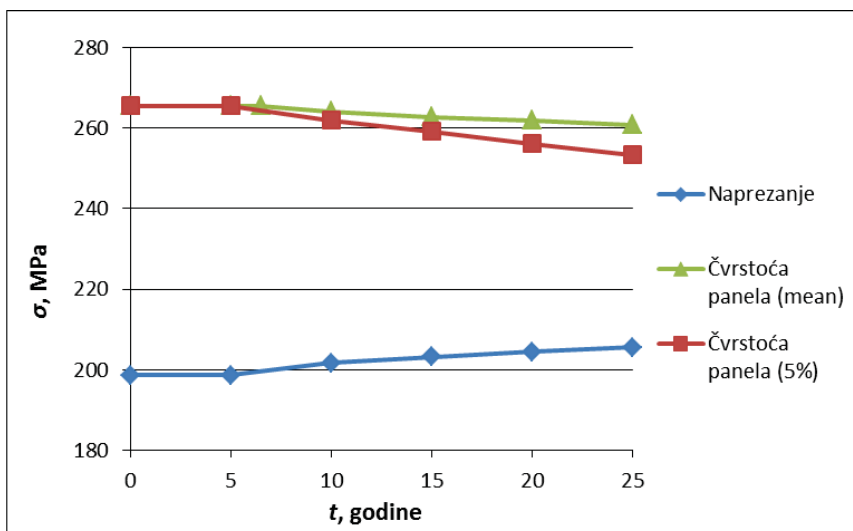
Slika 5.5 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube tankova tereta za Brod 1



Slika 5.6 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube balastnih tankova za Brod 1

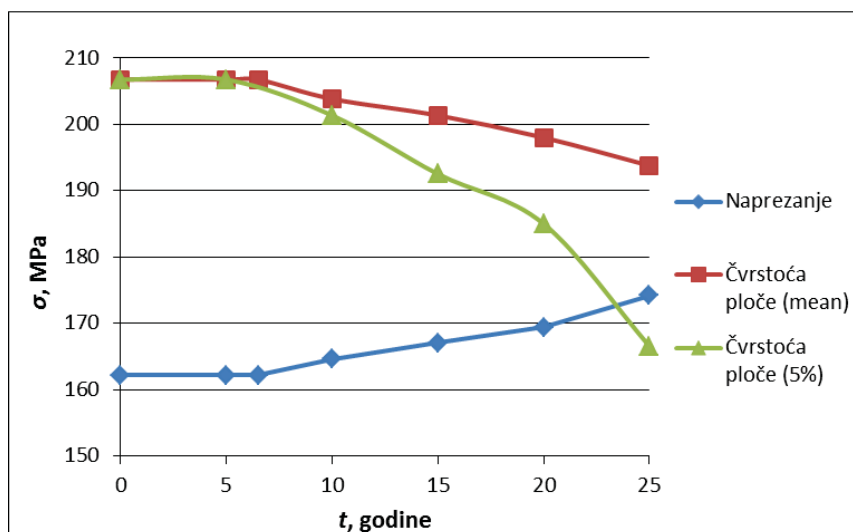


Slika 5.7 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube tankova tereta za Brod 1



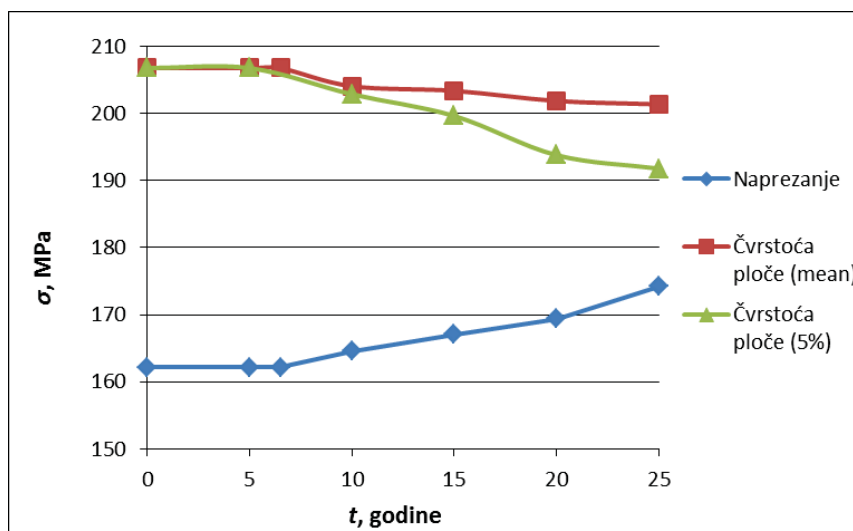
Slika 5.8 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube balastnih tankova za Brod 1

Brod 2

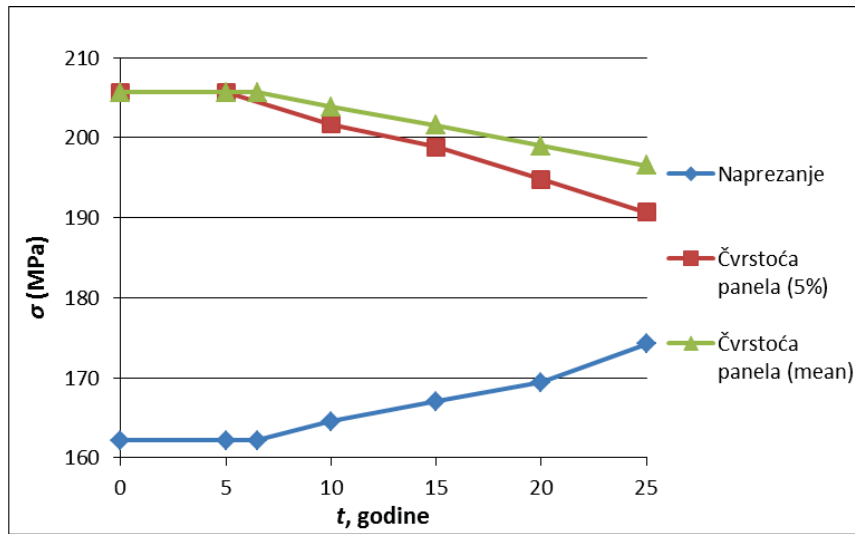


Slika 5.9 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube tankova tereta za Brod 2

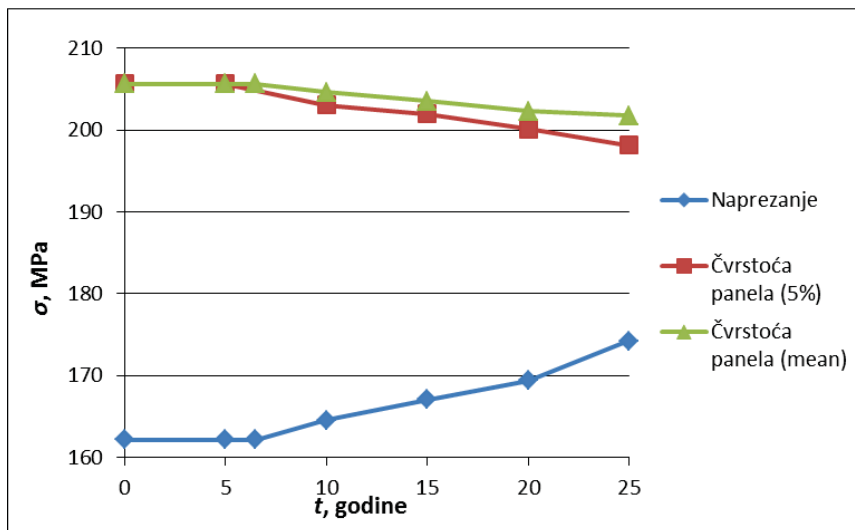
Vidljivo je na slici 5.9 da su primijenjena naprezanja premašila čvrstoću panela palubne konstrukcije nakon skoro 25 godina broda u službi. To se odnosi samo na 5% panela koji najviše gube na nosivosti, ali svakako može biti upozorenje brodovlasniku i klasifikacijskim društvima da je došlo vrijeme za inspekciju i remont.



Slika 5.10 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube balastnih tankova za Brod 2

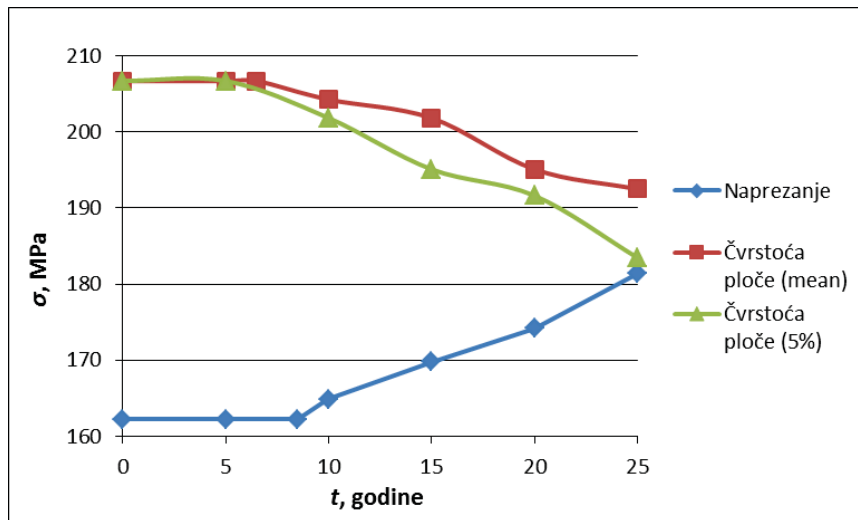


Slika 5.11 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube tankova tereta za Brod 2

