

# Odziv brodske konstrukcije uslijed opterećenja ledom

---

**Pensa, Marina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2010**

*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:235:328865>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

## **DIPLOMSKI RAD**

Marina Pensa

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

## **DIPLOMSKI RAD**

Voditelj rada:  
Prof. dr. sc. Joško Parunov

Marina Pensa

Zagreb, 2010.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



|                                                              |        |
|--------------------------------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum                                                        | Prilog |
| Klasa:                                                       |        |
| Ur.broj:                                                     |        |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARINA PENSA**

Mat. br.: 0023027033

Naslov: **Odziv brodske konstrukcije uslijed opterećenja ledom**

Opis zadatka:

Promet i trgovina arktičkim i baltičkim putovima se sve više povećavaju zbog važnosti ruske naftne i plinske industrije te bogatih nalazišta nafte u arktičkim područjima. Cilj ovog rada je dati općeniti prikaz i konkretnu primjenu postupaka za projektiranje brodske konstrukcije namijenjene plovidbi zaleđenim morima.

U uvodnom je dijelu rada potrebno dati pregled:

- zaleđivanja mora kao oceanološke pojave i svojstava leda;
- projektnih zahtjeva koji se postavljaju pred brodove za plovidbu zaleđenim morima;
- opterećenja brodske konstrukcije uslijed leda;
- postojećih pravila za projektiranje brodske konstrukcije za plovidbu zaleđenim morima.

U proračunskom dijelu rada treba prilagoditi postojeću konstrukciju oplata naftnog tankera u području glavnog rebra za plovidbu kroz zaleđeno more. Dimenzije konstrukcijskih elemenata najprije odrediti prema pojednostavljenim formulama iz pravila klasifikacijskih društava. Zatim dimenzionirati konstrukciju u skladu s uputama klasifikacijskog društva ABS za direktan proračun uslijed opterećenja ledom primjenom nelinearne metode konačnih elemenata (NMKE). Potrebno je odrediti maksimalne i trajne deformacije konstrukcije oplata koje uzrokuje ekstremno opterećenje ledom.

U zaključku dati usporedbu dimenzija konstrukcijskih elemenata dobivenih uobičajenim pravilima i direktnim proračunom NMKE te ispitati potencijalne uštede u materijalu i/ili troškovima gradnje koje se mogu ostvariti zahvaljujući primjeni naprednih proračunskih postupaka.

Zadatak zadan:

11. ožujka 2010.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Joško Parunov

Rok predaje rada:

Ožujak 2011.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Većeslav Čorić

## **IZJAVA**

Izjavljujem pod punom odgovornošću da sam završni rad radila samostalno , koristeći se navedenom literaturom i znanjem stečenim tijekom studija.

Posebno se zahvaljujem mentoru Prof. dr. sc. Jošku Parunovu i Paulu Magi dipl. ing. brod. na pruženoj pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Također bih se zahvalila Tončiju Gačiću dipl.ing.brod. iz Brodosplita na pruženim podacima potrebnih za ekonomsku analizu projekta.

---

Marina Pensa

## SADRŽAJ

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Zaleđivanje mora kao oceanološka pojava i svojstva leda .....                                                               | 14 |
| 1.1. Svojstva leda .....                                                                                                       | 14 |
| 1.2. Zaleđivanja mora kao oceanološka pojava .....                                                                             | 15 |
| 1.2.1. Porijeklo leda u moru .....                                                                                             | 16 |
| 2. Projektni zahtjevi koji se postavljaju pred brodove za plovidbu zaleđenim morima [10] .....                                 | 20 |
| 2.1. Općenito .....                                                                                                            | 20 |
| 2.2. Projektni zahtjevi .....                                                                                                  | 21 |
| 2.2.1. Projektni zahtjevi za brodove koji plove Baltikom .....                                                                 | 21 |
| 2.2.2. Projektni zahtjevi za brodove koji plove Arktikom .....                                                                 | 26 |
| 2.3. Zaleđivanje palube broda .....                                                                                            | 27 |
| 2.4. Buka i vibracije .....                                                                                                    | 27 |
| 3. Opterećenja brodske konstrukcije uslijed leda .....                                                                         | 28 |
| 3.1. Međudjelovanje leda i konstrukcije [16] .....                                                                             | 30 |
| 3.2. Načelni postupak određivanja odnosa debljine leda i strukturne čvrstoće broda koji plovi ledom [15] .....                 | 32 |
| 4. Postojeća pravila za projektiranje brodske konstrukcije za plovidbu zaleđenim morima .....                                  | 35 |
| 4.1. Općenito .....                                                                                                            | 35 |
| 4.2. Procjenjivanje arktičkih uvjeta .....                                                                                     | 36 |
| 4.3. Usporedba notacija i pravila danih za područje Arktika i Baltika .....                                                    | 37 |
| 5. Prilagođavanje postojeće konstrukcije oplata tankera za naftu u području glavnog rebra za plovidbu kroz zaleđeno more ..... | 41 |
| 5.1. Određivanje dimenzija konstrukcijskih elemenata prema pravilima klasifikacijskog društva .....                            | 43 |
| 5.1.1. Gazovi klase leda .....                                                                                                 | 43 |
| 5.1.2. Debljina leda .....                                                                                                     | 43 |
| 5.1.3. Snaga pogonskog stroja .....                                                                                            | 44 |
| 5.1.4. Opterećenja leda .....                                                                                                  | 48 |
| 5.1.5. Dimenzioniranje trupa .....                                                                                             | 50 |
| 5.1.6. Izračun momenta tromosti i poprečnog presjeka površine uzdužnjaka .....                                                 | 52 |
| 5.2. Dimenzioniranje konstrukcije u skladu s uputama klasifikacijskog društva American Bureau of Shipping .....                | 54 |
| 5.2.1. Uvod .....                                                                                                              | 54 |
| 5.2.2. Postupak ojačanja za led konstrukcije boka korištenjem nelinearne analize metodom konačnih elemenata .....              | 56 |

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.3. Projektiranje konstrukcije boka prema The Finnish Maritime Administration, “Tentative Note for Application of Direct Calculation Methods for Longitudinally Framed Hull Structure“ ..... | 66 |
| 6. Rezultati analize .....                                                                                                                                                                      | 68 |
| 6.1. Rezultati FSICR projekta.....                                                                                                                                                              | 68 |
| 6.2. Rezultati FMA privremenog projekta .....                                                                                                                                                   | 69 |
| 6.3. Rezultati alternativnog projekta za uzdužnjake boka.....                                                                                                                                   | 69 |
| 6.4. Rezultati alternativnog projekta za oplatu boka.....                                                                                                                                       | 79 |
| 7. Ekonomska analiza .....                                                                                                                                                                      | 83 |
| 7.1. Troškovi materijala.....                                                                                                                                                                   | 85 |
| 7.2. Troškovi zavarivanja .....                                                                                                                                                                 | 87 |
| 7.2.1. Izračun mase zavora .....                                                                                                                                                                | 87 |
| 7.2.2. Troškovi po kilogramu zavora .....                                                                                                                                                       | 88 |
| 7.2.3. Ukupni trošak zavarivanja .....                                                                                                                                                          | 90 |
| 7.3. Ukupni troškovi.....                                                                                                                                                                       | 91 |
| 8. ZAKLJUČAK .....                                                                                                                                                                              | 94 |
| 9. LITERATURA .....                                                                                                                                                                             | 95 |
| PRILOG I                                                                                                                                                                                        |    |
| PRILOG II                                                                                                                                                                                       |    |

## POPIS TABLICA

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1.1 Klasifikacija ledenih brijegova po veličini [6] .....                                                                                | 17 |
| Tablica 3.1 Najčešći slučajevi međudjelovanja leda i broda [15].....                                                                             | 29 |
| Tablica 4.1 Pregled usporedbi klasa leda različitih registara [15] .....                                                                         | 37 |
| Tablica 4.2 Meteorološki uvjeti u Kanadskom Arktiku [15] .....                                                                                   | 38 |
| Tablica 4.3 Meteorološki uvjeti u Ruskom Arktiku [15] .....                                                                                      | 39 |
| Tablica 4.4 Meteorološki uvjeti u Baltičkom moru .....                                                                                           | 40 |
| Tablica 5.1 Glavne karakteristike tankera za naftu .....                                                                                         | 41 |
| Tablica 5.2 Dimenzije konstrukcijskih elemenata oplata tankera za naftu.....                                                                     | 42 |
| Tablica 5.3 Debljina leda .....                                                                                                                  | 43 |
| Tablica 5.4 Dimenzije broda.....                                                                                                                 | 44 |
| Tablica 5.5 Vrijednosti $K_C$ .....                                                                                                              | 45 |
| Tablica 5.6 Vrijednosti $H_M$ .....                                                                                                              | 45 |
| Tablica 5.7 Visina opterećenog područja .....                                                                                                    | 48 |
| Tablica 5.8 Koeficijenti $a$ i $b$ .....                                                                                                         | 48 |
| Tablica 5.9 Koeficijent $c_I$ .....                                                                                                              | 49 |
| Tablica 5.10 Udaljenost $l_a$ .....                                                                                                              | 49 |
| Tablica 5.11 Vrijednosti razmaka uzdužnjaka $s$ .....                                                                                            | 51 |
| Tablica 5.12 Koraci ojačavanja za led konstrukcije boka .....                                                                                    | 56 |
| Tablica 5.13 Granica razvlačenja brodograđevnog čelika.....                                                                                      | 59 |
| Tablica 5.14 Rubni uvjeti za model.....                                                                                                          | 60 |
| Tablica 5.15 Vrijednosti koeficijenta $c_a$ .....                                                                                                | 66 |
| Tablica 6.1 Vrijednosti otpora broda, minimalne potrebne snage stroja i tlaka leda koji djeluje na oplatu broda u ovisnosti o klasama leda ..... | 68 |
| Tablica 6.2 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka određene prema FSICR projektu .....                                                       | 68 |
| Tablica 6.3 Vrijednosti tlaka izračunatog prema FMA privremenom projektu.....                                                                    | 69 |
| Tablica 6.4 Vrijednosti maksimalnog tlaka leda i linijskog opterećenja izračunati alternativnim projektom za uzdužnjake boka.....                | 69 |
| Tablica 6.5 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1C .....                                                                    | 71 |
| Tablica 6.6 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1B .....                                                                    | 72 |
| Tablica 6.7 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1A.....                                                                     | 74 |
| Tablica 6.8 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1AS.....                                                                    | 75 |
| Tablica 6.9 Vrijednosti površinskog opterećenja i tlaka leda na oplatu broda izračunati alternativnim projektom za oplatu boka .....             | 79 |
| Tablica 7.1 Karakteristike ukrepa okvirnog rebra i koljena .....                                                                                 | 83 |
| Tablica 7.2 Iznosi masa razmatranih konstrukcijskih elemenata boka broda za klasu leda 1C .85                                                    |    |
| Tablica 7.3 Iznosi masa razmatranih konstrukcijskih elemenata boka broda za klasu leda 1B .85                                                    |    |
| Tablica 7.4 Iznosi masa razmatranih konstrukcijskih elemenata boka broda za klasu leda 1A .85                                                    |    |
| Tablica 7.5 Cijene čelika za određene klase brodograđevnog čelika.....                                                                           | 85 |
| Tablica 7.6 Cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente boka broda za klasu leda 1C86                                                    |    |
| Tablica 7.7 Cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente boka broda za klasu leda 1B86                                                    |    |
| Tablica 7.8 Cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente boka broda za klasu leda 1A86                                                    |    |
| Tablica 7.9 Iznosi ukupnog troška zavarivanja.....                                                                                               | 90 |
| Tablica 7.10 Usporedba ukupnih troškova za klasu leda 1C .....                                                                                   | 91 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 7.11 Usporedba ukupnih troškova za klasu leda 1B .....                                                                   | 91 |
| Tablica 7.12 Usporedba ukupnih troškova za klasu leda 1A.....                                                                    | 91 |
| Tablica I.1 .....                                                                                                                | 98 |
| Tablica I.2 Određivanje opterećenje leda preko trajnih deformacija oplata.....                                                   | 98 |
| Tablica I.3 Usporedba iznosa tlakova dobivenih proračunom po Hywardu i prema alternativnom projektu oplata boka prema ABS-u..... | 98 |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1.1 Vlačna i tlačna čvrstoća kao funkcije stupnja naprezanja [2] .....                                                                | 14 |
| Slika 1.2 Vlačna i tlačna čvrstoća kao funkcije temperature [1] .....                                                                       | 14 |
| Slika 1.3 Vlačna čvrstoća leda kao funkcija veličine promjera zrna leda [3] .....                                                           | 15 |
| Slika 1.4 Prikaz linija najviše gustoće i točke ledišta u ovisnosti o temperaturi i salinitetu [4] .....                                    | 15 |
| Slika 1.5 Raspodjela leda na Zemlji .....                                                                                                   | 16 |
| Slika 1.6 Ledeni brijeg .....                                                                                                               | 17 |
| Slika 1.7 "Pack ice" [8] .....                                                                                                              | 18 |
| Slika 1.8 Plutajuće ledene ploče [9] .....                                                                                                  | 19 |
| Slika 2.1 Ojačanja za led koja se primjenjuju na brodove koji plovo Baltikom .....                                                          | 21 |
| Slika 2.2 Ojačanja za led koja se primjenjuju na brodove koji plovo Arktikom .....                                                          | 22 |
| Slika 2.3 Projicirani pogled krila brodskog vijka .....                                                                                     | 23 |
| Slika 2.4 Shematski prikaz grijanja balastnih tankova .....                                                                                 | 24 |
| Slika 3.1 Lokalna opterećenja leda nasuprot uzdužnom naprezanju na savijanje .....                                                          | 28 |
| Slika 3.2 Sudar pod kutom i reflektirani sudar (a), lomljenje leda pramcem (b), lomljenje leda krmom (c) i kretanje u kanalu (d) [15] ..... | 29 |
| Slika 3.3 Međudjelovanje trupa i leda (prema Daley i sur. 1998) .....                                                                       | 30 |
| Slika 3.4 Model međudjelovanja broda i leda .....                                                                                           | 32 |
| Slika 3.5 Shematski pogled na područje kontakta između broda i leda .....                                                                   | 32 |
| Slika 3.6 Funkcije tlaka za različite visine zone kontakta .....                                                                            | 33 |
| Slika 5.1 Prikaz razmatranog dijela konstrukcije oplata u području glavnog rebra .....                                                      | 42 |
| Slika 5.2 Prikaz bitnih kutova za izračun snage stroja .....                                                                                | 44 |
| Slika 5.3 Dimenzije presjeka .....                                                                                                          | 52 |
| Slika 5.4 Model konstrukcije boka broda napravljen u programu Femap s Nastranom .....                                                       | 58 |
| Slika 5.5 Krivulja naprezanje-deformacija čelika (puna linija) i modeli materijala (isprekidana linija) .....                               | 59 |
| Slika 5.6 Definiranje rubnih uvjeta .....                                                                                                   | 60 |
| Slika 5.7 Linijsko opterećenje na uzdužnjak boka .....                                                                                      | 61 |
| Slika 5.8 Promjenjivost linijskog opterećenja .....                                                                                         | 62 |
| Slika 5.9 Dimenzije površine na kojoj djeluje opterećenje na oplati boka .....                                                              | 64 |
| Slika 5.10 Površinsko opterećenje na oplati boka .....                                                                                      | 65 |
| Slika 6.1 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1C .....                                         | 71 |
| Slika 6.2 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1B za osnovni model .....                        | 72 |
| Slika 6.3 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1B .....                                         | 73 |
| Slika 6.4 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1A .....                                         | 74 |
| Slika 6.5 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1AS .....                                        | 75 |
| Slika 6.6 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klase leda 1C, 1B i 1A .....                                | 76 |