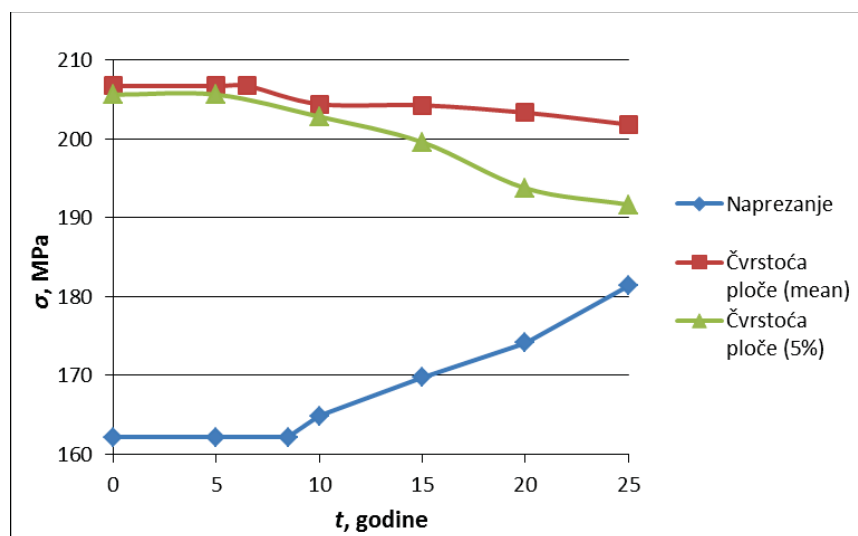


Slika 5.12 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube balastnih tankova za Brod 2

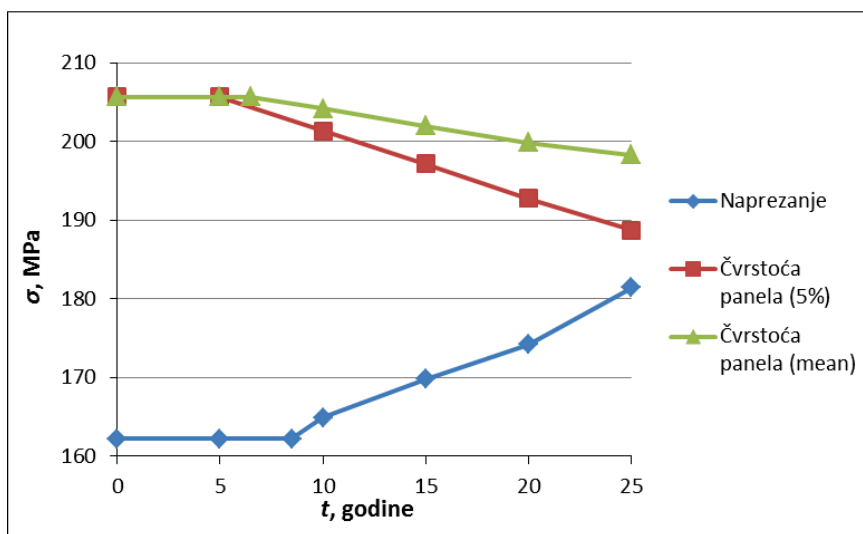
Brod 3



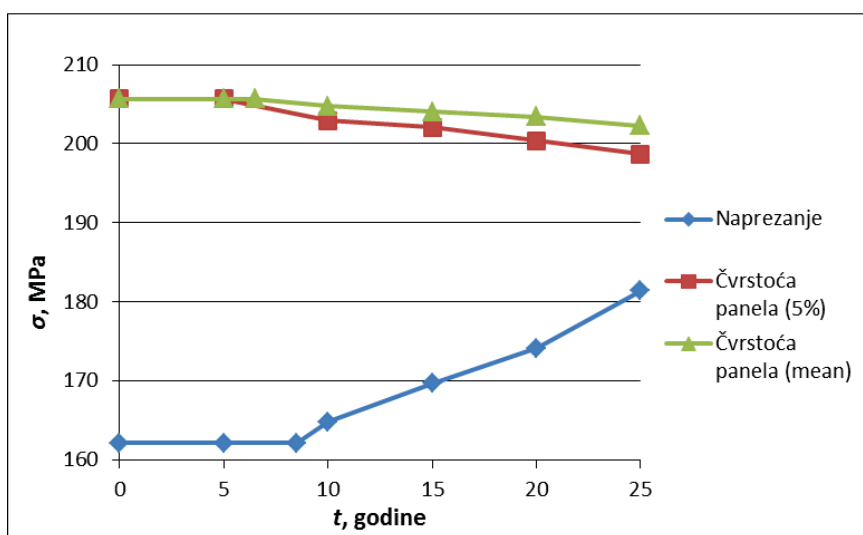
Slika 5.13 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube tankova tereta za Brod 3



Slika 5.14 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube balastnih tankova za Brod 3



Slika 5.15 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube tankova tereta za Brod 3



Slika 5.16 - Porast naprezanja/pad nosivosti uzdužnjaka palube balastnih tankova za Brod 3

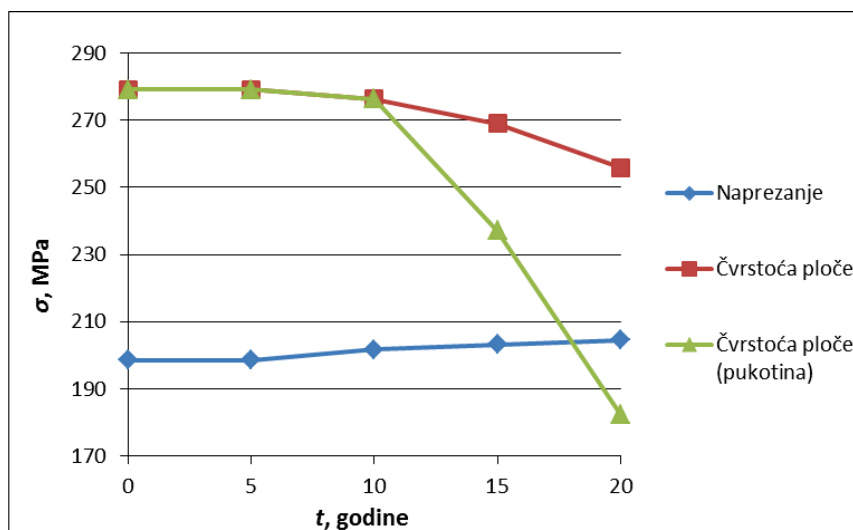
Možemo zaključiti na temelju prikazanih grafova da ploče i ukrepljeni paneli sva tri broda i nakon 25 godina zadržavaju potrebnu čvrstoću.

5.2.2. Nejednolika korozivna istrošenja (grooving, pitting i pukotine) ploča i ukrepljenih panela palube

Na temelju rezultata iz poglavlja 3. ovog rada, odnosno graničnih vrijednosti čvrstoće panela opterećenih na izvijanje pod djelovanjem pojava kao što su pukotine, žljebasta korozija (grooving) i rupičasta korozija (pitting), na narednim slikama (dijagramima) pokazano je kako iste utječu na smanjenje napreznja ploča i ukrepljenih panela za model Broda 1.

5.2.2.1. Pukotina ploče

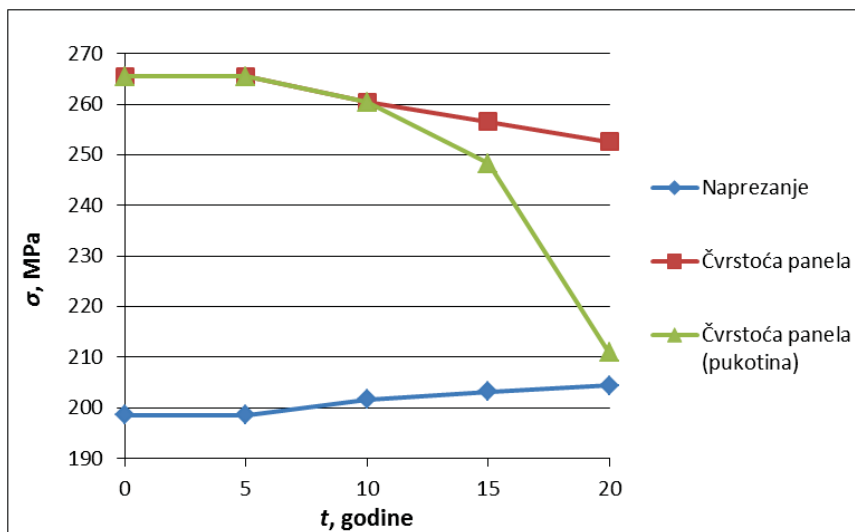
Simulirana je pojava pukotine nakon 15 godina, širine 200 mm, te nakon 20 godina, širine 400 mm.