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 6.7 Von Misesova naprezanja na deformiranom osnovnom modelu "1C" pri maksimalnom opterećenju .....                     | 77 |
| Slika 6.8 Von Misesova naprezanja na deformiranom osnovnom modelu "1C" nakon rasterećenja .....                              | 77 |
| Slika 6.9 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1C_koljena" pri maksimalnom opterećenju .....                      | 78 |
| Slika 6.10 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1C_koljena" nakon rasterećenja .....                              | 78 |
| Slika 6.11 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klasu leda 1C .....                                   | 80 |
| Slika 6.12 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klasu leda 1B .....                                   | 80 |
| Slika 6.13 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klasu leda 1A .....                                   | 81 |
| Slika 6.14 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klase leda 1C, 1B i 1A .....                          | 81 |
| Slika 6.15 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A" pri maksimalnom opterećenju .....                             | 82 |
| Slika 6.16 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A" nakon rasterećenja .....                                      | 82 |
| Slika 7.1 Prikaz presjeka glavnog rebra za različite razmake uzdužnjaka .....                                                | 83 |
| Slika 7.2 Trodimenzionalni prikaz dijela konstrukcije boka u području glavnog rebra .....                                    | 84 |
| Slika 7.3 Razlika (%) u cijeni čelika alternativnih konstrukcija u odnosu na FSICR konstrukcije .....                        | 86 |
| Slika 7.4 Shematski prikaz kutnog zavora .....                                                                               | 87 |
| Slika 7.5 Razlike (%) ukupnih troškova alternativnih konstrukcija u odnosu na FSICR konstrukcije .....                       | 92 |
| Slika 7.6 Razlike (%) troškova materijala i ukupnih troškova alternativnih konstrukcija u odnosu na FSICR konstrukcije ..... | 92 |
| Slika 7.7 Međusobni omjer troškova materijala, zavarivanja i ukupnog troška za klasu 1C .....                                | 93 |

## POPIS OZNAKA

| Veličina : | Opis:                                                                                                                                          | Jedinica:         |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $L$        | Duljina broda na vodnoj liniji                                                                                                                 | m                 |
| $L_{BOW}$  | Duljina pramca                                                                                                                                 | m                 |
| $L_{PAR}$  | Duljina paralelnog srednjaka                                                                                                                   | m                 |
| $B$        | Maksimalna širina broda                                                                                                                        | m                 |
| $T$        | Maksimalni gaz broda                                                                                                                           | m                 |
| $A_{wf}$   | Površina vodne linije na pramcu                                                                                                                | m <sup>2</sup>    |
| $\alpha$   | Kut vodne linije na B/4                                                                                                                        | °                 |
| $\phi_1$   | Nagib pramčane statve na simetrali                                                                                                             | °                 |
| $\phi_2$   | Nagib pramca na B/4                                                                                                                            | °                 |
| $D_P$      | Promjer propelera                                                                                                                              | m                 |
| $H_M$      | Debljina zdrobljenog leda na sredini kanala                                                                                                    | m                 |
| $h_G$      | Debljina leda                                                                                                                                  | m                 |
| $h$        | Projektna visina površine koja je opterećena tlakom leda                                                                                       | m                 |
| $R_{CH}$   | Otpor broda u kanalu s razlomljenim ledom i konsolidiranim slojem                                                                              | N                 |
| $P$        | Snaga motora                                                                                                                                   | kW                |
| $K_C$      | koeficijent                                                                                                                                    |                   |
| $H_F$      | koeficijent                                                                                                                                    |                   |
| $C_1$      | Koeficijent kojim se uzima u obzir konsolidirani gornji sloj razlomljenog leda                                                                 |                   |
| $C_2$      | koeficijent kojim se uzima u obzir konsolidirani gornji sloj razlomljenog leda                                                                 |                   |
| $C_\psi$   | Koeficijent                                                                                                                                    |                   |
| $C_\mu$    | Koeficijent                                                                                                                                    |                   |
| $c_d$      | Koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj veličina i snaga pogonskog stroja                                                                   |                   |
| $f$        | Koeficijent                                                                                                                                    |                   |
| $a$        | Koeficijent                                                                                                                                    |                   |
| $b$        | Koeficijent                                                                                                                                    |                   |
| $\Delta$   | Istisnina na maksimalnom gazu klase leda                                                                                                       | t                 |
| $c_1$      | Koeficijent koji uzima u obzir vjerojatnost pojavljivanja projektnog tlaka leda na određenom području trupa u ovisnosti o određenoj klasi leda |                   |
| $l_a$      | Razmak ukrepa                                                                                                                                  | m                 |
| $p_0$      | Nominalni tlak leda                                                                                                                            | N/mm <sup>2</sup> |
| $t$        | Debljina oplata                                                                                                                                | mm                |
| $p_{PL}$   | Tlak leda koji djeluje na oplatu boka                                                                                                          | N/mm <sup>2</sup> |
| $F_1$      | Koeficijent                                                                                                                                    |                   |

|               |                                                                                    |                   |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $F_2$         | Koeficijent                                                                        |                   |
| $t_c$         | Dodatak na abraziju i koroziju                                                     | mm                |
| $R_{eH}$      | Granica razvlačenja brodograđevnog čelika                                          | N/mm <sup>2</sup> |
| $A_{Sh}$      | Površina poprečnog presjeka uzdužnjaka                                             | cm <sup>2</sup>   |
| $z$           | Moment tromosti uzdužnjaka                                                         | cm <sup>3</sup>   |
| $F_3$         | Koeficijent kojim se uzima u obzir distribucija opterećenja na susjedne uzdužnjake |                   |
| $F_4$         | Koeficijent kojim se uzima u obzir koncentracija opterećenja na mjestu oslonca     |                   |
| $s$           | Razmak uzdužnjaka                                                                  | m                 |
| $m_1$         | Koeficijent rubnih uvjeta standardne ukrepe                                        |                   |
| $w$           | Neto moment otpora uzdužnjaka s pridruženom oplatom                                | cm <sup>3</sup>   |
| $A_a$         | Neto površina presjeka pridružene oplata                                           | mm <sup>2</sup>   |
| $t_p$         | Debljina lima pridružene oplata                                                    | mm                |
| $h_w$         | Debljina struka uzdužnjaka                                                         | mm                |
| $t_w$         | Visina struka uzdužnjaka                                                           | mm                |
| $b_f$         | Širina pojasa uzdužnjaka                                                           | mm                |
| $p_{\max}$    | Ekstremni tlak leda                                                                | N/mm <sup>2</sup> |
| $Q$           | Linijsko opterećenje                                                               | N/mm              |
| $F$           | Površinsko opterećenje                                                             | N                 |
| $T_{ZAV}$     | Troškovi po metru zavora                                                           | kn/m              |
| $m_1$         | Masa zavora po metru duljine                                                       | kg/m              |
| $a$           | visina kutnog zavora                                                               | mm                |
| $\rho_{ZAV}$  | Gustoća zavora                                                                     | kg/m <sup>3</sup> |
| $T_{UK}$      | Ukupni troškovi zavarivanja po kilogramu zavora                                    | kn/kg             |
| $T_z$         | Trošak žice                                                                        | kn/kg             |
| $C_z$         | Cijena žice po kilogramu zavora                                                    | kn/kg             |
| $k_{t1}$      | Koeficijent taljenja žice                                                          |                   |
| $T_{EL,EN}$   | Trošak električne energije                                                         | kn/kg             |
| $U$           | Napon električnog luka                                                             | V                 |
| $I$           | Jakost struje zavarivanja                                                          | A                 |
| $\eta_s$      | stupanj korisnog djelovanja izvora struje                                          |                   |
| $\varepsilon$ | Intermitencija                                                                     |                   |
| $N_0$         | Snaga koju stroj koristi u praznom hodu                                            | kW                |
| $k_{t2}$      | Efikasnost taljenja žice                                                           |                   |
| $C_{EL,EN}^1$ | Jedinična cijena električne energije                                               | kn/kW             |
| $T_{ODI}$     | Troškovi osobnog dohotka izrade                                                    | kn/kg             |
| $T_{CO_2}$    | Troškovi plina                                                                     | kn/kg             |

|                     |                                                                         |                   |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| $K_{\text{CO}_2}$   | Potrošnja plina po kilogramu zavara                                     | l/kg              |
| $k_{t2}$            | Koeficijent taljenja za MAG postupak                                    | kg<br>zavara/h    |
| $p_{\text{CO}_2}$   | Potrošnja plina                                                         | l/min             |
| $C_{\text{CO}_2}$   | Cijena plina                                                            | kn/l              |
| $l_{\text{ZAV},UK}$ | ukupne duljine zavara                                                   | m                 |
| $t_f$               | Debljina pojasa uzdužnjaka                                              | mm                |
| $w_p$               | Trajna deformacija na oplati                                            | mm                |
| $p_c$               | granični tlak koji uzrokuje popuštanje materijala u obliku dvostrukog Y | N/mm <sup>2</sup> |
| $M_p$               | Moment plastičnosti oplate                                              | N                 |
| $\zeta_0$           | Parametar oblika                                                        |                   |
| $f_{DT}$            | Koeficijent korekcije                                                   |                   |

## SAŽETAK

Projektiranje brodske konstrukcije za plovidbu kroz led se obavlja pomoću pravila klasifikacijskih društava. S obzirom na to da su takva pravila dosta složena i često nerazumljiva, a učestalo se i mijenjaju, korisno je problemu pristupiti u cijelosti, tj. da se što je moguće više spoznaju fizikalni procesi koji su povezani sa zaleđivanjem, te da se u projektiranju koriste metode neposrednog proračuna.

Klasifikacijsko društvo American Bureau of Shipping nedavno je objavilo Upute za projektiranje konstrukcije oplata broda namijenjenog plovidbi kroz led primjenom nelinearne metode konačnih elemenata. U ovom radu se prikazuje praktična primjena tog postupka na primjeru postojećeg naftnog tankera. Neposredna metoda projektiranja primjenom nelinearne metode konačnih elemenata je uspoređena s pravilima za gradnju brodova za različite ICE notacije. Provedena je detaljna ekonomska analiza s ciljem da se utvrde potencijalne uštede u troškovima gradnje primjenom takvog postupka.

Rad je motiviran porastom prometa i trgovine arktičkim i baltičkim pomorskim rutama te sve većom potražnjom za brodovima namijenjenim plovidbi kroz ta područja. Stoga je od posebnog interesa povećanje znanja i spoznaja o ledu kao oceanološkoj pojavi, te o zahtjevima koji se postavljaju pred brodove koji su namijenjeni službi u zaleđenim morima. To je od interesa i za hrvatsku brodogradnju jer se u našim brodogradilištima posljednjih godina grade brojni brodovi s nekom od notacija za plovidbu kroz led.

## UVOD

Promet i trgovina arktičkim i baltičkim putovima se sve više povećavaju zbog važnosti ruske naftne i plinske industrije, te bogatih nalazišta nafte u arktičkim područjima, te su potrebni brodovi koji mogu sigurno funkcionirati u tim područjima.

U ovom radu je dan općeniti prikaz i konkretna primjenu postupaka za projektiranje brodske konstrukcije namijenjene plovidbi zaleđenim morima.

U uvodnom dijelu dan je pregled zaleđivanja mora kao oceanološke pojave i svojstava leda, projektnih zahtjeva koji se postavljaju pred brodove za plovidbu zaleđenim morima, opterećenja brodske konstrukcije uslijed leda i postojećih pravila za projektiranje brodske konstrukcije za plovidbu zaleđenim morima.

U proračunskom dijelu rada je prilagođena postojeća konstrukciju oplata naftnog tankera u području glavnog rebra za plovidbu kroz zaleđeno more. Budući da se pravila projektiranja broda mijenjaju iz tradicionalnog pristupa dozvoljenog naprezanja u nova pravila koja dopuštaju granična stanja plastičnosti, pogotovo u slučaju brodova s klasom leda, pri prilagođavanju postojeće konstrukcije oplata tankera procjenjuje se plastični odziv brodske konstrukcije. Princip iza ovog postupka je prepoznavanje kako konstrukcija ima kapacitet velike rezerve nakon što popusti i prije nego se konačno slomi. Korištenjem dijela kapaciteta rezerve u opiranju opterećenju će rezultirati lakšom konstrukcijom koju je lakše proizvoditi. To rezultira ukupnim uštedama u proizvodnji i radnim troškovima.

Relativno rijetko pojavljivanje ekstremnih opterećenja od leda je, također, razlog dozvoljavanja određenih trajnih plastičnih deformacija prilikom konstruiranja oplata broda.

Postupak prilagođavanja postojeće konstrukcije oplata naftnog tankera u području glavnog rebra za plovidbu kroz zaleđeno more uključuje dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata prema pojednostavljenim formulama iz pravila klasifikacijskih društava, te zatim dimenzioniranje konstrukcije u skladu s uputama klasifikacijskog društva ABS za direktan proračun uslijed opterećenja ledom primjenom nelinearne metode konačnih elemenata. Uz pomoć programa Femap s NX Nastranom određene su maksimalne i trajne deformacije konstrukcije oplata koje uzrokuje ekstremno opterećenje ledom.

U zaključku je dana usporedba dimenzija konstrukcijskih elemenata dobivenih uobičajenim pravilima i direktnim proračunom NMKE, te je u ekonomskoj analizi ispitana potencijalna uštede u materijalu i u troškovima gradnje koje se mogu ostvariti zahvaljujući primjeni naprednih proračunskih postupaka.

# 1. ZALEĐIVANJE MORA KAO OCEANOLOŠKA POJAVA I SVOJSTVA LEDA

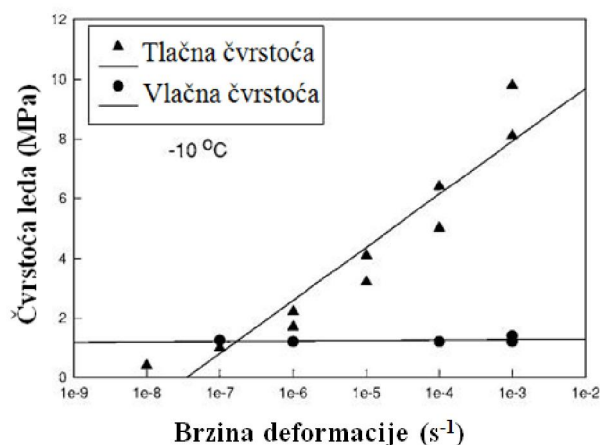
## 1.1. Svojstva leda

Led se ne može strogo svrstati u krute, plastične ili viskozne materijale.

Voda se zamrzava u zrna koji nastaju grupiranjem kristala leda. Čvrstoća leda ovisi o temperaturi, stupnju naprezanja i smjeru naprezanja s obzirom na kristalnu strukturu leda, te veličini zrna leda kao što je prikazano na slikama 1.1, 1.2 i 1.3.

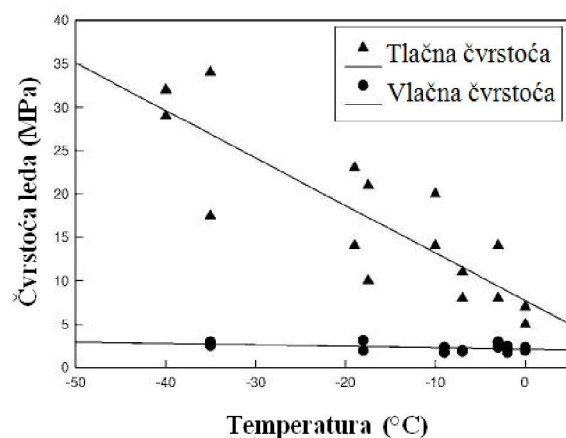
Vlačna čvrstoća leda varira od 0.7 do 3.1 MPa, tlačna čvrstoća varira od 5 do 25 MPa, i to u rasponu temperatura od -10 do -20°C [1]. Općenito, čvrstoća leda se povećava sa smanjenjem temperature i taj utjecaj je izraženiji kod tlačne čvrstoće. Tlačna čvrstoća je ovisna o stupnju naprezanja, dok je vlačna čvrstoća relativno neosjetljiva na stupanj naprezanja [2].

Vlačna čvrstoća se smanjuje s povećanjem veličine zrna leda [3].

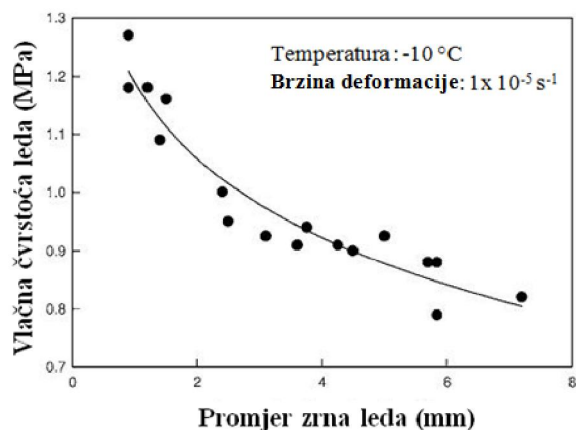


Slika 1.1 Vlačna i tlačna čvrstoća kao funkcije brzine deformacije [2]

Brzina deformacije ( $s^{-1}$ )



Slika 1.2 Vlačna i tlačna čvrstoća kao funkcije temperature [1]



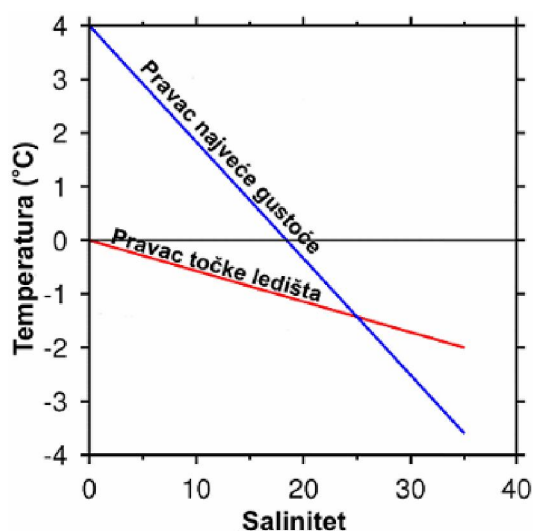
Slika 1.3 Vlačna čvrstoća leda kao funkcija veličine promjera zrna leda [3]

## 1.2. Zaleđivanje mora kao oceanološka pojava

Zbog velikog saliniteta i gustoće, morska voda ima niže vrijednosti ledišta.

Temperatura ledišta morske vode snižava se s povećanjem saliniteta. Dok je točka ledišta slatke vode na  $0^{\circ}\text{C}$ , morska voda saliniteta 35 ‰ leđi se na temperaturi od  $-1.9^{\circ}\text{C}$ .

Na slici 1.4 prikazane su linije najviše gustoće i točke ledišta, ovisne o temperaturi i salinitetu.



Slika 1.4 Prikaz linija najviše gustoće i točke ledišta u ovisnosti o temperaturi i salinitetu [4]

U morima oko Antarktike zbog ledenog pokrova i u arktičkom bazenu zbog leda i dotoka tekućica raspodjela saliniteta na površini otvorenog mora varira od 29-32‰, a u priobalnim dijelovima od 0-10‰.

Baltičko more karakterizira niski salinitet koji je u rasponu od 2 do 7‰. Na njega utječe veća količina padalina i veće pritjecanje slatke vode, te otežana razmjena morske vode kroz plitke prolaze s oceanom.



Slika 1.5 Raspodjela leda na Zemlji

### 1.2.1. Porijeklo leda u moru

Led se pojavljuje u prijelaznom sloju između hidrosfere (mora i vode na kopnu) i atmosfere, a nastaje uzajamnim radom zraka i mora (vode). Prema porijeklu razlikujemo led s kopna i morski led. Led s kopna koji dopijeva u more pojavljuje se kao riječni led koji dopijeva tekućicama u more i ledenjački led koji potječe od ledenjaka s kopna.

Morski led nastaje u moru snižavanjem temperature u zavisnosti o salinitetu i gustoći.

#### 1.2.1.1 Led s kopna

##### Riječni led

Riječni led kojeg rijeke odnose u more, bitno se razlikuje od leda koji je nastao u moru izgledom, bojom i strukturom. Gomila se pred ušćima polarnih i subpolarnih rijeka (posebice sibirskih), odakle ga prenose morske struje u obalna i plitka mora arktičkog bazena.

##### Ledenjački led [5]

Ledenjaci se formiraju na kopnu kao posljedica nakupljanja snijega od preko tisuću godina. Uzastopni slojevi komprimiraju prijašnje nakupine dok se ne formira, na dubinama ispod 60 do 70 metara, ledenjački led. Ledenjaci "teču" prema van pod svojom težinom kao i viskozan fluid. Kada rub ledenjaka dostigne do mora, veliki dijelovi što se otkidaju od njega se nazivaju ledeni brijegovi.

Većina ledenih brijegova u Sjevernom Atlantiku dolazi od oko 100 ledenjaka duž obale Grenlanda dok ih par proizlazi iz istočnih Kanadskih Arktičkih otoka. Ledenjaci zapadnog Grenlanda, odakle 90% ledenih brijegova iz Newfoundlanda potječe, su ledenjaci s najvećom

brzinom, do 7 km po godini. Ledene brijegove iz Newfoundlanda nosi Labradorska struja prema jugu.

Približno se 40.000 ledenih brjegova srednje do velike veličine otkida godišnje od Grenlanda i oko 1 do 2 % njih dospije najviše do 48° sjeverne zemljopisne širine. (St. John's). Brojevi dosta variraju od godine do godine, i ovisno o sezoni su uglavnom viđeni iz Newfoundlanda u proljeće i u rano ljeto.

Ledeni brijegovi su posebno opasni za plovidbu jer je njihov obujam višestruko veći ispod nego iznad površine morske vode. U tablici 1.1 prikazana je klasifikacija ledenih brijegova po veličini.

**Tablica 1.1 Klasifikacija ledenih brijegova po veličini [6]**

| Kategorija veličine | Visina,m | Duljina ,m |
|---------------------|----------|------------|
| "Growler"           | < 1      | <5         |
| "Bergy Bit"         | 1-4      | 5-14       |
| Mala                | 5-15     | 15-60      |
| Srednja             | 16-45    | 61-122     |
| Velika              | 46-75    | 123-213    |
| Vrlo velika         | >75      | >213       |



**Slika 1.6 Ledeni brijeg**

### 1.2.1.2 Morski led [6], [7]

Nastanak morskog leda počinje kada se u čitavom površinskom sloju postigne temperatura koja će pokrenuti kristalizaciju, proces izdvajanja soli da bi desalinizirana voda mogla prijeći u kompaktni led. Raspon temperatura unutar koje se smrzava more je od  $-1.7^{\circ}\text{C}$  do  $-2.0^{\circ}\text{C}$ . Morski led se pojavljuje u Sjevernom ledenom moru, Finskom i Botničkom zaljevu, Hudsonovom zaljevu, na obali Labradora, Ohotskom i Japanskom moru, te u morima oko Antarktike. Morski led se zadržava tijekom cijele godine u Arktiku oko Sjevernoga geografskog pola.

Plutajući led (eng. drift ice) je zamrznuta masa morske vode koja pluta na površini mora, za razliku od vezanog leda (eng. fast ice) koji je nepomičan uz obalu. Uglavnom je plutajući led nošen vjetrom i morskim strujama.

Kada je plutajući led spojen u jednu veliku nakupinu, zove se "pack ice".

"Pack ice" je masa leda koji pluta i koja se formira tijekom perioda od više godina. Nastaje kada se polje leda razbije valovima i jakim vjetrom. Može biti vrlo tanak, međutim, uglavnom je natkriven s vrlo hrapavim površinama uzrokovanim međusobnim pomicanjem slojeva leda. Ti grebeni (eng. pressure ridges) mogu povećati debljinu leda u rasponu od samo nekoliko centimetara pa sve do desetaka metara. Iako se "pack ice" pomiče sa morskim strujama i vjetrom, ne pluta slobodno kao ploče i nije uvijek kontinuiran. Tipična područja "pack ice-a" su područja visokog stupnja pokrivenosti površine ledom. Dva glavna područja su na Arktiku i na Antarktiku.



Slika 1.7 "Pack ice" [8]

Plutajuće ledene ploče (eng. ice floes) su veliki plosnati komadi smrznutog mora. Ovaj izraz se odnosi na bilo koji relativno plosnati komad leda koji se slobodno miče. Veličine promjera ploča mogu biti u rasponu od 20 metara pa sve do ekstremno velikih koji su preko 10 kilometara.

Širi komadi ploča se nazivaju polja leda (eng. ice field). U polju leda se može naići na dosta veliki broj komada plutajućeg leda. Poljem leda se može ploviti, međutim, plovidba njime je izazov, budući da svaki pojedini komad leda predstavlja opasnosti od sudara.

U mnogim područjima poput Baltičkog mora, plutajući led je uglavnom sezonska pojava. Pojavljuje se zimi i nestaje u toplijim godišnjim dobima.



Slika 1.8 Plutajuće ledene ploče [9]

## **2. PROJEKTNI ZAHTJEVI KOJI SE POSTAVLJAJU PRED BRODOVE ZA PLOVIDBU ZALEĐENIM MORIMA [10]**

### **2.1. Općenito**

U Pravilima se pretpostavlja kada brod plovi u zaleđenom Baltičkom moru, da plovi kanalom koji je napravio ledolomac. Ojačanja se zahtijevaju zbog toga što:

- Bokovi broda na srednjem dijelu broda nisu dovoljno jaki da bi izdržali opterećenja tlaka leda.
- Vjerojatnost opterećenja tlaka leda će se povećati sa jakim vjetrom.
- Širina ledolomca je 18-25 m, pri čemu stvara kanal približno iste širine. Za Aframax i Suezmax tankere to možda neće biti dovoljno, i možda će trebati dva ledolomca u paralelnom radu ispred tankera. Upitno je hoće li biti dostupan dovoljan broj ledolomaca u teškim vremenskim uvjetima. Za notacije za područje Arktika, problem je manji zbog toga što te notacije nagovještaju sposobnosti lomljenja leda.

Plovidba u ledu može uzrokovati oštećenja na:

- Trupu
- Brodskom vijku
- Kormilima
- Porivnom sustavu

Funkcioniranje u ekstremno hladnim klimatskim uvjetima može uzrokovati oštećenja:

- Tereta
- Opreme broda
- Krti lom čelika

Ovisno o području plovidbe brodovima se dodjeljuje klasa leda, te time i pripadajući zahtjevi. Konkretno, klasifikacijsko društvo Bureau Veritas je izdao Ice Class [11] i Polar Class notacije [12], koje se ovisno o području plovidbe, uglavnom bave ojačanjima konstrukcije koja treba izdržati opterećenja tlaka leda na trup. Problemima vezanim za pripremanje strojeva i broda na zimske uvjete se bavi Bureau Veritas-ova COLD class notacija [13]. Ta notacija se bavi kvalitetom čelika konstrukcija izloženih niskim temperaturama zraka, stabilitetom broda prilikom širenja leda, klimatizaciji prostorija u kojima se nalaze strojevi, pomoćni sustavi, sustavi grijanja i odleđivanja, te uređajima za odleđivanje, funkcioniranjem strojeva na palubi i opremom koja je izložena niskim temperaturama zraka.

## 2.2. Projektni zahtjevi

### 2.2.1. Projektni zahtjevi za brodove koji plove Baltikom

Klase leda koje su namijenjene brodovima koji plove Baltikom daju zahtjeve koje se odnose na:

- trup – pojas leda
- izlaznu snaga pogonskog stroja
- osovinski vod
- brodski vijak
- sidrenje
- grijanje balastnih tankova
- usis morske vode
- kapacitet zraka za pokretanje kompresora
- kormilarski i upravljački mehanizam
- zaštitu od korozije

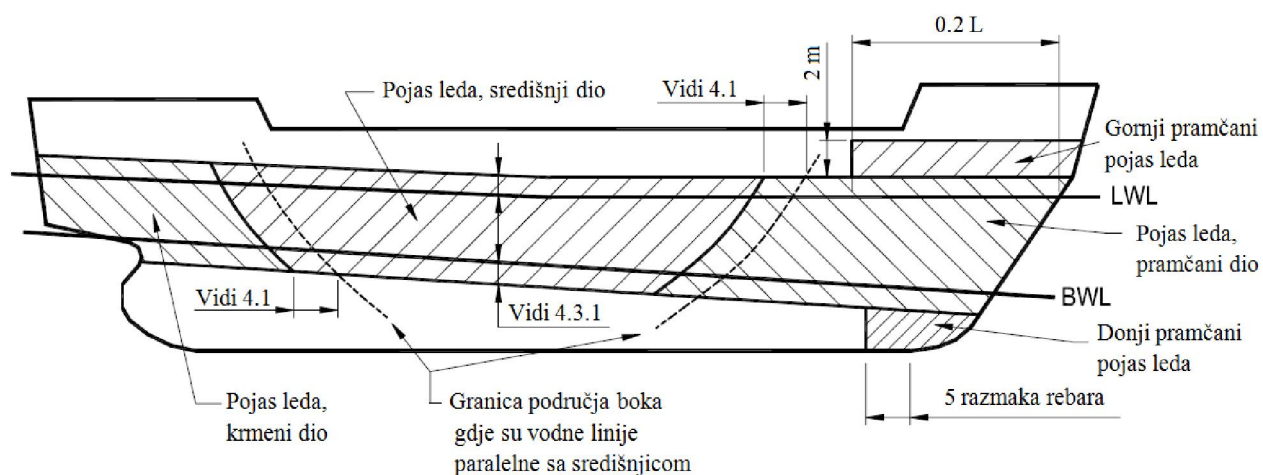
#### 2.2.1.1 Trup – pojas leda

Na slikama 2.1 i 2.2 su prikazani pojasevi leda prema pravilima za područje Baltika i Arktika. Gornji i donji prednji pramčani pojas leda se ojačava samo za najviše notacije. Uzdužno i poprečno ukrepljivanje je dopušteno. Pravila za područje Arktika, daju opsežnije zahtjeve glede pojasa leda, te je ojačana i konstrukcija dna.