Slika 5.17 - Porast napreznja/pad nosivosti panela palube sa i bez pukotine za Brod 1

5.2.2.2. Pukotina ukrepljenog panela

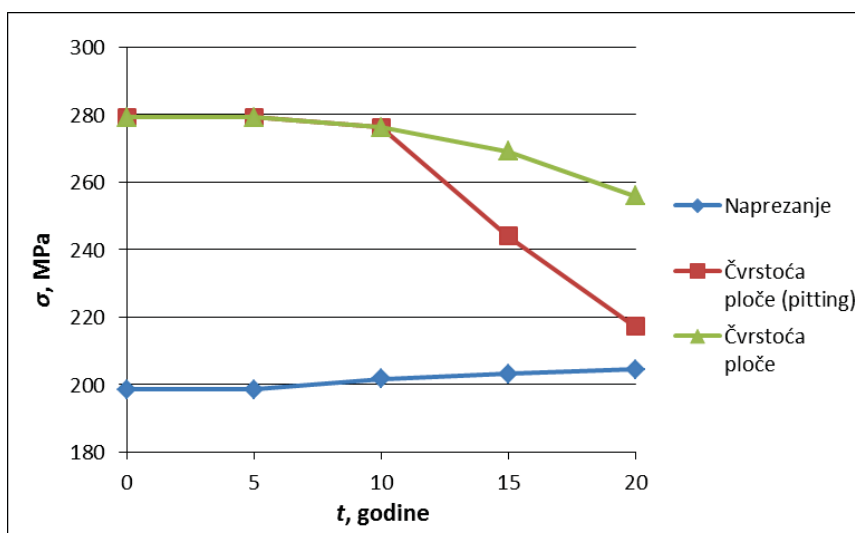
Jedna od čestih pojava kod brodova u službi nakon godina eksploatacije je pojava pukotine na uzdužnjaku u blizini poprečne oslanjajuće strukture. Rezultati simulacije kolapsne čvrstoće panela s ovakvom pukotinom su prikazani na sl. 5.18



Slika 5.18 - Porast naprezanja/pad nosivosti panela palube sa i bez pukotine za Brod 1

5.2.2.3. Rupičasta korozija ploče (pitting)

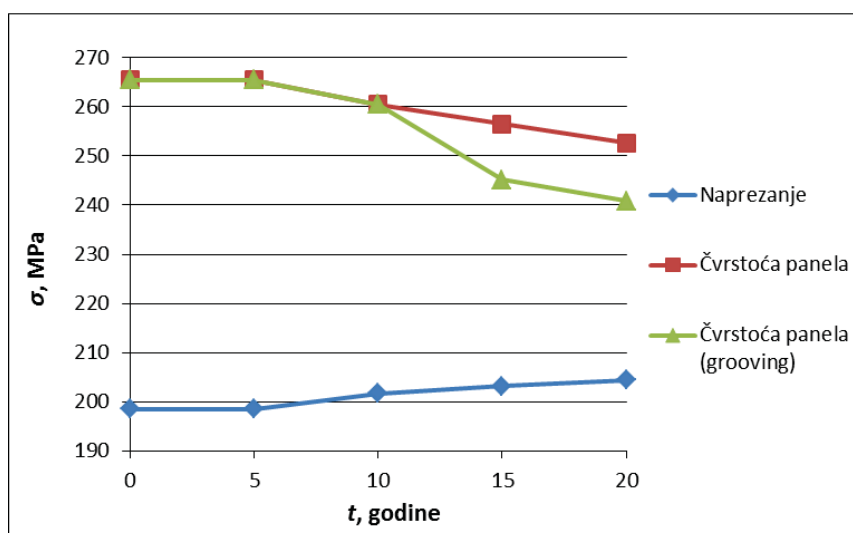
Rupičasta korozija je simulirana smanjenjem debljine materijala ploče na mjestu korozije za pola, i to na 5% ukupne površine nakon 15 godina broda u službi, a na 10% ukupne površine nakon 20 godina broda u službi.



Slika 5.19 - Porast naprezanja/pad nosivosti opločenja palube sa i bez rupičaste korozije za Brod 1

5.2.2.4. Žljebasta korozija (grooving)

Žljebasta korozija je simulirana smanjenjem debljine struka uzdužnjaka za 25% na spoju s pločom duž pola duljine uzdužnjaka nakon 15 godina, odnosno smanjenjem debljine struka uzdužnjaka za 25% duž cijele duljine uzdužnjaka nakon 20 godina.



Slika 5.20 - Porast naprezanja/pad nosivosti panela palube sa i bez žljebaste korozije za Brod 1

5.3. Provjera granične čvrstoće

Budući da je granični vertikalni moment savijanja najvažniji kriterij čvrstoće broskog trupa, potrebno ga je kontrolirati tijekom eksploatacije broda. Obzirom da je takva provjera podložna izrazitoj nesigurnosti zbog nepredvidivosti korozijskih istrošenja i valnog opterećenja, klasifikacijska društva koriste parcijalne faktore sigurnosti. Ti se faktori određuju probabilističkim metodama te korištenjem iskustava iz prakse, a njihove vrijednosti mogu dosta varirati. U ovom su radu korištena dva "kompleta" parcijalnih faktora sigurnosti:

1. Prema pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas (BV),
2. Prema Usuglašenim pravilima za tankere (CSR).

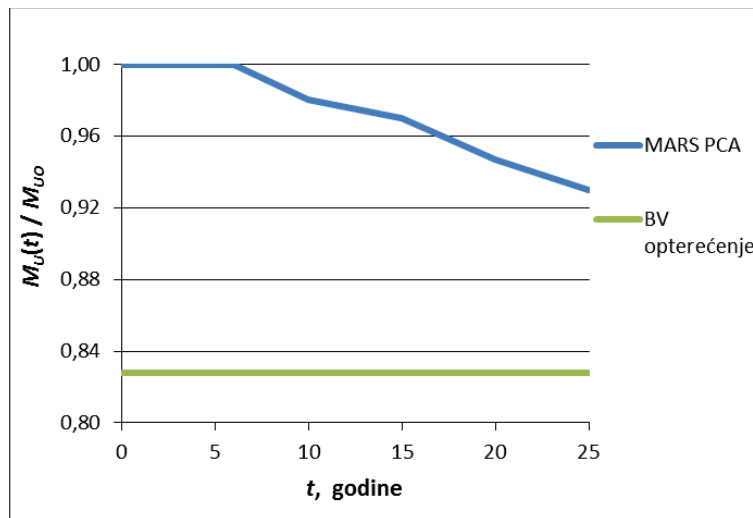
Vertikalni moment savijanja koji djeluje na brod sastoji se od dva dijela, momenta savijanja na mirnoj vodi i momenta savijanja na valovima. Moment savijanja na mirnoj vodi određuje se iz stanja krcanja broda, tj. rasporeda težina. Moment savijanja na valovima određuje se prema pravilima klasifikacijskih društava, odnosno CSR pravilima za gradnju tankera [1].

5.3.1. Provjera granične čvrstoće prema pravilima BV-a za jednolika korozijska istrošenja

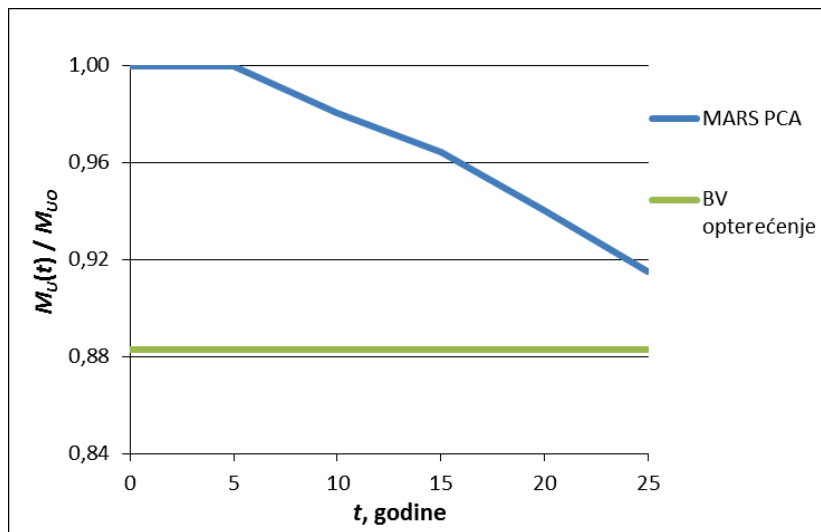
Parcijalni faktori sigurnosti prema pravilima BV-a glase [46]:

- mirna voda; $\gamma_{S1} = 1$
- valovi; $\gamma_{W1} = 1.1$
- materijal; $\gamma_m = 1.01$
- izdržljivost; $\gamma_R = 1.03$

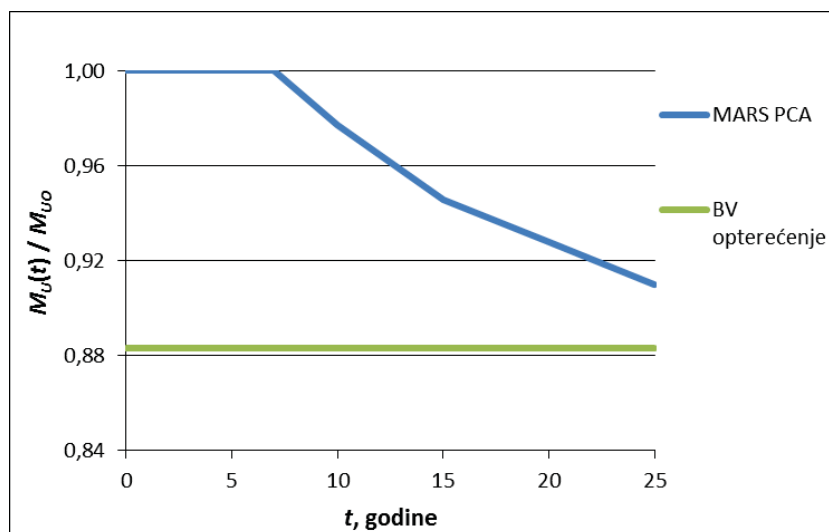
$$\gamma_S \cdot M_{SW,S} + \gamma_W \cdot M_{WV,S} \leq \frac{M_U}{\gamma_R \gamma_m} \quad (5.1)$$



Slika 5.21 - Usporedba prema BV graničnog momenta savijanja M_U i opterećenja u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 1