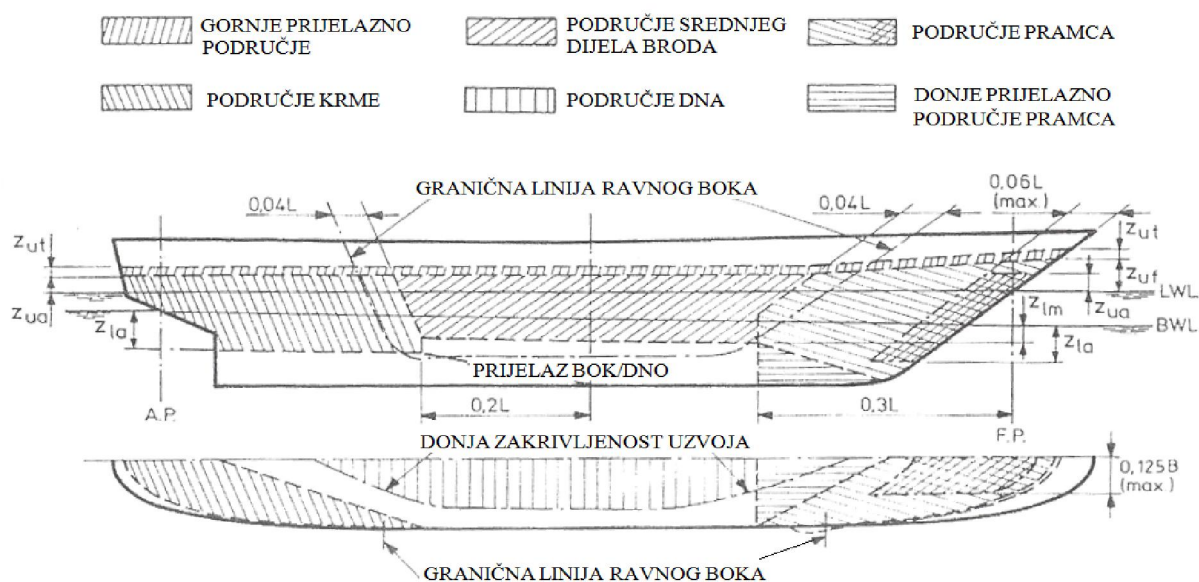
S obzirom na pramčani bulb, mogu se napomenuti slijedeće smjernice:

Bulb je prihvatljiv za klase leda za područje Baltika. Može biti prihvatljiv za velike tankere s polarnom klasom, međutim, nije prihvatljiv za relativno male tankere s polarnom klasom, niti za ledolomce.

Težina čelika se prosječno povećava 4-5% za 1C, 6-7% za 1B, te 8-10% za 1A i 1AS.



Slika 2.1 Ojačanja za led koja se primjenjuju na brodove koji plove Baltikom



**Slika 2.2 Ojačanja za led koja se primjenjuju na brodove koji plove Arktikom**

### 2.2.1.2 Izlazna snaga pogonskog stroja

Općenito, za plovidbu ledom je zahtijevana povećana izlazna snaga pogonskog stroja, te u odnosu na plovidbu bez leda može biti i od 2 do 3 puta veća. Zahtijevano povećanje izlazne snage pri plovidbi ledom može dati slabiju iskoristivost propelera pri plovidbi izvan ledenog područja. Kao posljedica toga, za velike brodove projektirane za visoke klase leda treba se razmotriti, umjesto sporohodnog dizel motora, dizel električna propulzija zbog mogućnosti kontrole broja okretaja vijka.

Budući da tražena izlazna snaga dosta ovisi o formi trupa u području pramca, značajno smanjenje snage se može postići s optimalnim projektom. Na slici 5.2 danom u poglavlju 5.1.3 se mogu vidjeti kutovi koji imaju veliki utjecaj na potrebnu izlaznu snagu pogonskog stroja.

### 2.2.1.3 Osovinski vod

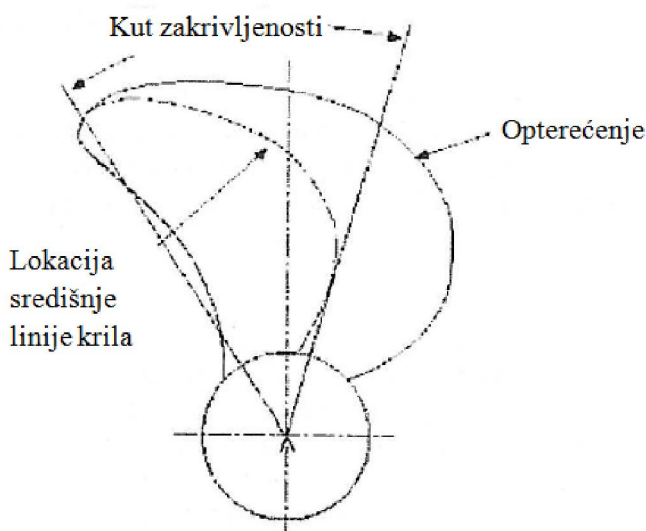
Osovina broskog vijka treba izdržati dodatna opterećenja uslijed loma ili savijanja krila broskog vijka. Cijeli osovinski vod treba izdržati dodatna dinamička opterećenja uzrokovana kontaktima propelera s ledom uslijed plovidbe zaleđenim morem.

#### 2.2.1.4 Brodski vijak

Projekt broskog vijka se temelji prema opterećenju leda izračunatog prema Pravilima. Brodski vijci s promjenjivim usponom koji su srpasti i jako srpasti, su prikladni za sve klase leda za područje Baltika. Umjereno srpasti brodski vijci s fiksnim usponom, iako su prihvatljivi za najnižu notaciju, manje su prikladni za bilo kakvu klasu leda budući da se lako oštete u ledu.

Kada je kut zakrivljenosti krila vijka koji je prikazan na slici 2.3 veći od  $25^\circ$ , taj vijak se definira kao jako srpasti vijak. Čvrstoća takvih vijaka se mora provjeriti korištenjem metode konačnih elemenata. Malo srpasti vijci, kao i obični vijci, se ne ispituju na taj način.

Kada se koristi električna propulzija, brodski vijak se projektira prema maksimalnom izlaznom momentu na motoru.



**Slika 2.3** Projicirani pogled krila broskog vijka

Sapnica smanjuje opterećenje leda na brodski vijak i osovinski vod, te može značajno povećati neto poriv pri niskim brzinama.

Brodski vijci promjera većeg od 7m ne moraju imati ojačanje radi leda. Vijak mora i u uvjetima balastnog opterećenja raditi ispod razine leda. U nekim projektnim zahtjevima vrh krila treba biti 1.5-2 m ispod razine mora čime se ograničava promjer vijka, te može rezultirati zahtjevom za korištenjem dva vijka.

#### 2.2.1.5 Sidrenje /tegljenje

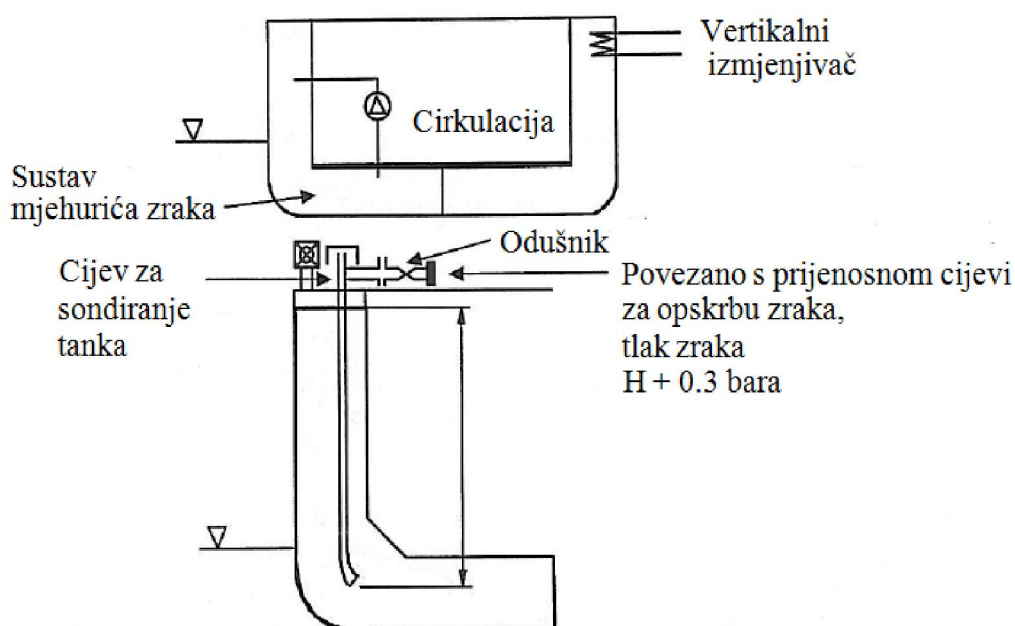
Postoje manji zahtjevi za s klase leda za područje Baltika, gdje se specificira postupak tegljenja.

### 2.2.1.6 Grijanje balastnih tankova

Balastnu vodu možemo zaštititi od zaleđivanja sa:

- zagrijavanjem
- sustavom mjehurića zraka (Air bubbling system)
- vertikalnim izmjenjivačem
- cirkulacijom

Važno je grijati balastne tankove poviše vodne linije, gdje će temperaturom dominirati temperatura zraka, dok će temperaturom u balastnim tankovima ispod vodne linije dominirati temperatura mora. Shematski prikaz različitih metoda zagrijavanja balastnih tankova je prikazan na slici 2.4.



Slika 2.4 Shematski prikaz grijanja balastnih tankova

### 2.2.1.7 Usis morske vode

Zahtjevi se odnose na volumen usisa morske vode i lokaciju cijevi. Mora bit omogućeno grijanje usisa morske vode korištenjem pare, vruće vode, itd.

### 2.2.1.8 Kapacitet zraka za pokretanje kompresora

Potreban je povećan kapacitet kompresora za klasu leda 1AS.

### **2.2.1.9 Kormilarski i upravljački mehanizam**

Za klase leda za područje Baltika, kormilarski i upravljački mehanizam se dimenzionira kao i za druge brodove korištenjem slijedećih minimalnih brzina:

|      |            |
|------|------------|
| -1C  | 14 čvorova |
| -1B  | 16 čvorova |
| -1A  | 18 čvorova |
| -1AS | 20 čvorova |

Za klase leda za područje Arktika, proračun se temelji na opterećenju leda.

### **2.2.1.10 Dodatna zaštita od korozije za plovidbu zaleđenim morem**

Pojedina područja koja su osobito izložena trošenju i oštećenju su uzeta u obzir, kao što je kuka na kormilu, pojas leda, itd.

### **2.2.2. Projektni zahtjevi za brodove koji plove Arktikom**

Klase leda koje su namijenjene brodovima koji plove Arktikom, uz gore navedene, daju i zahtjeve koje se odnose na:

- poprečnu čvrstoću trupa
- materijale trupa koji su izloženi niskim temperaturama
- stabilitet neoštećenog i oštećenog broda (dodatni zahtjevi)
- uzdužna čvrstoću trupa uslijed nasukavanja i sudara

#### **2.2.2.1 Poprečna čvrstoća trupa**

Za brodove koji plove Arktikom, proračun čvrstoće trupa uključuje proračun poprečne čvrstoće uslijed opterećenja za koje se pretpostavlja da se povećava kada je brod zarobljen između plutajućih ledenih ploča.

#### **2.2.2.2 Materijali trupa izloženi niskim temperaturama**

COLD class notacija se konkretno bavi kvalitetom čelika konstrukcija izloženih niskim temperaturama zraka.

#### **2.2.2.3 Stabilitet**

Brodovi koji plove Arktikom i ledolomci imaju zahtjeve koje se odnose na

- stabilitet neoštećenog broda ( $GM > 0.5$  m),
- stabilitet oštećenog broda,
- stabilitet broda pri nasukavanju se treba procijeniti kada se nasukava na veliki komad leda, za centralno nasukavanje i pod kutom.

#### **2.2.2.4 Uzdužna čvrstoća nosača trupa**

Moment savijanja i smične sile uslijed nasukavanja i sudara se trebaju ocijeniti za koji plove Arktikom i ledolomce.

### **2.3. Zaleđivanje palube broda**

Zaleđivanje palube broda je pojava koja se javlja kada je temperatura vode oko 6°C ili je niža, a temperatura zraka je ispod 0°C. Zajedno s vodom koja se preljeva ili raspršuje preko palube, može nastati led na palubi, nadgrađu i teretu na palubi, ako postoji. Kako sloj leda raste, tako se stabilitet broda smanjuje.

Za tankere stabilitet nije kritičan, međutim, zaleđivanje palube broda može predstavljati problem za ukupnu sigurnost.

DNV je uveo notaciju klasa DEICE koja ima zahtjeve glede:

- Nakupljanja leda s gledišta stabiliteta
- Zahtjevi razleđivanja (Anti-icing) za određenu opremu/površine gdje je potrebno konstantno funkcioniranje
- Zahtjevi za odstranjivanje leda (De-icing) za opremu/površine gdje je inicijalno nakupljanje prihvatljivo. Međutim, brod mora imati opremu za odstranjivanje leda kojom se može odstraniti led u razdoblju 4-6 sati.

### **2.4. Buka i vibracije**

Vjerojatno zbog ograničenog broja brodova koji plove ledom, buka i vibracije na brodovima koji plove ledom je tema koja je primila manje pažnje. Međutim, s povećanjem aktivnosti u istraživanju Arktika i mogućim otvaranjima komercijalnih plovnih putova kroz Sjeveroistočni, kao i za Sjeverozapadni prolaz, buka i vibracije koje stvaraju brodovi se mora uzeti u obzir.

Plovidba ledom također stvara pretjerane razine buke pod vodom. Višestruke istrage emisije podvodne buke su napravljene zbog utjecaja na život sisavaca u Arktiku.

Utvrđeno je da buka štetno djeluje na sisavce pod ledom jer uzrokuje nasukavanja koja se događaju zbog dezorijentacije koju uzrokuje buka s brodova i izbjegavanje takvih djelovanja u bliskoj budućnosti će postati projektni kriterij.

Visoke razine buke i vibracije negativno utječu i na posadu broda. Uzrokuju zamor i utječu na reakcije posade, te ako u odjelima kontrole i radnim prostorima buka pređe razinu od 70 dB(A) kvaliteta komunikacije značajno opada što može predstavljati sigurnosni problem.

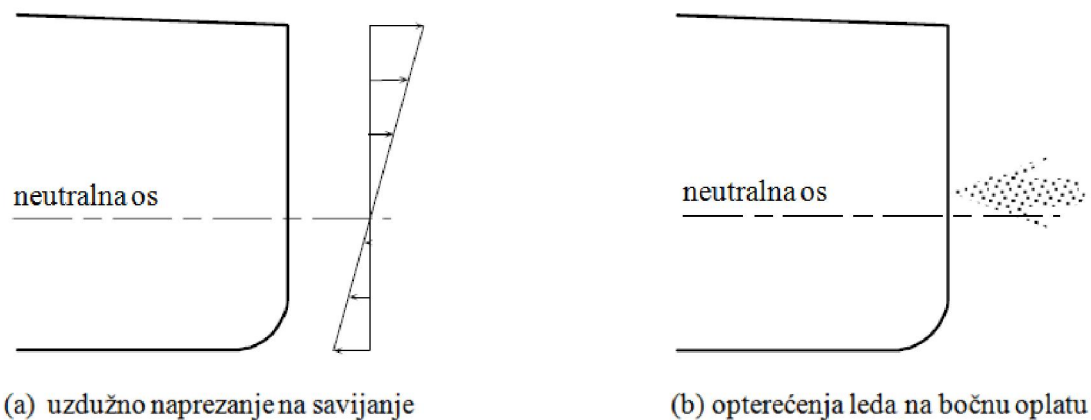
Brodovi koji plove ledom će trebati imati više kontrola mjerenja buke i vibracija od običnih brodova, kako bi mogli učinkovito ploviti. Za novogradnje, kontrola buke i vibracije bi trebala biti uključena u ranom stadiju.

### 3. OPTEREĆENJA BRODSKE KONSTRUKCIJE USLIJED LEDA

Plovidba ledom je blisko povezana s rizikom oštećenja broda zbog sudara s ledenim objektima kao što su plutajuće ledene ploče, grebeni, ledenjaci...

Svako područje karakterizirano je tipom leda, uvjetima leda te stoga i sa scenarijem sudara. Korištenjem moderne opreme i pomoći ledolomaca smanjuje se rizik sudara s ledenim brijegom ili oštećenja broda tijekom plovidbe u teškim uvjetima leda. Dakle, najčešća opasnost za brodove s klasom leda u svakom području je plovidba u poljima leda ili između plutajućih ledenih ploča.

Plutajuće ledene ploče značajno opterećuju horizontalnim silama strukturu boka broda koji plovi ledom. Pri projektiranju konstrukcije broda ojačavanja zbog opterećenja od mora su obrnuto proporcionalna ojačavanjima zbog opterećenja od leda. Kada plove ledom, tankeri doživljavaju vrlo male momente savijanja od valova (poprečne i uzdužne). Velika opterećenja leda se javljaju kada su naprezanja trupa na savijanje niska (Slika 3.1). Stoga se pri projektiranju ojačanja za led pažnja posvećuje čvrstoći koja je izložena bočnim opterećenjima. [14]

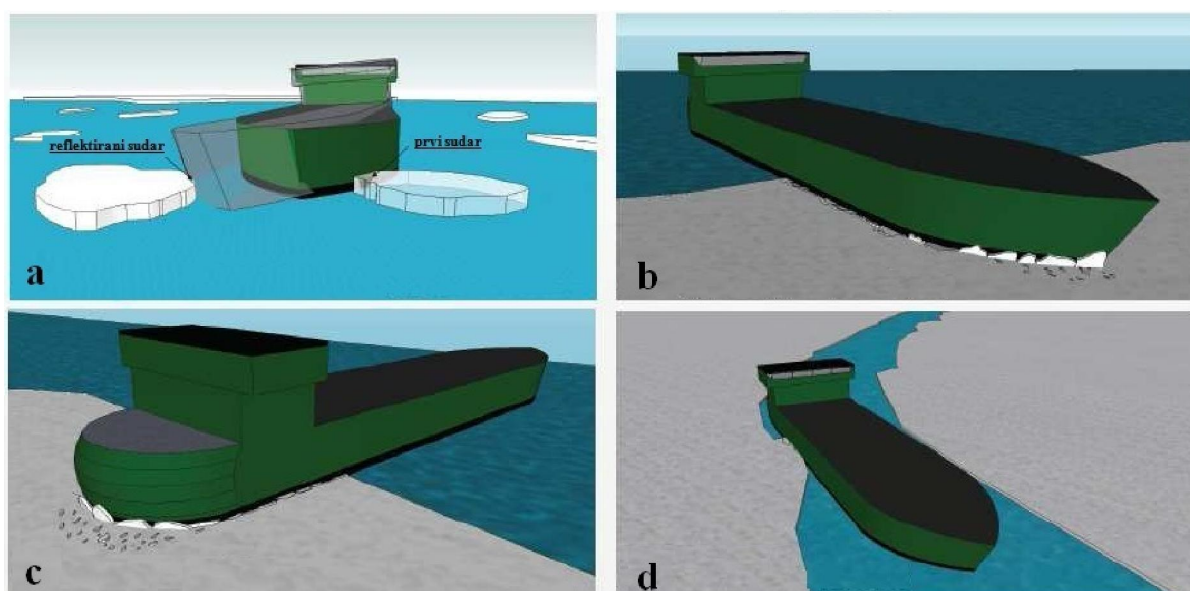


Slika 3.1 Lokalna opterećenja leda nasuprot uzdužnom naprezanju na savijanje

Analizom iskustava plovidbi u ledu uočili su se najčešći slučajevi međudjelovanja leda i broda koji su prikazani u tablici 3.1 i slici 3.2.

**Tablica 3.1 Najčešći slučajevi međudjelovanja leda i broda [15]**

| Slučaj            | Područje kontakta             | Opis                            |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Sudar pod kutom   | Pramac, pramčano rame         | Kretanje u razlomljenom ledu    |
| Sudar pod kutom   | Sredina broda                 | Kretanje u kanalu, manevriranje |
| Reflektiran sudar | Pramac, premačano rame        | Kretanje u razlomljenom ledu    |
| Lomljenje leda    | Pramčana statva, pramac, krma | Kretanje u polju leda           |

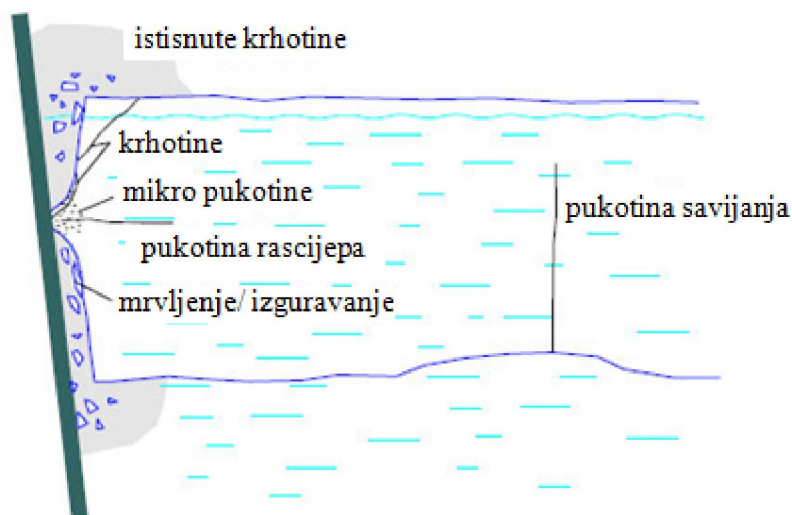


**Slika 3.2 Sudar pod kutom i reflektirani sudar (a), lomljenje leda pramcem (b), lomljenje leda krmom (c) i kretanje u kanalu (d) [15]**

### 3.1. Međudjelovanje leda i konstrukcije [16]

Prilikom međudjelovanja leda i konstrukcije, led je prignječen između konstrukcije i preostalog dijela veće mase leda. Tlačne sile uzrokuju lom leda blizu konstrukcije, stvarajući lomove i krhotine u ledu te se time smanjuje površina kontakta.

Cijelo područje međudjelovanja je karakterizirano s tri različita područja tlaka – kritična zona, područje pozadinskog tlaka i područja nedavno raspadnutog leda. Kritične zone su lokalizirana područja leda gdje se veliki tlakovi pojave u kratkom vremenskom razdoblju. Ta područja visokog tlaka se konstantno mijenjaju zbog lokalnog pucanja leda. Smrvljen led zarobljen između trupa i leda naglašava pozadinski tlak koji okružuje područja visokog tlaka. Istisnute krhotine tlače led sprječavajući stvaranje pukotina unutar leda.



Slika 3.3 Međudjelovanje trupa i leda (prema Daley i sur. 1998)

Jedan od prvih modela opterećenja leda su predložili Khesin i Kurdymov, koji su pretpostavili jednoliku debljinu smrvljenog leda koji se istisne kako sudar napreduje. Kasnija mjerenja tlakova prilikom sudara broda s ledom nisu podupirali jednoliku debljinu smrvljenog leda i stvaranje jednolikog tlaka. S vremenom su predlagani složeniji modeli leda. Raspodjela lokalnog tlaka tijekom međudjelovanja trupa i leda je proučavana prilikom ispitivanja nailazaka broda na led (koristeći senzore za tlak smještene na konstrukciju broda kao npr. Louis S. St. Laurent i Canmar Kigoriak) i ispitivanjima materijala. Svi ti testovi su pokazivali varijacije lokalnog tlaka u cijelom području kontakta. Neka ispitivanja su pokazala područja poput linije koja su pod vrlo visokim tlakom i okružena s relativno niskim tlakom (Joensuu i Riska), a druga ispitivanja su pokazala visoke tlakove u obliku X i dvostrukog Y (Medium scale indentation, Hobsons choice tests).

Iz gore navedenog je jasno kako tlak leda nije jednolik u području kontakta. Lokalizirani tlak je višestruko veći od prosječnog. Iz tog razloga dvije vrijednosti tlaka su potrebne za projektiranje konstrukcije: jedan za lokalni, a drugi za ukupni projekt konstrukcije. To traži

dva različita načina opisivanja tlaka sudara leda sa površinom kontakta: procesni i prostorni odnos tlaka-površine (Daley 2004).

Procesni odnos tlaka-površine opisuje kako se prosječni tlak odnosi prema ukupnoj kontaktnoj površini. Tlak se može ili smanjiti ili povećati kako se međudjelovanje nastavlja. Procesni odnos tlaka-površine se koristi za izračun ukupne sile sudara.

Prostorni odnos tlaka-površine opisuje raspodjelu lokalnog tlaka u ukupnoj kontaktnoj površini u jednom trenutku vremena. Najviši tlakovi se javljaju na malom području na mjestu vrha. Prosječni tlak kod većih površina će nužno biti manji od tlaka vrha. Stoga, tlak i površina su obrnuto proporcionalni u prostornom odnosu tlaka-površine.

Prostorni odnos tlaka-površine se koristi za određivanje projektnih opterećenja na lokalnu konstrukciju, kao što su oplata i ukrepe.

Budući da se u ovom radu dimenzioniraju konstrukcijski elementi boka, u što spadaju oplata boka s pripadajućim uzdužnjacima, koristi se prostorni odnos tlaka-površine.

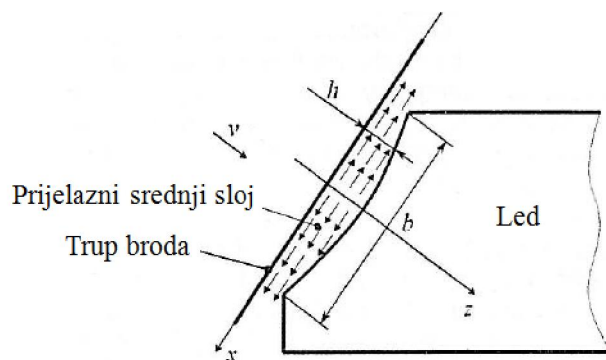
Opterećenje leda se određuje u skladu sa Finnish Maritime Administration, "Tentative Note for Application of Direct Calculation Methods for Longitudinally Framed Hull Structure", objavljenog 2003.[17], pri čemu se u analizi modela strukture boka uzima ekstremni tlak. U svrhu dimenzioniranja uzdužnjaka boka i njegovih spojeva sa okvirnim rebrima, ekstremno opterećenje leda se može pretpostaviti kao linijsko opterećenje koje djeluje na uzdužnjak boka unutar pojasa leda. U svrhu dimenzioniranja oplata boka, ekstremno opterećenje se primjenjuje kao površinsko opterećenje smješteno između dva uzdužnjaka, gdje je duljina opterećenja jednaka dva razmaka uzdužnjaka i visina opterećenja ovisi o klasi leda. Postupak je detaljno opisan u poglavlju 5.2.2.1 (korak 3 i 4).

U slijedećem poglavlju je opisan načelni postupak određivanja odnosa debljine leda i čvrstoće konstrukcije broda koji plovi ledom. Na tom principu se temelji matematički model kojim se opisuju slučajevi međudjelovanja broda i leda koji su dani u tablici 3.1, a razvili su ga Bureau Veritas i The St Petersburg State Marine Technical University.

Matematički model omogućuje određivanje opterećenja leda koje djeluje na trup broda tijekom plovidbe ledom. Osnova matematičkog modela je međudjelovanje trupa broda i plutajuće ledene ploče, koje se smatra posrednim ne-centralnim sudarom. Ne-centralni sudar se može preinačiti u centralni smanjivanjem koeficijenta mase i brzine.

### 3.2. Načelni postupak određivanja odnosa debljine leda i strukturne čvrstoće broda koji plovi ledom [15]

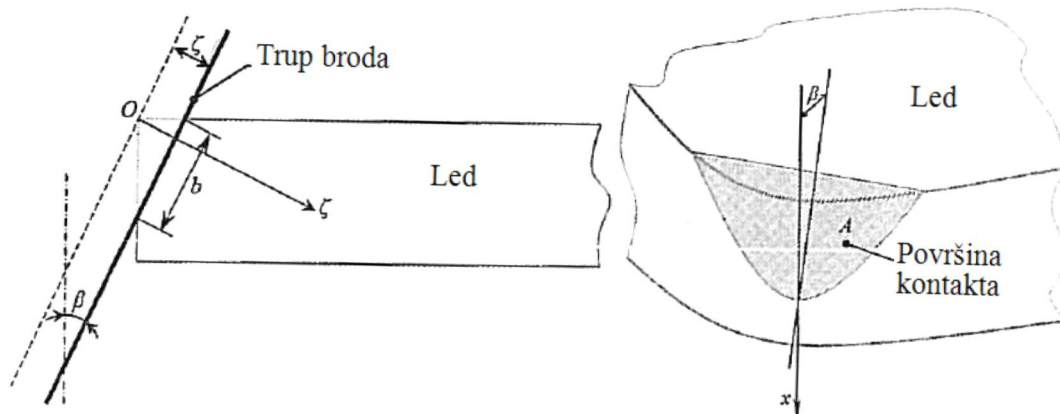
Istraživanja udara krutog tijela o led, koja su proveli ruski znanstvenici, otkrili su postojanje prijelaznog srednjeg sloja u zoni kontakta između leda i objekta kao što je prikazano na slici 3.4. Prijelazni srednji sloj ima viskozna i plastična svojstva.



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100

oćenja

oja je  
visi o  
1 ( $f$ )



Slika 3.5 Shematski pogled na područje kontakta između broda i leda

Čvrstoća konstrukcije boka broda (smatrana roštiljem) ovisi o strukturnom rasporedu, dimenzijama konstrukcijskih elemenata i značajkama materijala, a ne ovisi o masi broda, brzini, debljini i čvrstoći leda. S ovim pretpostavkama, čvrstoća trupa se ne može procijeniti promatrajući opterećenje leda. Skup koji povezuje zajedničke parametre čvrstoće broda i opterećenja leda se treba odrediti, te obuhvaća tlak prilikom kontakta i visinu površine kontakta.

Dopuštena čvrstoća konstrukcije boka ( $\sigma = \sigma_{all}$ ) se može postići različitim kombinacijama tlaka leda i visine zone kontakta. Stoga, čvrstoća konstrukcije brodskog trupa i parametri koji karakteriziraju uvjete plovidbe se mogu povezati slijedećim skupom jednažbi:

$$p = p(b | \sigma = \sigma_{all}) \quad (3.2)$$

$$p = p(v, F, M_r, a, f) \quad (3.3)$$

$$b = b(v, F, M_r, a, f) \quad (3.4)$$

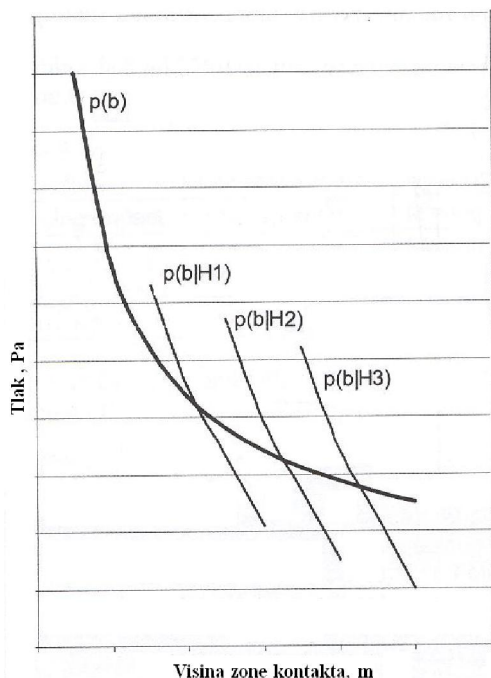
Kao što je spomenuto gore, glavni parametar koji utječe na izbor klase leda broda, te zavisno o tome i na stupanj ojačanja za led je debljina leda ( $H$ ). Izjednačavanjem vertikalne projekcije ukupne sile kontakta i granične sile savijanja leda:

$$P = m \sigma_{ice, max} H^2 \quad (3.5)$$

dobiva se izraz:

$$p = p(b | H = konst.). \quad (3.6)$$

Krivulje  $p = p(b | H = konst.)$  presijecaju krivulju  $p = p(b | \sigma = \sigma_{all})$  prikazane na slici 3.6.