Slika 5.22 - Usporedba prema BV graničnog momenta savijanja M_U i opterećenja u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 2

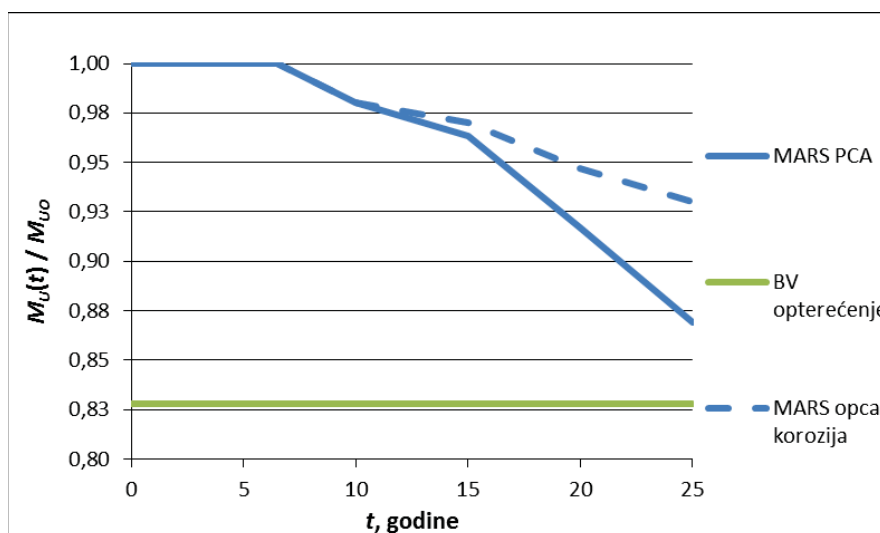


Slika 5.23 - Usporedba prema BV graničnog momenta savijanja M_U i opterećenja u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 3

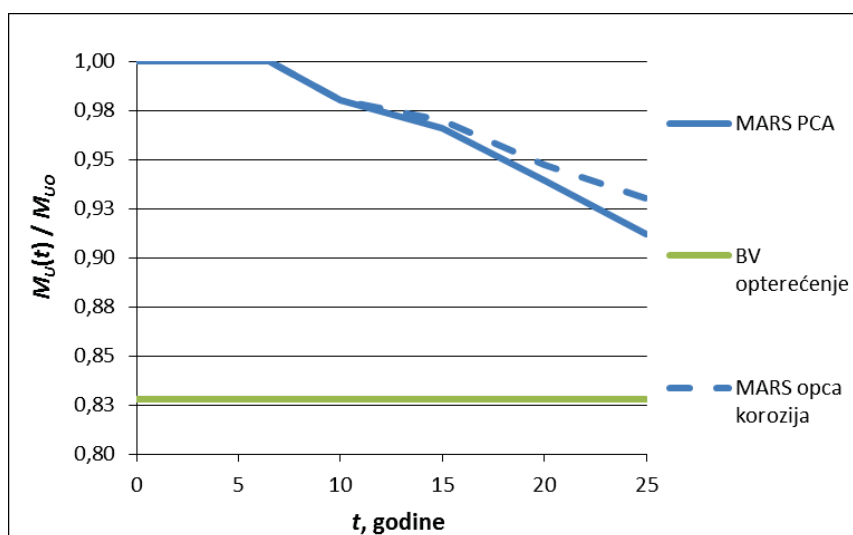
Uspoređujući vrijednosti iz slika (dijagrama) 5.21, 5.22 i 5.23 može se primijetiti da su kod sva tri promatrana broda i pripadajuća im stanja trupa, odnosno za izmjere debljina elemenata trupa nakon 10, 15 i 20 godina, s aspekta granične čvrstoće sukladno zahtjevima BV pravila, rezultati zadovoljavajući.

5.3.2. Provjera granične čvrstoće prema pravilima BV-a za nejednolika korozijska istrošenja

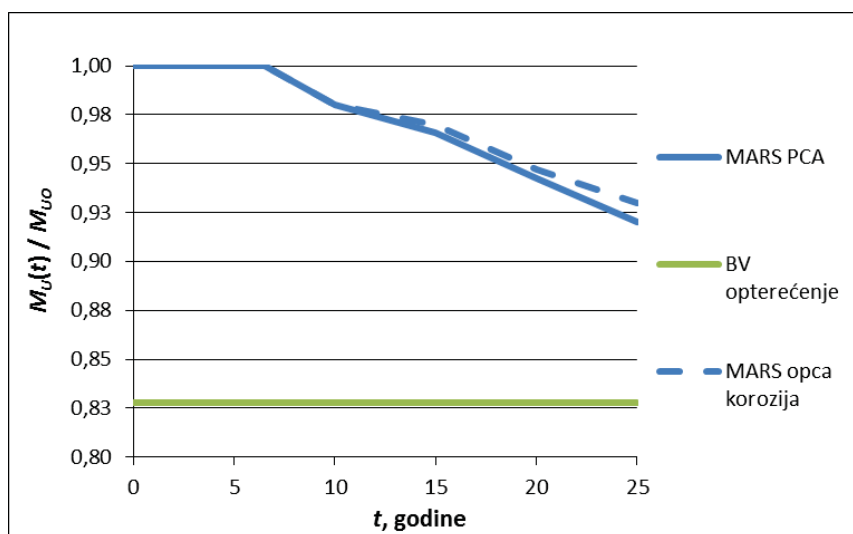
U trećem poglavlju ovog rada i točki 5.2.2 ovog poglavlja su određena granična naprezanja ukrepljenih panela oslabljenih uslijed djelovanja zamornih pukotina, rupičaste korozije (pitting) i korozije u žlijebu zavarenog spoja (grooving) za Brod 1. U 4. poglavlju su određeni granični momenti za navedene slučajeve.



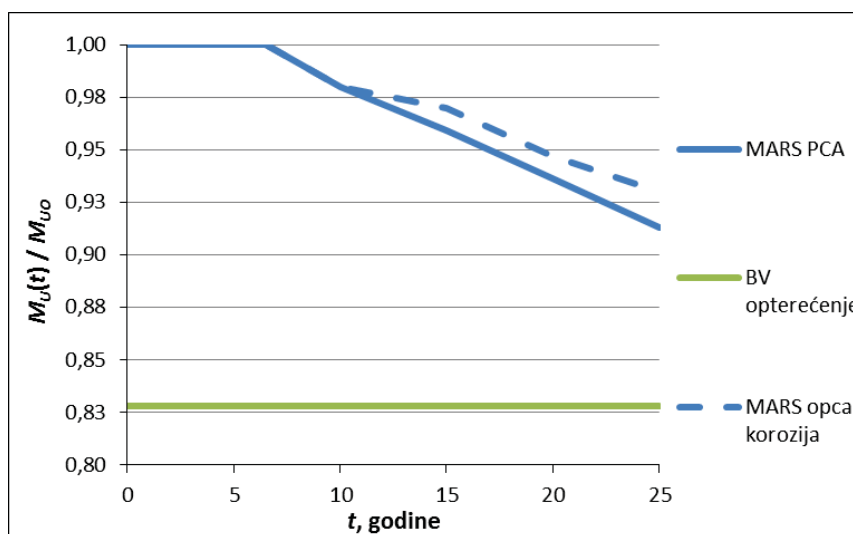
Slika 5.24 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem pukotine ploče palube i usporedba s BV opterećenjem



Slika 5.25 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem pukotine palubnih uzdužnjaka i usporedba s BV opterećenjem



Slika 5.26 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem korozije u žlijebu zavarenog spoja "grooving" i usporedba s BV opterećenjem



Slika 5.27 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U u vremenu pod djelovanjem nejednolike korozije "pitting" i usporedba s BV opterećenjem

Iz gornjih dijagrama se može primijetiti da jednolika korozija ima nešto manji utjecaj na smanjenje graničnog čvrstoće trupa od pukotine, nejednolike korozije ili korozije u žlijebu zavora. U svim slučajevima postoji određena rezerva granične nosivosti i nakon 25 godina.

5.3.3. Provjera granične čvrstoće prema Usuglašenim Pravilima CSR za tankere s dvostrukom oplatom

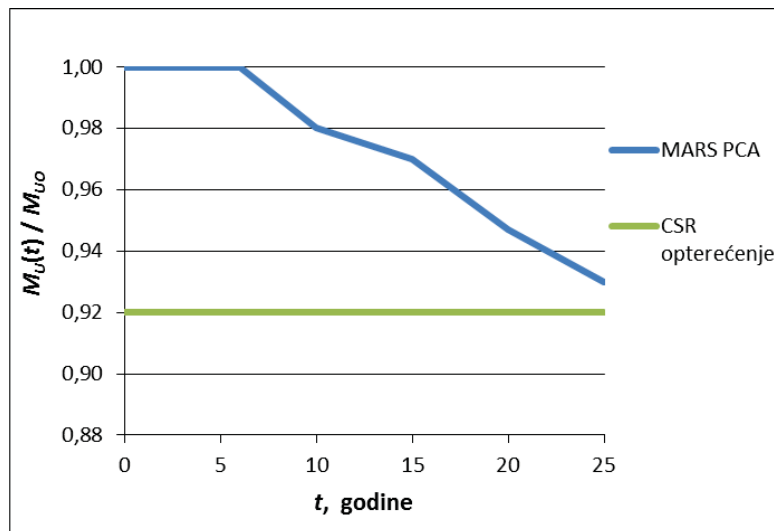
Iako su nova Usuglašena Pravila rađena za tankere s dvostrukom oplatom, a tri promatrana broda su tankeri s jednostrukom oplatom, izvršena je provjera granične čvrstoće broskog trupa u svrhu procijene nosivosti s obzirom na granični moment savijanja trupa i po novim kriterijima CSR-a:

$$\gamma_S \cdot M_{SW,S} + \gamma_W \cdot M_{WV,S} \leq \frac{M_U}{\gamma_R}, \quad (5.2)$$