Slika 3.6 Funkcije tlaka za različite visine zone kontakta

Točke presijecanja odgovaraju točkama gdje je čvrstoća konstrukcije broda jednaka opterećenju drobljenja leda čija je debljina jednaka  $H1$ ,  $H2$  i  $H3$ . Sa povećanjem debljine leda ( $H1 < H2 < H3$ ), točke presijecanja se pomiču na područje nižeg tlaka kontakta ( $p1 \geq p2 \geq p3$ ) i veće vrijednosti površine kontakta ( $b1 < b2 < b3$ ). Dakle, za svaku vrijednost debljine leda postoji točka gdje je čvrstoća konstrukcije broda jednaka opterećenju drobljenja leda, dajući maksimalnu dopuštenu debljinu leda za danu strukturnu čvrstoću.

Rješavanje sustava jednačbi od (3.2) do (3.5) omogućava ne samo procjenu sigurne debljine leda za trup broda, nego i izračun sigurne brzine broda koja odgovara projektnoj čvrstoći.

## **4. POSTOJEĆA PRAVILA ZA PROJEKTIRANJE BRODSKE KONSTRUKCIJE ZA PLOVIDBU ZALEĐENIM MORIMA**

### **4.1. Općenito**

Kako bi osigurali učinkovitu i sigurnu plovidbu, brodski projekti moraju ispuniti tehničke zahtjeve vezane za formu trupa, ojačanja za led, snagu pogonskog stroja, te ispuniti mjere kojim se osigurava odgovarajuće funkcioniranje brodskih sustava i opreme, te sigurni radni uvjeti za posadu u vremenskim hladnim uvjetima. Povrh toga trebaju se poduzeti mjere za smanjivanjem utjecaja na okoliš.

Odabir tehničkih zahtjeva ovisi o planiranoj službi broda, sezoni i lokaciji djelovanja, te i o mjerodavnim državnim i međudržavnim propisima u području djelovanja. Većina uključenih zemalja su razvile svoj nacionalne zahtjeve i oznake klasa leda, dok klasifikacijska društva također imaju, bar djelomično, različite zahtjeve i notaciju klasa. Točno razumijevanje tih različitih zahtjeva je ključno za uspjeh projekta. Međutim, podudaranje između različitih pristupa nije uvijek lako naći što predstavlja poteškoće za projektante i pomorce.

Za brodove koji djeluju u arktičkim vodama procjenjivanje stanja leda kao što je tip leda, rasprostranjenost, debljina, raspodjela temperature mora i zraka je završeno. Stanje leda se koristi se kao ulazni podatak za razvoj koncepta osnovnog načela za određivanje opterećenja od leda na brodski trup i privjeske. Poznavanjem opterećenja leda određuju se odgovarajuća ojačanja za led, te i formuliraju zahtjevi za glavni pogon i propulziju.

## 4.2. Procjenjivanje arktičkih uvjeta

Za funkcioniranje u uvjetima leda brodovi trebaju imati prikladna ojačanja koja su propisana dodatnim notacijama klasa propisanih za navigaciju u ledu. Te dodatne notacije klasa su podijeljene u dvije kategorije:

- Ice Class notacija [11],
- Polar Class notacija [12].

Obe notacije daju zahtjeve za ojačanje trupa i snagu propulzije, ali ne razmatraju zahtjeve za posebne prilagodbe i opremu, koje su uzete u obzir u COLD notaciji [13].

Ice Class notacije su u rasponu od Ice Class 1A Super do Ice Class 1C i temelje se na Finish-Swedish Ice Class Rules [18] koja su razvila Finnish Maritime Administration (FMA) i Swedish Maritime Administration (SMA) u suradnji s klasifikacijskim društvima. Ona su odgovarajuća za uvjete jednogodišnjeg leda, što znači da se led akumulirao tijekom jedne zimske sezone i debljine je do 120 cm, te je niske čvrstoće. Ti uvjeti su tipični za Baltičko more i Zaljev sv. Lovrijenca.

U dodatku gornjim notacijama, Ice Class 1D se može dodijeliti brodovima koji plove u područjima gdje su uvjeti jednogodišnjeg leda takvi da se ojačanja pramca, kormila i sustava upravljanja smatraju dovoljnim.

Polar Class notacija je u rasponu od Polar Class 1 do Polar Class 7 i temelje se na IACS Unified Requirements concerning Polar Class [19]. Oni su prikladni za arktičke uvjete leda koji mogu varirati od debelog jednogodišnjeg do višegodišnjeg leda. Višegodišnjim ledom se smatra morski led koji je preživio bar jedno ljetno topljenje i debljine je do 3 m, te je visoke čvrstoće.

### 4.3. Usporedba notacija i pravila danih za područje Arktika i Baltika

Pregled usporedbi između Bureau Veritas Ice Class i Polar Class notacije i pravila koja su izdale Kanadske vlasti, Russian Maritime Register of Shipping i Finnish Maritime Administration je dan u tablici 4.1.

Mora se napomenuti kako je podudaranje klasa približno i razlike mogu ovisiti o odabranom kriteriju za usporedbu. Službeno priznate jednake klase su označene podebljanim slovima i odnose se na prepoznavanje jednakosti Ice Class Notacije Bureau Veritasa od strane finskih i kanadskih vlasti, te jednakost između 1972 i 1995 Canadian Arctic Classes.

**Tablica 4.1 Pregled usporedbi klasa leda različitih registara [15]**

| Tip leda                                                                                     | Tipična debljina leda, m | Ice Class Ships (BV) | Polar Class Ships (BV) | Canada 1972 (ASPPR)   | Canada 1955 (ASPPR) | Ice going ships (RMRS) | Ice Class Ships (FMA) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|
| Cjelogodišnje funkcioniranje u svim polarnim vodama                                          | >3.0                     | -                    | PC1                    | <b>Artic Class 10</b> | <b>CAC 1</b>        | Arc 9                  | -                     |
| Cjelogodišnje funkcioniranje u umjerenim uvjetima višegodišnjeg leda                         | 3.0                      | -                    | PC2                    | <b>Artic Class 8</b>  | <b>CAC 2</b>        | Arc 8                  | -                     |
| Cjelogodišnje funkcioniranje u dvogodišnjem ledu koji može sadržavati i stari led            | 2.5                      | -                    | PC3                    | <b>Artic Class 6</b>  | <b>CAC 3</b>        | Arc 7                  | -                     |
| Cjelogodišnje funkcioniranje u debelom jednogodišnjem ledu koji može sadržavati i stari led  | >1.2                     | -                    | PC4                    | <b>Artic Class 3</b>  | <b>CAC 4</b>        | Arc 6                  | -                     |
| Cjelogodišnje funkcioniranje u srednjem jednogodišnjem ledu koji može sadržavati i stari led | 1.2 -1.7                 | <b>IAS</b>           | PC5<br>PC6             | <b>Tip A</b>          | <b>Tip A</b>        | Arc 5                  | <b>IAS</b>            |
| Ljetno/jesensko funkcioniranje u tankom jednogodišnjem ledu koji može sadržavati i stari led | 0.7                      | <b>IA</b>            | PC7                    | <b>Tip B</b>          | <b>Tip B</b>        | Arc 4                  | <b>IA</b>             |
| Jednogodišnji led                                                                            | 0.5                      | <b>IB</b>            | -                      | <b>Tip C</b>          | <b>Tip C</b>        | Ice 3                  | <b>IB</b>             |
| Jednogodišnji led                                                                            | 0.4                      | <b>IC</b>            | -                      | <b>Tip D</b>          | <b>Tip D</b>        | Ice 2                  | <b>IC</b>             |
| Otvoreno more sa santama leda                                                                | -                        | <b>ID</b>            | -                      | Tip E                 | Tip E               | Ice 1                  | <b>II</b>             |

Plovidba u Kanadskom Arktiku je veoma teška tijekom zime i tražen je visok stupanj ojačanja za led kako bi se moglo ploviti na visokim geografskim širinama tijekom najoštrijih razdoblja u godini. Ostali izazovi tiču se činjenice da je ucrtavanje pozicije broda na karti još uvijek nepouzdanost u nekim dijelovima Kanadskog Arktika i kako zbog globalne klimatske promjene blaža godišnja doba u Sjeverozapadnom prolazu vode povećanju broja pojavljivanja ledenjaka i višegodišnjeg leda na glavnim plovidbenim rutama. Tablica 4.2 predstavlja kratki pregled uvjeta koji se mogu sresti na Kanadskom Arktiku tijekom zime. Vrijednosti daju prosječne najteže uvjete koji se mogu pojaviti, ali se ne mogu koristiti za projektiranje jer ne pokazuju lokalne ekstremne vrijednosti.

**Tablica 4.2 Meteorološki uvjeti u Kanadskom Arktiku [15]**

| <b>Područje</b>             | <b>Razdoblje</b>   | <b>Debljina leda</b>       | <b>Grebeni</b>                     | <b>Ledeni brijegovi</b>             |
|-----------------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Beaufortovo more            | listopad-srpanj    | 180 cm (FY)<br>320 cm (MY) | 5 -15 grebena/km<br>10-15 m visine | rijetko                             |
| Baffinov zaljev             | listopad - kolovoz | 160 cm (FY)<br>280 cm (MY) | -                                  | >2000/godini<br>12 mjeseci prisutni |
| Davisov prolaz              | listopad - kolovoz | 160 cm (FY)<br>280 cm (MY) | -                                  | >2000/godini<br>12 mjeseci prisutni |
| Kanadski arktički arhipelag | listopad - kolovoz | 220 cm (FY)<br>350 cm (MY) | 15-20 m visine                     | par/godini<br>12 mjeseci prisutni   |
| Greenland                   | siječanj - svibanj | 50 cm (FY)<br>200 cm (MY)  | -                                  | 12 mjeseci prisutni                 |
| Newfoundland                | siječanj - svibanj | 80 cm (FY)                 | 6 m visine                         | 450/godini<br>travanj- srpanj       |
| Obala Labradora             | prosinac - srpanj  | 100 cm (FY)<br>150 cm (MY) | 10 m visine                        | 1000/godini<br>12 mjeseci prisutni  |

FY: jednogodišnji led; MY: višegodišnji led

Izbor odgovarajuće dodatne notacije klase u Kanadskom Arktiku je vođen s opsežnim skupom pravila. Dva sustava se mogu koristiti za brodove koji plove u Kanadskom Arktiku: Zone-Date System i Ice Regime System. Prvi je opširno opisan u Artic Waters Pollution Prevention Act [18], i sastoji se u podjeli Kanadskog Arktika u 16 zona gdje je brodovima dozvoljeno ploviti odgovarajućim godišnjim dobima u ovisnosti o njihovom stupnju ojačanja za led. Sustav je veoma jasan, ali glavna mana je ta što ne dozvoljava plovidbu brodova van predviđenog razdoblja iako su uvjeti blaži od očekivanih.

Zbog toga su kanadske mjerodavne institucije stvorile alternativni sustav koji se zove Artic Ice Regime Shipping System [20]. Njegov princip se zasniva na jednostavnoj računici, koja ovisi o stvarnim uvjetima leda u području plovidbe, a cilj je procijeniti da li je brodu dozvoljena plovidba ili ne.

Prednost sustava je uzimanje u obzir stvarnih uvjeta leda. Međutim, nedostatak je potreba za peljarom za led na brodu koji će imati odgovarajuće kvalifikacije i iskustvo.

Iako su uvjeti prilično slični, promet u Ruskom Arktiku je nešto razvijeniji od Kanadskog. Tablica 4.3 predstavlja kratki pregled uvjeta koji se mogu sresti na Ruskom Arktiku tijekom zime. Propisi koji se trebaju slijediti ovise o tome hoće li brodovi ući u Sjevernomorsku rutu ili ne. Granice Sjevernomorske rute su označene kod otoka Novaja Zemlja na zapadnoj strani i Beringovog prolaza na istočnoj strani. U osnovi, Sjevernomorska ruta se može smatrati kao sustav ruta (u ovisnosti o trenutnim uvjetima leda) koji prolaze preko Karskog mora, Leptevskog mora, Istočnosibirskog mora i Čukotskog mora.

**Tablica 4.3 Meteorološki uvjeti u Ruskom Arktiku [15]**

| Područje             | Razdoblje          | Debljina leda              | Grebeni                            | Ledeni brijegovi               |
|----------------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Barentsovo more      | cijela godina      | 150 cm (FY)<br>250 cm (MY) | -                                  | 50/godini<br>siječanj - lipanj |
| Pečorsko more        | studen - srpanj    | 100 cm (FY)                | 5 -10 grebena/km<br>10 m visine    | rijetko                        |
| Karsko more          | studen - rujan     | 160 cm                     | 5 -10 grebena/km<br>12 m visine    | -                              |
| Leptevsko more       | listopad - srpanj  | 200 cm                     | -                                  | -                              |
| Istočnosibirsko more | listopad - kolovoz | 140 cm                     | 5 -10 grebena/km<br>12 m visine    | -                              |
| Čukotsko more        | siječanj - lipanj  | 140 cm (FY)<br>230 cm (MY) | 5 -10 grebena/km<br>10-15 m visine | -                              |

FY: jednogodišnji led; MY: višegodišnji led

Bar četiri mjeseca ranije treba se tražiti odobrenje Ministarstva prometa za plovidbu preko Sjevernomorske rute. Pravila za pomoć ledolomca i peljarenje ledom Sjevernomorskom rutom su uključena u publikaciji *Guide to Navigating through the Northern Sea Route*. Taj vodič uključuje sljedeće pravilnike koji su na snazi u Sjeverno morskom putu [21]:

*Regulations for Navigation on the Seaways of the Northern Sea Route;*

*Regulations for Icebreaker-Assisted Pilotage of Vessels on the Northern Sea Route;*

*Requirements for Design, Equipment and Supply of Vessels Navigating the Northern Sea Route.*

U ovisnosti o iskustvu kapetana i časnicima s kojim plovi u ledu, može biti potrebno imati na brodu pilota za led. The Ice Passport, or Ice Certificate, koje izdaje The Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) ili Central Marine Research & Design Institute (CNIIMF) je također obavezan za brodove koji plovo Sjevernomorskom rutom.

Opći pregled uvjeta leda za Baltičko more su dani u tablici 4.4. Oni su mnogo manji u usporedbi s arktičkim morima, ali pokazuju velika odstupanja između godina.

Pravila plovidbe su dana mjerama ograničenja koje su izdale vlasti na određene datume, koji su temeljeni na stvarnim uvjetima leda. Kada se ograničenja pojave, uglavnom se povećavaju i smanjuju postupno, pogotovo u Botničkom zaljevu i Finskom zaljevu. Ograničenja se uglavnom sastoje od minimalne zahtijevane klase leda i zahtjeva koji se odnose na snagu ili nosivost. Ograničenja prometa su dostupni preko interneta na web stranici Baltic Icebreaking Management[22].

Svrha tog sustava je ograničiti broj brodova s nedovoljnim ojačanjima za led i/ili snagom zbog osiguravanja učinkovite službe ledolomaca svim brodovima koji plovo prema i od luka u Baltičkom moru tijekom zime. Cilj je prolaz brodova ledom što je moguće više neovisno i da ledolomci pomažu većinom brodovima koji su zapeli u ledu ili su u neprilikama. Različite državne administracije su odgovorne u svojim područjima za promet i pomoć ledolomaca. Očekuje se od kapetana koji prolaze kroz led da su upoznati i iskusni s plovidbom u ledu uz pomoć ledolomca, dok peljarenje nije obavezno.