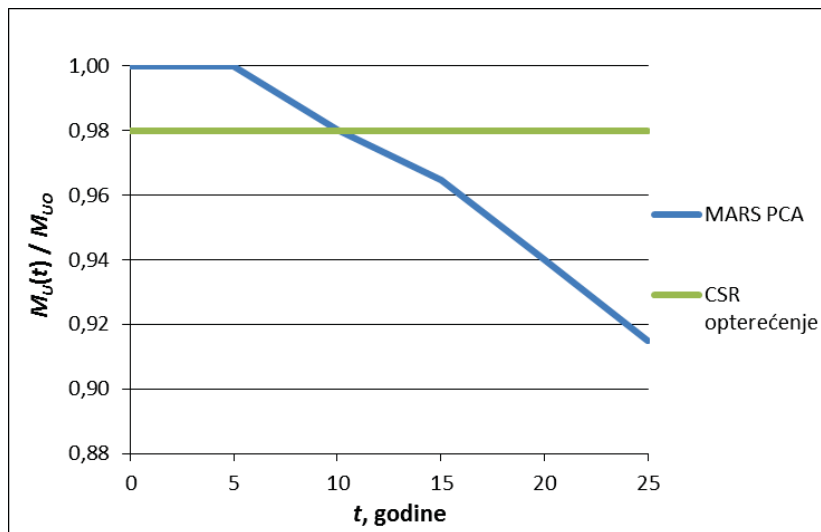
gdje su:

Parcijalni faktori sigurnosti prema CSR

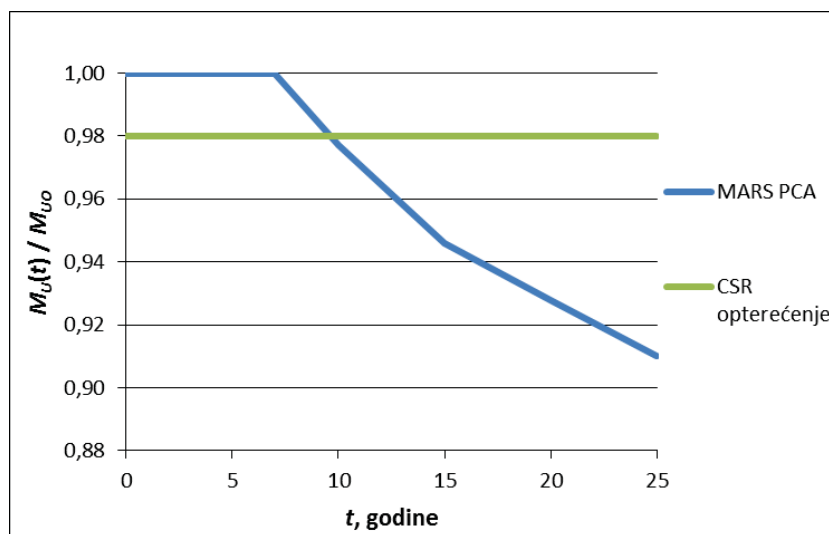
- mirna voda; $\gamma_S = 1.0$
- valovi; $\gamma_W = 1.2$
- materijal i geometrijske nepravilnosti; $\gamma_R = 1.1$



Slika 5.28 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U prema CSR u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 1



Slika 5.29 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U prema CSR u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 2



Slika 5.30 - Smanjenje graničnog momenta savijanja M_U prema CSR u ovisnosti o vremenu za opću koroziju za Brod 3

Uspoređivanjem vrijednosti slika (dijagrama) 5.28, 5.29 i 5.30 s rezultatom jednadžbe (5.2) prema CSR, vidi se da su za Brod 1 sva stanja broskog trupa s obzirom na uvjete granične čvrstoće rezultati zadovoljavajući.

Promatrani modeli brodske strukture, Brod 2 i 3, s obzirom na uvjet granične čvrstoće, jedino za izvorne dimenzije (as built) i s korozijskim istrošenjima nakon 5 godina,

udovoljavaju zahtjevima CSR pravila. Sva ostala stanja trupa, tj. mjerena (survey) nakon 10, 15 i 20 godina službe, s aspekta granične čvrstoće nisu zadovoljavajuća.

Razlog nezadovoljavajućih rezultata provjere granične čvrstoće prema CSR leži u tome što su promatrani tankeri izgrađeni prije 25 godina kada se nije provjeravala granična čvrstoća, te zahtjevi proizašli iz CSR pravila nisu bili u upotrebi.

Također, ako usporedimo vrijednosti omjera opterećenja prema pravilima CSR i BV može se primijetiti da je razlika između opterećenja za Brod 1 otprilike 0.1 (CSR = 0.92 i BV = 0.828), kao i za Brod 2 i 3 također 0.1 (CSR = 0.98 i BV = 0.88). Iz navedenog se može zaključiti da je općenito margina sigurnosti upotrebom novih usuglašanih pravila povišena kod računanja graničnih momenata upotrebom parcijalnih faktora za naftne tankere oko 10%.

5.4. Primjena korozijskog modela u analizi dinamičke izdržljivosti broskog trupa

Zamor i korozija su prepoznati kao dominantni čimbenici koji doprinose lomu konstrukcije trupa brodova u službi. Zamor se može objasniti kao ciklički proces akumulacije pukotine u broskoj konstrukciji s obzirom na raspon fluktuirajućih naprezanja. Sve do nedavno zamor se više smatrao lokalnim problemom održavanja brodske konstrukcije nego globalnim problemom čvrstoće konstrukcije trupa. Međutim, recentna istraživanja povezana s razvojem Usuglašanih CSR pravila pokazala su da su učestale pukotine na palubnoj konstrukciji prouzrokovane ne samo djelovanjem lokalnih dinamičkih opterećenja već globalnim dinamičkim opterećenjem kao što je moment savijanja na valovima. Drugim riječima, dinamička izdržljivost poprečnog presjeka glavnog rebra može postati prevladavajući kriterij čvrstoće za naftne tankere. To vrijedi naročito ako se kao materijal gradnje upotrebljava čelik povišenih mehaničkih karakteristika [1], [48], [49], [50].

Predviđanje zamora brodskih konstrukcija uobičajeno se provodi S-N pristupom. U S-N pristupu se koriste proračunski modeli koji se temelje na jednostavnim pretpostavkama i statističkoj analizi opterećenja tijekom cijelog zamornog vijeka. Ova metoda ne analizira sam proces zamora, već je osnovni cilj S-N pristupa procijeniti vrijeme konačne dinamičke izdržljivosti za zadanu razinu vjerojatnosti. To znači da se prilikom korištenja S-N krivulja zanemaruje postojanje pukotina i činjenica da je upravo propagacija (napredovanje) pukotina uzrok zamora i propadanja brodskih konstrukcija.

Pristup proračunu zamora koji je korišten u ovom radu je sličan pristupu korištenom u CSR. Osnovna razlika je što se ovdje koriste stvarna korozijska istrošenja trupa koja su opisana u 2. poglavlju rada, dok se u CSR koristi korozijsko istrošenje za koje je

pretpostavljeno da je konstantno tijekom čitavog životnog vijeka broda. Pristup preporučen u CSR je praktičan, ali istovremeno i nerealan, jer su korozijska istrošenja zapravo nelinearne vremenske funkcije. Uz relativno mali dodatni proračunski napor mogu se odrediti fizikalno prihvatljivije vrijednosti akumuliranog oštećenja. Prednost ovdje predloženog pristupa je u tome da se bolje uzimaju u obzir stvarne značajke korozijskih istrošenja izmjerene na inspekcijskim pregledima. Time se omogućava inspektoru i vlasniku broda realnije sagledavanje utjecaja održavanja broda i stanja trupa na akumulirano oštećenje koje inače nije vidljivo niti se može fizikalno izmjeriti.

U radu je izvršen proračun uzdužnjaka palube na zamor materijala korištenjem sljedećeg izraza [48]:

$$DM_i = \frac{\alpha_i \cdot N_L}{K_2} \cdot \frac{S_{Ri}^m}{\ln(N_R)^{\frac{m}{\xi}}} \cdot \mu_i \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) \quad (5.3)$$

gdje je:

$\alpha_i = 1$; proporcija stanja broda (teret/balast) tijekom života

$K_2 = 6.3 \cdot 10^{11}$; koeficijent S-N krivulje za F-detalj

$m = 3$; eksponent S-N krivulje za F-detalj

N_L - broj ciklusa u očekivanom vijeku broda

$$N_L = \frac{f_0 \cdot U}{4 \cdot \log(L)} \quad (5.4)$$

gdje je:

$f_0 = 0.85$; faktor koji uzima u obzir neoperativno vrijeme broda

$U = 3.154 \cdot 10^7$; broj sekundi u jednoj godini

S_{Ri} - raspon naprezanja

$$S_{Ri} = \frac{M_{Ri}}{Z_V \cdot 10^3} \quad (5.5)$$

gdje je:

M_{Ri} - raspon valnog momenata savijanja

$$M_{Ri} = M_{wvhog} - M_{wvsag} \quad (5.6)$$

ξ - Weibullov parametar

μ_i - koeficijent nagiba S-N krivulje

$$\mu_i = 1 - \frac{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, \nu_i\right) - \nu_i^{-\frac{\Delta m}{\xi}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)} \quad (5.7)$$

gdje je:

$\Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$ - gamma funkcija

$\Gamma\left(1 + \frac{m + \Delta m}{\xi}, \nu_i\right)$ - nepotpuna gamma funkcija

$\Delta m = 2$; promjena nagiba gornjeg/donjeg dijela S-N krivulje

ν_i - argument nepotpune gamma funkcije

$$\nu_i = \left(\frac{S_q}{S_{Ri}}\right)^\xi \cdot \ln N_R \quad (5.8)$$

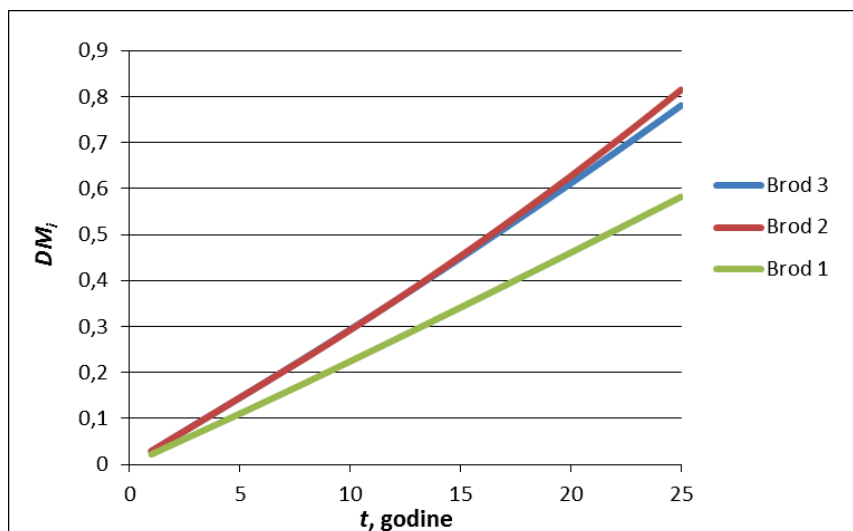
gdje je:

$S_q = 39.8$ [N/mm²]; raspon naprezanja na presjeku dva segmenta S-N krivulje:

$N_R = 10000$; broj ciklusa opterećenja koji odgovara vjerojatnosti premašivanja od 10^{-4}

$$\text{Zamorni životni vijek} = \frac{\text{Projektni životni vijek}}{DM_i} \quad (5.9)$$

Sukladno zahtjevima CSR pravila projektni životni vijek trebao bi biti veći od 25 godina. Kao što je već naglašeno, akumulirano oštećenje se računa za svaku godinu službe ponaosob, uzimajući u obzir stvarna naprezanja trupa kao grednog nosača, određena na osnovi krivulje izmjerenog gubitka momenta otpora trupa. Rezultati takvog proračuna za tri broda koja su proučavana u radu su prikazani na slici 5.31 te u tablicama 5.1–5.3. U tablicama su prikazani i rezultati proračuna za konstantne gubitke momenta otpora tijekom čitavog životnog vijeka prema CSR pravilima za dinamičku izdržljivost (25% maksimalne korozije pojedinih elemenata) te također prema pravilima za proračun uzdužne čvrstoće (50% maksimalne korozije pojedinih elemenata) Iako u promatranim primjerima nema velikih razlika u konačnim rezultatima, predloženi pristup omogućava nešto bolji uvid u dinamičku izdržljivost broskog trupa u odnosu na CRS pravila.



Slika 5.31 - Rezultati akumuliranog oštećenja dobiven proračunom S-N pristupa [49]

Tablica 5.1 - Akumulirana oštećenja i zamorni životni vijek za različite stupnjeve korozijske istrošenosti Broda 1

| Stanje trupa Broj 1 | AS BUILT | 25% CSR (slučaj iz Pravila) | 50% CSR | Izmjerena korozijska istrošenja |
|-------------------------------|----------|--------------------------------|---------|---------------------------------------|
| Akumulirana oštećenja - DM | 0.5 | 0.54 | 0.59 | 0.58 |
| Zamorni životni vijek | 50 | 46 | 42 | 43 |

Tablica 5.2 - Akumulirana oštećenja i zamorni životni vijek za različite stupnjeve korozijske istrošenosti Broda 2

| Stanje trupa Broj 2 | AS BUILT | 25% CSR (slučaj iz Pravila) | 50% CSR | Izmjerena korozijska istrošenja |
|-------------------------------|----------|--------------------------------|---------|---------------------------------------|
| Akumulirana oštećenja - DM | 0.75 | 0.8 | 0.825 | 0.78 |
| Zamorni životni vijek | 33 | 31 | 30 | 32 |

Tablica 5.3 - Akumulirana oštećenja i zamorni životni vijek za različite stupnjeve korozijske istrošenosti Broda 3

| Stanje trupa Brođ 3 | AS BUILT | 25% CSR (slučaj iz Pravila) | 50% CSR | Izmjerena korozijska istrošenja |
|-------------------------------|----------|--------------------------------|---------|---------------------------------------|
| Akumulirana oštećenja - DM | 0.75 | 0.8 | 0.825 | 0.81 |
| Zamorni životni vijek | 33 | 31 | 30 | 31 |

6. ZAKLJUČAK DOKTORSKOG RADA

6.1. Zaključna razmatranja i izvorni znanstveni doprinos doktorskog rada

Projektirati i graditi brodsku konstrukciju s marginama sigurnosti kod kojih brod nema potrebe za odlaskom u remontno brodogradilište na popravak za vrijeme njegovog vijeka trajanja nije ekonomično za brodovlasnike i teško je ostvarivo za tipove brodova koji su za sada potrebni na svjetskom pomorskom tržištu. Visoka kvaliteta pregleda i kontrola napredovanja korozije može biti garancija pouzdanosti brodske konstrukcije ukoliko se ona periodično podvrgava izmjenama istrošenih elemenata konstrukcije trupa. Temeljna svrha svih klasifikacijskih pregleda je osiguravanje cjelovitosti strukture trupa, ne samo tijekom pregleda, već i tijekom svih godina koje će brod provesti u eksploataciji. Brod, kao složen i skup proizvod, svoju funkciju mora obavljati tijekom životnog vijeka od nekoliko desetljeća u uvjetima koji su s korozijskog stajališta iznimno nepovoljni. Korozijska oštećenja i zamorne pukotine mogu prouzrokovati velike probleme na brodskoj strukturi, a s vremenom i kolaps cijele konstrukcije. Stoga se glavna primjena istraživanja predloženih u ovom radu može naći unutar klasifikacijskih društava i brodovlasnika, kao pomoć u proceduri inspekcijskih pregleda i održavanja brodova u službi.

Obrađene su metode za dugoročno predviđanje napredovanja korozije, upotrebom matematičkih modela u vremenu. Nelinearni korozijski modeli se intenzivno razvijaju u posljednje vrijeme, ali još nisu našli punu primjenu u praksi, pa je naglasak istraživanja izvršenih u radu u njihovoj boljoj praktičnoj primjenjivosti. Doprinos ostvaren u radu ogleda se u primjeni modela za predviđanje propagacije korozije na individualne brodske konstrukcije, za razliku od dosadašnjeg pristupa u kojem se razmatrala čitava flota brodova. Nelinearni model korozijske propagacije kalibriran je na temelju mjerenja korozijskih istrošenja nakon 10 i 15 godina, te je ustanovljeno relativno dobro slaganje predviđenih i izmjerenih istrošenja nakon 20 godina. Opravdanost individualnog pristupa je posebno zanimljiva brodovlasnicima, koji na taj način mogu unaprijed planirati troškove održavanja konstrukcije trupa odnosno predvidjeti istrošenja do idućeg inspekcijskog pregleda.

U radu je predložen matematički model konačnih elemenata za nelinearnu analizu (NMKE) pogodan za praktičnu analizu kolapsa jednoosno opterećenih ploča i ukrepljenih panela. Originalnost modela se ogleda u njegovoj jednostavnosti i pouzdanosti, jer je kao takav pogodan za primjenu u svakodnevnoj inženjerskoj praksi unutar klasifikacijskih društava. Model NMKE je kalibriran i provjeren usporedbom s metodom iz CSR te

programom PULS. Prednosti analize kolapsa NMKE u odnosu na metodu iz CSR i program PULS je niz mogućnosti promjene parametara koji se događaju brodu tijekom službe. Pojave kao što su pukotine na ploči, pukotine na ukrepljenom panelu, žljebasta korozija (grooving), te rupičasta korozija (pitting) često se susreću na brodu u službi nakon godina u eksploataciji. Ovakvi uvjeti se mogu simulirati pomoću NMKE, što za ostale dvije metode nije slučaj.

Nejednolika korozijska istrošenja i zamorne pukotine su inkorporirane u proračun granične čvrstoće broskog trupa. Pri tome su korištene metoda jednog koraka te metoda progresivnog kolapsa. Metoda jednog koraka je posebno pogodna za praktičnu primjenu jer omogućava direktno korištenje rezultata kolapsa ukrepljenih panela palubne konstrukcije dobivenih NMKE. Komparativna analiza provedena u radu je pokazala da u idealnim uvjetima jednolikih korozijskih istrošenja, metoda jednog koraka daje 2% niže rezultate proračuna granične čvrstoće u odnosu na metodu progresivnog kolapsa. U radu je također potvrđeno da nejednolika korozijska istrošenja i pukotine mogu značajno smanjiti graničnu čvrstoću broskog trupa te ih treba najozbiljnije shvatiti kod inspekcijskih pregleda.

Predloženo je nekoliko praktičnih primjena metoda razvijenih u radu kao pomoć u proceduri inspekcije i održavanja brodova u službi. Predložene su korozijske mape, koje bi inspektorima u praksi olakšale odlučivanje o skupim detaljnim pregledima i popravcima konstrukcije. Nadalje su predloženi dijagrami porasta naprezanja na palubi brodova uslijed gubitka momenta otpora uz istovremeno smanjenje kolapsne čvrstoće palubne konstrukcije zbog nepovoljnog djelovanja korozije. Na jednostavan način su prikazane točke u vremenu kada se očekuje da primijenjena naprezanja premaše čvrstoću ukrepljenih panela palubne konstrukcije. Metoda je nadalje proširena na provjeru granične čvrstoće trupa uz primjenu parcijalnih faktora sigurnosti. Na kraju je predložena metoda za procjenu dinamičke (zamorne) izdržljivosti konstrukcije uz vremenski promjenjiva korozijska istrošenja.

6.2. Smjernice za daljnja istraživanja

Istraživanja provedena u ovom radu imaju za cilj unapređenje primjene direktnih proračunskih postupaka u inspekcijskim pregledima i planiranju popravaka brodske konstrukcije. Preporuke za daljnja istraživanja na ovom području mogu se usmjeriti na dva područja:

- istraživanje propagacija pukotina u broskoj konstrukciji;
- primjena metoda pouzdanosti i metoda utemeljenih na riziku na održavanje brodske konstrukcije.

Metoda propagacije pukotine predstavlja nadolazeću metodologiju kojom se, primjenom mehanike loma, mogu analizirati i tolerirati male zamorne pukotine koje se javljaju oko zavarenih spojeva. Zbog kompleksnosti zavarenih brodskih konstrukcija, brojnih neizvjesnosti vezanih za vjerodostojno određivanje njihova opterećenja i čvrstoće te na kraju zbog kontinuirane promjenjivosti stanja brodova uslijed degradirajućih utjecaja korozije, metode propagacije pukotine nisu još uvijek zaživjele u brodograđevnoj praksi. Posebno su važni utjecaji različitih parametara koji mogu utjecati na faktor intenzivnosti naprezanja, a čije određivanje je vrlo neizvjesno. Tipičan primjer je neizvjesnost određivanja faktora koncentracije naprezanja u uvjetima postojanja pukotine. Sa strane opterećenja, veliku tehničku poteškoću predstavlja nepredvidivost slučajnog valnog opterećenja brodske konstrukcije, koji je glavni čimbenik zamornog opterećenja i propagacije pukotine. Predviđanje rasta pukotine u uvjetima slučajnog opterećenja je izazovan i složen problem koji je danas predmet istraživanja. Poboljšanje spoznaja i unapređenje metoda za analizu propagacije pukotine moglo bi se izrazito pozitivno odraziti na učinkovitost metoda razvijenih u ovom radu, te svakako treba provoditi istraživanja na tom području.

S obzirom na spomenute brojne neizvjesnosti vezane za određivanje korozijskih istrošenja, opterećenja, čvrstoće i dinamičke izdržljivosti brodskih konstrukcija, primjena metoda pouzdanosti se nameće kao prikladna proračunska metodologija. Važno je naglasiti da se metode pouzdanosti primjenjuju ne samo za određivanje indeksa sigurnosti, tj. vjerojatnosti oštećenja konstrukcije već i za analizu osjetljivosti u odnosu na relevantne varijable. Drugim riječima, metodama pouzdanosti se može ustanoviti koji parametri najviše utječu na vjerojatnost oštećenja, te se na njih treba usredotočiti kod inspekcijskih pregleda. Već se dugo vremena provode istraživanja vezana za primjenu metoda pouzdanosti za procjenu stanja brodske konstrukcije te za planiranje inspekcijskih pregleda i popravaka. U budućnosti bi trebalo provoditi i podržati istraživanja na tom području s posebnim naglaskom na praktičnu primjenjivost metoda pouzdanosti i rizika.

7. LITERATURA

- [1] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING, DET NORSKE VERITAS, LLOYD'S REGISTER, "Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers", 2010.
- [2] GUEDES SOARES, C., GARBATOV, Y. "Reliability of maintained ship hull girders subjected to corrosion and fatigue", *Structural Safety*, vol. 20, pp 201-219; 1998.
- [3] AKPAN, U.O., KOKO, T.S., AYYUB, B., DUNBAR, T.E., "Risk assessment of aging ship hull structure in the presence of corrosion and fatigue", *Marine Structures*, vol.15, pp 201-231; 2002.
- [4] PAIK, J.K., WANG, G., THAYAMBALLI, A., LEE, J.M., PARK, Y.I., "Time-dependent risk assessment of aging ships accounting for general/pit corrosion, fatigue cracking and local denting damage", *Transactions SNAME*, 111, pp 159-197; 2003.
- [5] ISSC, "Condition Assessment of Aged Ships and Offshore Structures", Seoul (Koreja) 2009.
- [6] ISSC, "Condition Assessment of Aged Ships", Southampton (UK) 2006.
- [7] GARBATOV, Y. GUEDES SOARES C., "Corrosion Wastage Modeling of Deteriorated Bulk Carrier Decks", *International Shipbuilding Progress*, vol. 55, pp 109-125; 2008.
- [8] CHOWDHURY, M., "The changes in mean and variance of midship section properties due to uniform corrosion wear", *Ships and Offshore Structures*, vol.3, No.1, pp 67-77; 2008.
- [9] WANG, G., LEE, A., IVANOV, L., LYNCH, T., SERRATELLA, C., BASU, R., "A statistical investigation of time-variant hull girder strength of aging ships and coating life", *Marine Structures*, vol.21, pp 240-256; 2008.
- [10] GUO, J., WANG, G., LEE, A., IVANOV, L. PERAKIS, A.N., "Time-varying ultimate strength of aging tanker deck plate considering corrosion effect", *Marine Structures*, vol.21, pp 402-419; 2008.
- [11] HUGHES, O. S., PAIK, J.K., "Ship structural analyses and design", Trans. SNAME, New Jersey 2010.
- [12] IACS, "Harmonization Project Team on CSR Corrosion Addition", Houston (USA) 2011.
- [13] PARUNOV, J., ŽIHA, K., MAGE, P., "Corrosion wastage of oil tankers – A case study of an aged ship", *Maritime Industry, Ocean Engineering and Coastal Resources*, C. Guedes Soares and P Kolev, (Eds), Taylor & Francis, 271-276; UK 2007.
- [14] PARUNOV, J., MAGE, P., GUEDES SOARES, C., "Hull-girder reliability of an aged oil tanker", *Proceedings of the 27th OMAE Conference*, Estoril (Portugal) 2008.
- [15] JURIŠIĆ, P. PARUNOV, J., "Long-term prediction of global corrosion wastage of oil tankers", SORTA, Korčula 2010.
- [16] JURIŠIĆ, P., PARUNOV, J., ŽIHA, K., "Uncertainty in corrosion wastage prediction of oil tankers", *Proceedings of IMAM*, vol.1, pp 395-401; Genova (Italija) 2011.
- [17] ŽIHA, K., PEKAS,P., "Utjecaji mjestimičnog hrđanja na savojnu čvrstoću brodskih ukrepljenih panela", *Brodogradnja* 49(1), pp 61-65; 2001.
- [18] PAIK, J.K., THAYAMBALLI, A. K., "Ship-shaped offshore installation: Design, Building and Operation", Cambridge University Press, New York (USA) 2007.
- [19] ZAYED, A., GARBATOV, Y., GUEDES SOARES, C., WANG, G., "Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere", *Marine Structures*, vol.51, No.9, pp 2014-2026; 2009.
- [20] PANAYOTOVA, M., GARBATOV, Y., GUEDES SOARES C., "Corrosion monitoring of ship hulls", *Proceedings of IMAM*, Varna (Bugarska) 2007.

- [21] ROBERGE, P.R., "Handbook of corrosion engineering", McGraw-Hill, USA 1999.
- [22] GARDINER, C.P., MELCHERS, R.E. , "Corrosion analysis of bulk carriers", Marine Structures, vol.16, pp 547-566; 2003.
- [23] ZAYED, A., GARBATOV, Y., GUEDES SOARES, C., WANG, G., "Corrosion wastage model for ship crude oil tanks", Marine Structures, vol.50, pp 3095-3106; 2008.
- [24] ZAYED, A., GARBATOV, Y., GUEDES SOARES, C., WANG, G., "Environmental factors affecting the time dependent corrosion wastage of marine structures", Marine transportation and exploitation of ocean and costal resources, vol.1, Taylor & Francis, pp 589-598; 2005.
- [25] JURAGA, I., STOJANOVIĆ, I., NORŠIĆ, T., "Zaštita brodskog trupa od korozije i obraštanja", Brodogradnja 58, pp 278-283; 2007.
- [26] ZAYED, A., GARBATOV, Y., GUEDES SOARES, C., "Factors affecting the nondestructive inspection of marine structure", International Conference on Marine Structures, Glasgows (UK) 2007.
- [27] PAIK, J.K., MELCHERS, R.E., RIZZO, C.M., "Condition assessment of Aged Ship" structures", Taylor & Francis Group, London (UK), 2008.
- [28] GARBATOV, Y., GUEDES SOARES, C., PARMENTIER, G., RIZZO. C.M., PU. Y., "Modelling strength degradation phenomena and inspection used for reliability assessment based on maintenance planning", Proceedings of OMAE, Hamburg (Njemačka) 2006.
- [29] BOON, B., "Net scantlings and structural reliability", Proceedings of the 27th OMAE Conference , Estoril (Portugal) 2008.
- [30] BUREAU VERITAS, "MARS software 2000", Paris (Francuska) 2003.
- [31] IACS PR No. 34 (Rev.3 Corr.1), "Procedural Requirement on Application for the IMO Performance Standard for Protective Coatings (PSPC) ", Resolution MSC.215(82) under IACS Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, 2008.
- [32] GARBATOV, Y., GUEDES SOARES, C., WANG, G., "Nonlinear time dependent corrosion wastage of deck plates of ballast and cargo tanks of tankers", Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.129, No.1, February 2007.
- [33] QIN, S.P., CUI W.C., "Effect of corrosion models on the time-variant reliability of steel plated elements", Marine Structures, Vol. 16, pp 15-34; 2003.
- [34] FAULKNER, D., "A review of effective plating for use in the analysis of stiffened plating in bending and compression", J. Ship Research, 19:1-17 1975.
- [35] ČORAK, M., PARUNOV, J., TEIXEIRA, A.P., GUEDES SOARES, C., "Performance of the Common Structural Rules design formulations for the ultimate strength of uniaxially loaded plates and stiffened panels", in: Advanced Ship Design for Pollution Prevention, ed. Guedes Soares & Parunov, Taylor & Francis Group, London (UK), pp 113-120; 2010.
- [36] PAIK, J.K., KIM, B.J., SEO, J.K. "Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures": Part I-unstiffened plates, Ocean Engineering 35, pp 261-270; 2008.
- [37] PAIK, J.K., KIM, B.J., SEO, J.K., "Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures": Part II-stiffened panels, Ocean Engineering 35 pp 271-280, 2008.
- [38] ZHANG, S., KHAN, I. "Buckling and ultimate capability of plates and stiffened panels in axial compression", Marine Structures, Vol.22, No.4, pp 791-808; 2009.
- [39] ŽIHA K., PARUNOV J., TUŠEK B., "Granična čvrstoća brodskog trupa", Brodogradnja 58, pp 29-41; 2007.
- [40] ISSC, "Ultimate Hull Girder Strength", Seoul (Koreja) 2009.

- [41] PARUNOV, J., ŽIHA, K., MAGE, P., "Corrosion wastage of oil tankers-a case study of an aged ship", IMAM, Varna (Bugarska) 2007.
- [42] GUEDES SOARES, C., PARUNOV, J., "Structural Reliability of Suezmax oil tanker designed according to new joint tanker project rules", Proceedings of OMAE, Hamburg (Njemačka) 2006.
- [43] IMO, "Guidelines on the enhanced programme of inspection during surveys of bulk carriers and oil tankers - Resolution A.744 (18), Amendments 2000", London (UK) 2000.
- [44] IACS, "Hull Surveys of Oil Tankers", UR Z10.1, URZ10.4, London (UK) 2011.
- [45] TOMAŠEVIĆ, S. "Dinamička izdržljivost brodskih konstrukcija", Magistarski rad, FSB Zagreb, 2003.
- [46] BUREAU VERITAS, "Rules for the Classification of Steel Ships", Paris (Francuska) 2005.
- [47] HRVATSKI REGISTAR BRODOVA, "Pravila za klasifikaciju pomorskih brodova Dio 2.-Trup", Split 2010.
- [48] PARUNOV, J., ŽIHA, K., MAGE, P., JURIŠIĆ, P., "Hull girder fatigue of corroding oil tanker" in: *Advanced Ship Design for Pollution Prevention*, ed. Guedes Soares & Parunov, Taylor & Francis Group, pp 149-154; London (UK) 2010.
- [49] ALMAR-NAESS, A., "Fatigue Handbook: Offshore Steel Structures", Tapir Academic press, Trondheim (Norveška) 1985.
- [50] JURIŠIĆ P., PARUNOV J., SENJANOVIĆ I., "Assessment of Aframax tanker hull-girder fatigue strength according to new common structural rules for oil tankers", *Brodogradnja* 58, pp 262-267; 2007.
- [51] DET NORSKE VERITAS, "PULS ver. 2.0.6, User's manual - software for buckling checks of stiffened plate elements and shells", Oslo (Norveška) 2006.
- [52] "FEMAP/NX NASTRAN ver.10.0", Structural Dynamics Research Corporation, Exton (USA) 2001.
- [53] MATSUKURA, T., "A study on long-term prediction of corrosion wastage" In: *Advances in Marine Structures* Guedes Soares & Fricke (eds) Taylor & Francis Group. London. pp 699-705. 2011

ŽIVOTOPIS

Paul Jurišić je rođen 13. studenog 1973. god. u Splitu. Osnovnu i srednju školu matematičko-informatičkog usmjerenja pohađao je u Splitu, gdje je maturirao 1992. god. Iste godine upisuje studij brodogradnje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Diplomirao je 28. siječnja 2000. god. s radom "Usporedba eksperimentalno određenog i proračunatog hidrodinamičkog opterećenja ratnog broda" (mentor: akademik I. Senjanović).

Po završetku studija u 2000. god. zaposlio se u brodogradilištu "Viktor Lenac" u Rijeci, gdje je, kao inženjer u projektnom odjelu, stekao prva praktična iskustva na izradi dokumentacije brodske konstrukcije trupa. Od 2001. do 2005. god. radi na radnom mjestu inženjera specijaliste unutar projektnog "offshore" odjela naftne kompanije INA-CROSCO u Zagrebu, gdje sudjeluje na izradi proračuna čvrstoće i stabiliteta za projekt nadogradnje samopodizne platforme "Labin", te ostalim projektima vezanim za rekonstrukcije raznih tipova plovnih objekata morske tehnologije. U Hrvatski registar brodova (HRB) u Splitu prelazi 2005. god, gdje se zapošljava u Odjelu za trup i opremu, na radnom mjestu mlađeg eksperta za trup i plovidbena svojstva. U starijeg eksperta za trup unaprijeđen je 2008. god, a na tom radnom mjestu radi i danas.

Problematika kojom se Paul Jurišić bavi u sklopu svog radnog mjesta obuhvaća odobrenje proračuna i tehničke dokumentacije, kao i tipska ispitivanja opreme, koja se ugrađuje na brodove i plovne objekte pod nadzorom HRB-a. Do danas je radio na većem broju provjera čvrstoće konstrukcije raznih tipova brodova: putnički, ribarski, trajekti, tankeri, ratni, plovne dizalice, kao i provjerama sklopa kormila, te opreme za vez i sidrenje. Također je u suradnji s Fakultetom strojarstva i brodogradnje sudjelovao na strukturnim analizama nepomičnih pučinskih objekata Sjevernog Jadrana, a pri tome je koristio programski paket SESAM. Uže područje njegovog rada u HRB-u je u uskoj vezi s temom doktorske disertacije.

Poslijediplomski doktorski studij je upisao u 2002. god. na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, smjer "Brodogradnja i pomorska tehnika". Koautor je šest znanstvenih i(li) stručnih članaka u području strukturne analize i vibracija, od čega su dva rada objavljena u časopisu "Brodogradnja". Također je izlagao radove na simpozijima: Zavarivanje u pomorstvu Hvar 2004. god, Sorta Plitvice 2004. god, Prvo savjetovanje o morskoj tehnologiji (in memoriam akademiku Winkleru) Rijeka 2005. god, Sorta Opatija 2006. god. i Sorta Korčula 2010. god, te IMAM Genova 2011. god.

Služi se engleskim, talijanskim i španjolskim jezikom. Oženjen je, živi sa ženom, kćerkom i sinom u Splitu.

BIOGRAPHY

Paul Jurišić was born on 13th November 1973 in Split. He attended elementary and secondary school (specialization in mathematics and information technologies) in Split, and graduated 1992. The same year he started studying at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. He graduated on 28 January 2000 under the guidance of Professor I. Senjanović, with the thesis entitled "Comparison of experimentally determined and calculated hydrodynamic loads of warship".

After the graduation in year 2000 he worked at the shipyard "Viktor Lenac", Rijeka, as an engineer in Design department, where he achieved first practical experience in the preparation of drawings for hull construction. Between 2001 and 2005 he has been working in the oil company INA-CROSCO in Zagreb as an engineer specialist in offshore project department, where he has been employed on developing the strength and stability calculations for the project of upgrading self-elevating platform "Labin" and other projects related to the reconstruction of various types of offshore vessels. Since 2005 he has been working in Croatian Register of Shipping (CRS) in Split, Department of Hull and Equipment, as a junior surveyor for hull construction and stability. In 2008 he was promoted to the position of senior surveyor for hull construction, where he is still employed today.

In the company Paul Jurišić is engaged with problems of the approval of the calculations and technical documentation, and the type approval testing of equipment which is installed on ships under the supervision of CRS. Until today, he has been working at a number of structural analyses of the various types of ships: passenger, fishing, ferries, tankers, warship, floating cranes and rudder assembly checks, and on the calculations for mooring and anchoring equipment. Moreover, in collaboration with Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture he participated in structural analyses of the Northern Adriatic fixed offshore platforms, using SESAM software. The area of his present job is closely related to the topic of the doctoral dissertation.

In 2002 he started the postgraduate studies at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. As a co-author, he has published six scientific and professional articles in the field of structural analysis and vibration, of which two articles were published in the journal "Shipbuilding". He also presented his work at the symposia: Welding in marine engineering, Hvar 2004; Sorta 2004; Plitvice; the first Conference on Marine Technology (in memoriam Academician Winkler), Rijeka 2005; Sorta 2006, Opatija; Sorta 2010, Korčula; and IMAM 2011, Genova.

Paul Jurišić is fluent in English, and speaks Italian and Spanish. He is married and lives in Split with his wife, daughter and son.