**Tablica 4.4 Meteorološki uvjeti u Baltičkom moru**

| Područje        | Razdoblje          | Debljina leda | Grebeni                    | Ledeni brijegovi |
|-----------------|--------------------|---------------|----------------------------|------------------|
| Botničko more   | siječanj - travanj | 30 cm (FY)    | 4 grebena/km<br>4 m visine | -                |
| Botnički zaljev | prosinac - svibanj | 70 cm (FY)    | 4 grebena/km<br>6 m visine | -                |
| Finski zaljev   | prosinac - svibanj | 70 cm (FY)    | 4 grebena/km<br>5 m visine | -                |

FY: jednogodišnji led

Glavni parametar utjecaja na odabir notacije klase leda su najgori očekivani uvjeti leda za određenu službu broda. Lokalni propisi također imaju utjecaj. Bureau Veritas je objavio Guidance Note (NI 543) koji omogućuju pregled uvjeta leda koji se mogu očekivati u Kanadskom i Ruskom Arktiku, te Baltičkom moru kao i odgovarajući BV i državne klase za led i povezane propise. To pomaže brodovlasnicima, brodogradilištima i projektantima planiranje rizika prema kojemu se odabire odgovarajući stupanj ojačanja za led, snage pogonskog stroja, te pripremanje broda za zimske uvjete.

Osim Bureau Veritas-a, i klasifikacijsko društvo The American Bureau of Shipping (ABS) ima iskustva s ispitivanjima projekata i nadzorom brodova koji su namijenjeni plovidbi ledom.

Pravila za led ABS iz 2003. se sastoje od:

- ABS General Ice Rules koja daju općenita pravila za led, i
- ABS Baltic Ice Rules (uklopljena Finnish –Swedish Ice Class Rules) daju pravila za led koja se odnose na operacije u Baltiku.

Kao dodatak službenim brodograđevnim pravilima iz 2003-e, ABS je slijedeće godine objavio "Guidance Notes on Nonlinear Finite Element Analysis of Side Structures Subject to Ice Loads" (ABS 2004). Taj Guidance Notes definira postupak za provođenje nelinearne MKE analize konstrukcije boka koja je opterećena ledom, te daje načine ocjenjivanja prihvatljivosti alternativnih projekata koji se temelje na najnovijoj tehnologiji.

Sadašnji ABS Guidance Notes on Ice Class [23] koji je objavljen 2005. i obnovljen 2008. nadomješta ABS iz 2004. Svrha tog Guidance Notes-a je davanje smjernica projektantima pri alternativnim postupcima projektiranja konstrukcije boka, pri alternativnim postupcima određivanja zahtijevane snage i procjeni čvrstoće propelera.

## 5. PRILAGOĐAVANJE POSTOJEĆE KONSTRUKCIJE OPLATE TANKERA ZA NAFTU U PODRUČJU GLAVNOG REBRA ZA PLOVIDBU KROZ ZALEĐENO MORE.

Glavne karakteristike tankera za naftu čija se konstrukcija oplata u području glavnog rebra prilagođava za plovidbu kroz zaleđeno more dane su u tablici 5.1.

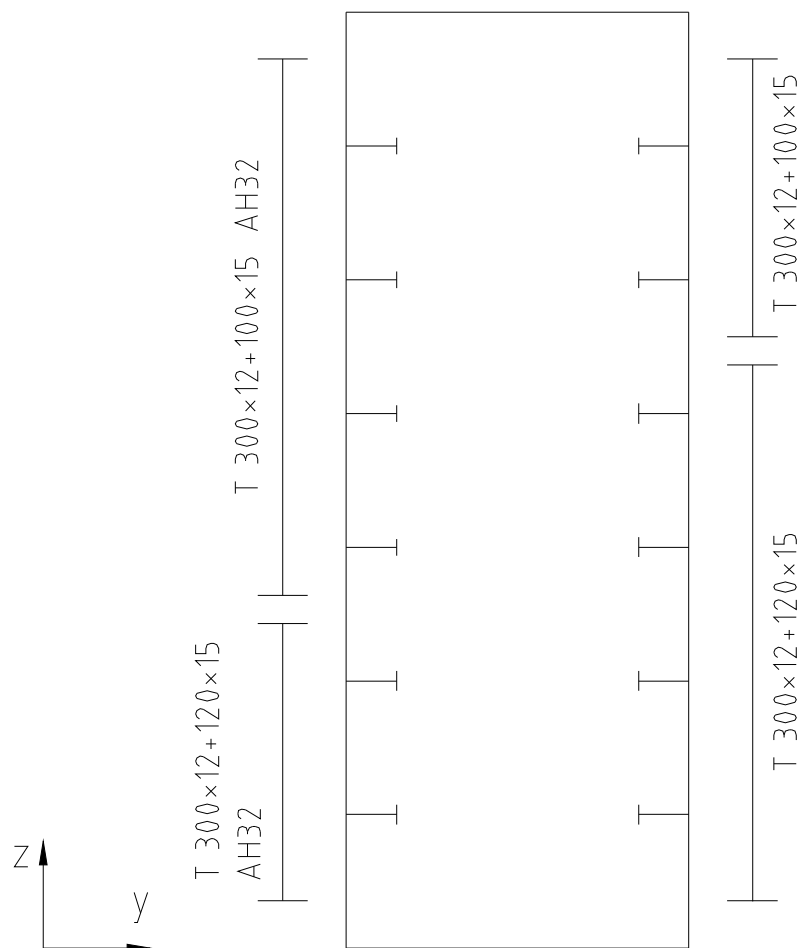
Prikaz razmatranog dijela konstrukcije oplata u području glavnog rebra je dan na slici 5.1, čije su dimenzije konstrukcijskih elemenata dane u tablici 5.2.

U postupku prilagođavanja konstrukcije oplata tankera za naftu za plovidbu kroz zaleđeno more, dimenzije konstrukcijskih elemenata se određuju prema pojednostavljenim formulama iz pravila klasifikacijskog društva Bureau Veritas čiji je proračun opisan u poglavlju 5.1.

U poglavlju 5.2 se dimenzionira konstrukcija u skladu s uputama klasifikacijskog društva ABS [23]. Tako dobivena konstrukcija se modelira u kompjuterskom programu Femap s NX Nastranom, te direktnim proračunom, primjenom nelinearne metode konačnih elemenata (NMKE), se određuju maksimalne i trajne deformacije konstrukcije oplata koje uzrokuje ekstremno opterećenje ledom.

**Tablica 5.1 Glavne karakteristike tankera za naftu**

|                        |          |        |    |
|------------------------|----------|--------|----|
| Duljina preko svega    | $L_{OA}$ | 247.24 | m  |
| Duljina između okomica | $L_{PP}$ | 236.00 | m  |
| Širina, konstruktivna  | $B$      | 42.00  | m  |
| Visina, konstruktivna  | $H$      | 21.00  | m  |
| Gaz, projektni         | $T$      | 15.60  | m  |
| Blok koeficijent       | $c_B$    | 0.8445 |    |
| Brzina, u službi       | $v_S$    | 16.10  | čv |
| Promjer propelera, FPP | $D$      | 7.5    | m  |
| Nosivost               | $\Delta$ | 114000 | t  |



**Slika 5.1** Prikaz razmatranog dijela konstrukcije oplata u području glavnog rebra

**Tablica 5.2** Dimenzije konstrukcijskih elemenata oplata tankera za naftu

| Konstrukcijski element       | Dimenzije, mm     | Materijal |
|------------------------------|-------------------|-----------|
| Vanjska oplata               | 3840x5600x14.0    | A         |
| Unutrašnja oplata            | 3840x5600x14.05   | A         |
| Uzdužnjaci vanjske oplata    | T 300x12 + 100x15 | A         |
|                              | T 300x12 + 120x15 | A         |
| Uzdužnjaci unutrašnje oplata | T 300x12 + 100x15 | AH32      |
|                              | T 300x12 + 120x15 | AH32      |
| Okvirno rebro                | 2050x5600x12      | A         |
| Ukrepe okvirnog rebra        | 1420x200x12       | A         |

Razmak uzdužnjaka iznosi 800 mm.

Razmak okvirnih rebra iznosi 3840 mm.

## 5.1. Određivanje dimenzija konstrukcijskih elemenata prema pravilima klasifikacijskog društva

Izrazi i vrijednosti za određivanje dimenzija konstrukcijskih elemenata i snage pogonskog stroja broda namijenjenog plovidbi za led su dani u pravilima klasifikacijskog društva Bureau Veritas (BV Pt E, Ch 8, Sec 2) [11]. Zahtjevi dani u BV-u, osim onih za brodove s klasom leda 1D, su ekvivalentni onim danim u "Finnish-Swedish Ice Class Rules, 01 October 2002" koji se primjenjuju za brodove koji plove zimi Sjevernim Baltičkim morem. Oznake klasa leda su klasa leda 1C, klasa leda 1B, klasa leda 1A i klasa leda 1A Super (ili skraćeno 1C, 1B, 1A i 1AS).

### 5.1.1. Gazovi klase leda

Maksimalni gaz klase leda na sredini broda treba biti gaz na slatkovodnoj teretnoj vodnoj liniji po ljeti. Linija određena s maksimalnim gazovima na pramcu, na sredini broda i krmi se označava kao teretna vodna linija TVL. Ta linija može biti isprekidana. Linija određena s minimalnim gazovima na pramcu, na sredini broda i krmi se označava s laka vodna linija LVL. Gaz i trim, ograničeni s TVL, se ne smiju premašiti kada broda plovi u ledu. Brod treba biti opterećen barem do LVL kada plovi ledom. Svaki balastni tank, smješten poviše LVL i koji je potreban za nakrcavanje broda do te vodne linije, treba biti opremljen s uređajima koji sprječavaju smrzavanje vode. Prilikom određivanja LVL, uzima se u obzir propeler koji treba biti potpuno uronjen, po mogućnosti potpuno ispod leda.

### 5.1.2. Debljina leda

Za brod s ojačanjima za led se pretpostavlja plovidba u uvjetima otvorenog mora koji odgovaraju sloju leda čija debljina ne prelazi vrijednost  $h_G$ . Projektna visina površine koja je opterećena tlakom leda,  $h$ , se smatra dijelom debljine leda  $h_G$ . Vrijednosti  $h$  i  $h_G$  su dane u tablici 5.3.

Tablica 5.3 Debljina leda

| Klase leda | $h_G$ , m | $h$ , m |
|------------|-----------|---------|
| 1AS        | 1.00      | 0.35    |
| 1A         | 0.8       | 0.30    |
| 1B         | 0.6       | 0.25    |
| 1C         | 0.4       | 0.22    |

### 5.1.3. Snaga pogonskog stroja

Snaga stroja  $P$  je maksimalna snaga koju pogonski stroj može kontinuirano isporučiti propeleru. Snaga motora ne smije biti manja od one određene formulom (5.1) i ni u kojem slučaju manja od 1000 kW za klase leda 1A, 1B i 1C, te ne smije biti manja od 2800 kW za 1AS.

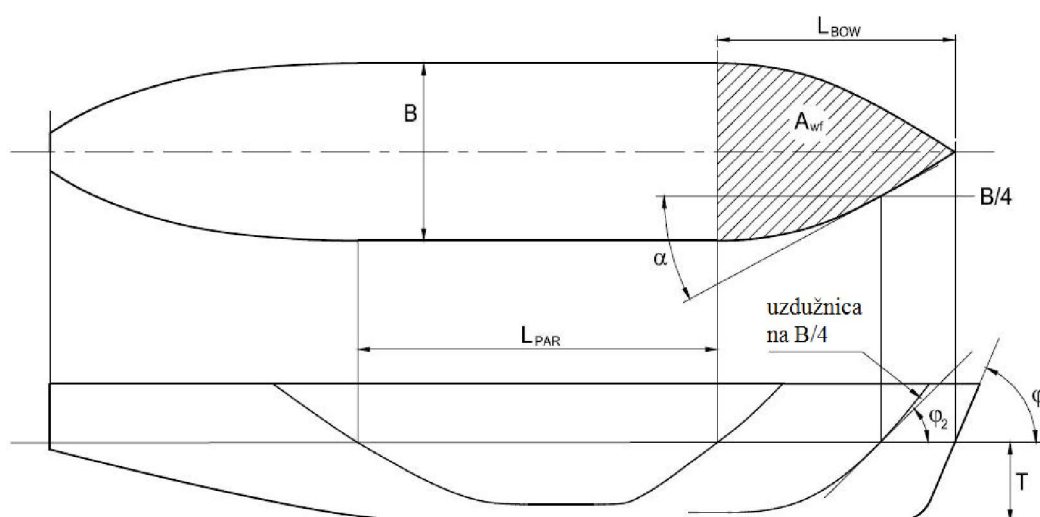
#### Definicije

Dimenzije broda, definirane ispod u tablici 5.4, su mjerene na maksimalnom gasu klase leda koji je definiran kao teretna vodna linija (TVL).

Za definiciju oznaka, također pogledati sliku 5.2.

**Tablica 5.4 Dimenzije broda**

|                                             |           |             |                |
|---------------------------------------------|-----------|-------------|----------------|
| Duljina broda na vodnoj liniji              | $L$       | 236         | m              |
| Duljina pramca                              | $L_{BOW}$ | 69.72       | m              |
| Duljina paralelnog srednjaka                | $L_{PAR}$ | 76.8        | m              |
| Maksimalna širina broda                     | $B$       | 42          | m              |
| Maksimalni gaz broda                        | $T$       | 15.951      | m              |
| Površina vodne linije na pramcu             | $A_{wf}$  | 2864.39     | m <sup>2</sup> |
| Kut vodne linije na B/4                     | $\alpha$  | 36          | °              |
| Nagib pramčane statve na simetrali          | $\phi_1$  | 90          | °              |
| Nagib pramca na B/4                         | $\phi_2$  | 50          | °              |
| Promjer propelera                           | $D_P$     | 7.5         | m              |
| Debljina zdrobljenog leda na sredini kanala | $H_M$     | Tablica 5.6 | m              |



**Slika 5.2 Prikaz bitnih kutova za izračun snage stroja**

### Minimalna potrebna snaga

Snaga motora  $P$  se računa za maksimalni gaz na sredini broda koji je određen kao teretna vodna linija (TVL) i za minimalni gaz koji je određen kao laka vodna linija (LVL). Prilikom izračuna, parametri broda koji su zavisni o gasu trebaju se odrediti za određeni gaz, ali vrijednosti  $L$  i  $B$  se određuju samo za TVL. Snaga motora ne smije biti niti manja ni veća od izračunatih snaga. Te dvije snage, u kW, se određuju po slijedećoj formuli:

$$P = K_C \frac{\left( \frac{R_{CH}}{1000} \right)^{3/2}}{D_P} \quad (5.1)$$

gdje:

$K_C$  : se uzima iz tablice 5.5

**Tablica 5.5 Vrijednosti  $K_C$**

| Broj propelera | CP propeleri ili električni ili hidraulički sustav propulzije | FP propeleri |
|----------------|---------------------------------------------------------------|--------------|
| 1 propeler     | 2.03                                                          | 2.26         |
| 2 propelera    | 1.44                                                          | 1.60         |
| 3 propelera    | 1.18                                                          | 1.31         |

$R_{CH}$  : otpor broda u kanalu s razlomljenim ledom i konsolidiranim slojem, u N, računa se prema izrazu:

$$R_{CH} = C_1 + C_2 + C_3(H_F + H_M)^2(B + C_\psi H_F)C_\mu + C_4 L_{PAR} H_F^2 + C_5 \left( \frac{LT}{B^2} \right)^3 \frac{A_{wf}}{L} \quad (5.2)$$

s:

$$H_F : 0.26 + (H_M B)^{0.5} \quad (5.3)$$

$H_M$  : koeficijent definiran u tablici 5.6

**Tablica 5.6 Vrijednosti  $H_M$**

| Klase leda | $H_M$ |
|------------|-------|
| 1A i 1AS   | 1.00  |
| 1B         | 0.8   |
| 1C         | 0.6   |

$C_1$  : koeficijent kojim se uzima u obzir konsolidirani gornji sloj razlomljenog leda i uzima se:

- za klasu leda 1A, 1B i 1C:

$$C_1 = 0$$

- za klasu leda 1AS:

$$C_1 = f_1 \frac{BL_{PAR}}{2T} + (1 + 0,021\phi_1)(f_2 B + f_3 L_{BOW} + f_4 BL_{BOW}) \quad (5.4)$$

$$\frac{B}{B} + 1$$

$C_2$  : koeficijent kojim se uzima u obzir konsolidirani gornji sloj razlomljenog leda i uzima se:

- za klasu leda 1A, 1B i 1C:

$$C_2 = 0$$

- za klasu leda 1AS:

$$C_2 = \left[ (1 + 0,063\phi_1)(g_1 + g_2 B) + g_3 \left( 1 + 1,2 \frac{T}{B} \right) \frac{B^2}{L^{0,5}} \right] \quad (5.5)$$

gdje:

$\phi_1$  : se uzima jednak  $90^\circ$  za brodove s pramčanim bulbom

$f_1$  : 23 N/m<sup>2</sup>

$f_2$  : 45.8 N/m

$f_3$  : 14.7 N/m

$f_4$  : 29 N/m

$g_1$  : 1530 N

$g_2$  : 170 N/m

$g_3$  : 400 N/m<sup>1.5</sup>

$C_3$  : 845 kg/m<sup>2</sup>s<sup>2</sup>

$C_4$  : 42 kg/m<sup>2</sup>s<sup>2</sup>

$C_5$  : 825 kg/s<sup>2</sup>

$C_\psi$  : koeficijent jednak:

- ako je  $\psi \leq 45^\circ$

$$C_\psi = 0$$

- inače:

$$C_\psi = 0.047\psi - 2.115 \quad (5.6)$$

$C_\mu$  : koeficijent jednak:

$$C_\mu = 0.15 \cos\phi_2 + \sin\psi \sin\alpha, \quad (5.7)$$

s tim da ne smije biti manji od 0.45

$$\psi = \arctan (\tan \phi_2 / \sin \alpha) \quad (5.8)$$

Slijedeći uvjet treba biti zadovoljen:

$$20 \geq \left( \frac{LT}{B^2} \right)^3 \geq 5$$

### 5.1.4. Opterećenja leda

#### 5.1.4.1 Visina opterećenog područja

Visina područja pod tlakom leda u bilo kojem određenom trenutku vremena se uzima, u m, iz tablice 5.7, u ovisnosti o klasi leda broda.

**Tablica 5.7 Visina opterećenog područja**

| Notacija | $h$ , m |
|----------|---------|
| 1AS      | 0.35    |
| 1A       | 0.30    |
| 1B       | 0.25    |
| 1C       | 0.22    |

#### 5.1.4.2 Projektni tlak leda

Vrijednost projektnog tlaka leda  $p$ , u  $\text{N/mm}^2$ , koji se uzima u obzir kod kontrole dimenzija, se računa prema sljedećoj formuli:

$$p = c_d c_1 c_a p_0 \quad (5.9)$$

gdje je:

$c_d$  : koeficijent kojim se uzima u obzir utjecaj veličina i snaga pogonskog stroja, i računa se prema sljedećem izrazu

$$c_d = \frac{af + b}{1000} \quad (5.10)$$

$a, b$  : koeficijenti definirani u tablici 5.8.

**Tablica 5.8 Koeficijenti  $a$  i  $b$**

| Područje               | Uvjeti      | $a$ | $b$ |
|------------------------|-------------|-----|-----|
| Pramčani dio           | $f \leq 12$ | 30  | 230 |
|                        | $f > 12$    | 6   | 518 |
| Središnji i krmeni dio | $f \leq 12$ | 8   | 214 |
|                        | $f > 12$    | 2   | 286 |

$f$  : koeficijent koji se računa prema sljedećem izrazu

$$f = \frac{\sqrt{\Delta P}}{1000} \quad (5.11)$$

$\Delta$  : istisnina, u t, na maksimalnom gazu klase leda

$P$  : efektivna konstantna snaga pogonskog sustava, u kW (poglavlje 5.1.3)

$c_1$  : koeficijent koji uzima u obzir vjerojatnost pojavljivanja projektnog tlaka leda na određenom području trupa u ovisnosti o određenoj klasi leda, definiran je u tablici 5.9

**Tablica 5.9 Koeficijent  $c_l$** 

| Područje<br>(vidi Slika 2.1) | Notacija |      |      |      |                  |
|------------------------------|----------|------|------|------|------------------|
|                              | 1AS      | 1A   | 1B   | 1C   | 1D               |
| Pramčani dio                 | 1        | 1    | 1    | 1    | 1                |
| Središnji dio                | 1        | 0.85 | 0.7  | 0.5  | nije primjenjivo |
| Krmeni dio                   | 0.75     | 0.65 | 0.45 | 0.25 | nije primjenjivo |

$c_a$  : koeficijent koji uzima u obzir vjerojatnost da će cijela duljina područja koji se razmatra biti pod tlakom istovremeno, i računa se prema formuli:

$$c_a = \frac{47 - 5 l_a}{44}, \quad (5.12)$$

koji nije manji od 0.6 ni veći od 1.0

$l_a$  : udaljenost, u m, definirana u tablici 5.10

**Tablica 5.10 Udaljenost  $l_a$** 

| Konstrukcija | Tip ukrepljivanja | $l_a$ , m               |
|--------------|-------------------|-------------------------|
| Oplata       | Poprečno          | razmak ukrepa = 0.8     |
|              | Uzdužno           | 2 x razmak ukrepa = 1.6 |
| Ukrepe       | Poprečno          | razmak ukrepa = 0.8     |
|              | Uzdužno           | raspon ukrepa = 3.64    |

$p_0$  : nominalni tlak leda, u N/mm<sup>2</sup>, uzima se da je jednak 5.6

### 5.1.5. Dimenzioniranje trupa

#### 5.1.5.1 Debljina oplata u području ojačanom zbog leda

Debljina uzdužno ukrepljene oplata ne smije biti manja od vrijednosti dobivene, u mm, prema slijedećoj formuli:

$$t = 667s \sqrt{\frac{p_{PL}}{F_2 R_{eH}}} + t_c \quad (5.13)$$

gdje je:

$p_{PL}$  : tlak leda koji djeluje na oplatu boka, u  $N/mm^2$ , i jednak je:

$$p_{PL} = 0.75p \quad (5.14)$$

$p$  : projektni tlak leda, u  $N/mm^2$ , definiran u 5.1.4.2

$F_1$  : koeficijent koji se računa prema slijedećoj formuli

$$F_1 = 1.3 - \frac{4.2}{\left[\frac{h}{s} + 1.8\right]^2}, \quad (5.15)$$

i ne smije biti veći od 1.0

$F_2$  : koeficijent koji se računa prema slijedećoj formuli

- za  $\frac{h}{s} \leq 1.0$ :

$$F_2 = 0.6 + 0.4 \frac{s}{h} \quad (5.16)$$

- za  $1.0 < \frac{h}{s} < 1.8$ :

$$F_2 = 1.4 - 0.4 \frac{h}{s} \quad (5.17)$$

$h$  : visina, u m, opterećenog područja definirana u 5.1.4.1

$t_c$  : dodatak na abraziju i koroziju, u mm, koji se uzima jednak 2 mm; gdje je primijenjen specijalni površinski premaz, koji se u praksi pokazao sposoban izdržati abraziju leda, može biti prihvaćena niža vrijednost.

### 5.1.5.2 Dimenzioniranje uzdužnjaka

Moment tromosti  $w$  u  $\text{cm}^3$  i poprečni presjek površine uzdužnjaka  $A_{Sh}$ , u  $\text{cm}^2$ , izračunati u 5.1.6 ne smiju biti manji od vrijednosti dobivenih prema slijedećim izrazima:

Moment tromosti uzdužnjaka, u  $\text{cm}^3$ :

$$z = \frac{F_3 F_4 p h l^2}{m_1 R_{eH}} 10^6 \quad (5.18)$$

Površina poprečnog presjeka uzdužnjaka, u  $\text{cm}^2$ :

$$A_{Sh} = \frac{\sqrt{3} F_3 p h l}{2 R_{eH}} 10^4 \quad (5.19)$$

gdje su:

$F_3$  : koeficijent kojim se uzima u obzir distribucija opterećenja na susjedne uzdužnjake, i računa se prema izrazu:

$$F_3 = \left( 1 - 0.2 \frac{h}{s} \right) \quad (5.20)$$

$h$  : visina, u m, opterećenog područja definirana u 5.1.4.1

$F_4$  : koeficijent kojim se uzima u obzir koncentracija opterećenja na mjestu oslonca, i uzima se da je jednak 0.6

$p$  : projektni tlak leda, u  $\text{N/mm}^2$ , definiran u 5.1.4.2

$s$  : razmak uzdužnjaka, u m.

Razmak ne smije prekoračiti vrijednosti dane u tablici 10.

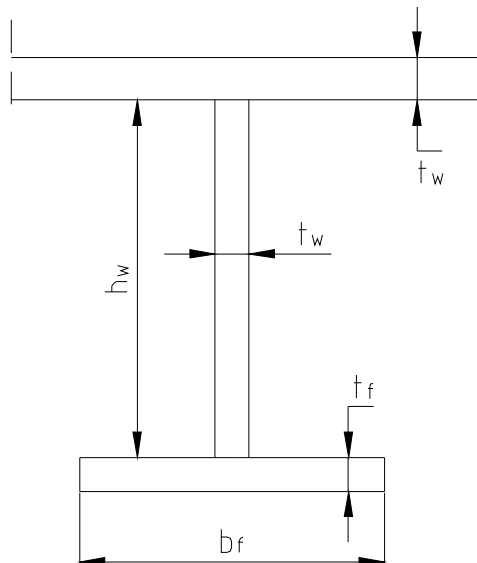
**Tablica 5.11 Vrijednosti razmaka uzdužnjaka  $s$**

| Notacija | $s$ [m] |
|----------|---------|
| 1AS      | 0.35    |
| 1A       | 0.35    |
| 1B       | 0.45    |
| 1C       | 0.45    |
| 1D       | 0.45    |

$m_1$  : koeficijent rubnih uvjeta standardne ukrepe, pri razmatranju neprekidne grede se uzima se da je jednak 13.3; tamo gdje se rubni uvjeti značajno razlikuju od onih kod neprekidne grede može se tražiti manji koeficijent rubnih uvjeta.

### 5.1.6. Izračun momenta tromosti i poprečnog presjeka površine uzdužnjaka

Geometrijske karakteristike uzdužnjaka prikazanog na slici 5.3 se mogu računati prema dolje navedenim formulama ( BV Pt B, Ch 4, Sec 3).



Slika 5.3 Dimenzije presjeka

Te formule su primjenjive ako vrijedi:

$$\begin{aligned} A_a &\geq t_f b_f \\ \frac{h_w}{t_p} &\geq 10 \\ \frac{h_w}{t_f} &\geq 10 \end{aligned} \quad (5.21)$$

gdje je:

- $A_a$  : neto površina presjeka pridružene oplata, u  $\text{mm}^2$
- $t_p$  : debljina lima pridružene oplata, u mm
- $h_w$  : debljina struka uzdužnjaka ,u mm
- $t_w$  : visina struka uzdužnjaka ,u mm
- $b_f$  : širina pojasa uzdužnjaka ,u mm
- $t_f$  : debljina pojasa uzdužnjaka ,u mm

Neto moment otpora uzdužnjaka s pridruženom oplatom se računa, u  $\text{cm}^3$  prema slijedećoj formuli:

$$w = \frac{h_w t_f b_f}{1000} + \frac{t_w h_w^2}{6000} \left( 1 + \frac{A_a - t_f b_f}{A_a + \frac{t_w h_w}{2}} \right). \quad (5.22)$$

Neto površina poprečnog presjeka uzdužnjaka s pridruženom oplatom se računa, u  $\text{cm}^2$  prema slijedećoj formuli:

$$A_{Sh} = \frac{h_w t_w}{1000}. \quad (5.23)$$

## **5.2. Dimenzioniranje konstrukcije u skladu s uputama klasifikacijskog društva American Bureau of Shipping**

### **5.2.1. Uvod**

Mjerenja opterećenja od leda izvršena na brodovima koji su plovili Baltikom pokazuju učestalo pojavljivanje opterećenja koja su nekoliko puta veća od projektnih opterećenja. Procijenjeno je kako bi uzimanjem u obzir tih velikih opterećenja projektiranje do granice popuštanja bilo neekonomično, te se stoga smatra prihvatljivim određeno prekoračenje nominalnog projektnog opterećenja. U nekim ekstremnim slučajevima pojaviti će se trajna plastična deformacija. Projekt uzdužnjaka se može provjeriti koristeći program koji može izvršiti nelinearnu strukturnu analizu metodom konačnih elemenata. Takvom analizom se može izračunati trajna deformacija i predvidjeti granična nosivost uzdužnjaka.

Prema Finnish-Swedish Ice Class Rules (FSICR) maksimalni razmak uzdužnjaka je 0.35 m za klase leda 1A SUPER i 1A, i 0.45 m za klase leda 1B i 1C. Također je predviđeno kako uzdužnjaci trebaju biti spojeni koljenima sa svim rebrima i pregradama.

Zahtjev koji se traži da maksimalan razmak uzdužnjaka prema klasama leda 1A SUPER i 1A ne prekorači 0.35 metra, i ni u kojem slučaju ne pređe 0.45 metra proizlazi iz činjenice kako je opterećenje leda koncentrirano uzduž uskog horizontalnog pojasa, uglavnom širokog 250 milimetara.

Kako bi se ograničile moguće katastrofalne posljedice kolapsa uzdužnjaka, u Pravilima postoji zahtjev za postavljanjem koljena između uzdužnjaka i okvirnih rebara. Koljena povećavaju graničnu nosivost uzdužnjaka smanjivanjem njihova raspona. Međutim, ugradnja tih koljena može dovesti do povećanih troškova proizvodnje, te je preporučeno koristiti nelinearnu analizu metodom konačnih elemenata (NMKE) kako bi se opravdala odluka izostavljanja takvih koljena radi optimiziranja projekta konstrukcije.

ABS je 2004. objavio Priručnik „Nonlinear Finite Element Analysis of Side Structures Subject to Ice Loads“ u kojem opisuje postupak projektiranja uzdužnjaka boka korištenjem NMKE.

U tom priručniku definira se postupak ojačanja za led konstrukcije boka korištenjem NMKE analize u što su uključeni uzdužnjaci dvoboka i oplata boka. U skladu s Ice Class Rules rezultati ovakvih analiza se mogu koristiti kao zamjena standardnim pravilima. Određeni projektni zahtjevi kao što su ograničenja razmaka uzdužnjaka, zahtjev spajanja koljenima s rebrima i pregradama, te debljina oplata boka mogu biti ublaženi.

Priručnik, također, u poglavlju 1 daje prilog 3 “Tentative Note for Application of Direct Calculation Methods for Longitudinally Framed Hull Structure“ koji je objavila The Finnish Maritime Administration (FMA) 30. lipnja 2003. kojim se opisuje alternativni postupak dimenzioniranja konstrukcije boka korištenjem NMKE analize.

Svrha tog priručnika je davanje izmijenjenih parametara za jednadžbu dimenzioniranja oplata i preporuka za proračun momenta tromosti i površine poprečnog presjeka uzdužnjaka kada je razmak uzdužnjaka veći od predviđenih vrijednosti. Osim toga, dane su preporuke za postupak direktnog proračuna ako su koljena izostavljena.

Težina konstrukcije izrađene prema pravilima može biti manja od težine konstrukcije s većim razmacima uzdužnjaka i/ili konstrukcije bez koljena na uzdužnjacima. Međutim, razlog primjene većeg razmaka uzdužnjaka i/ili izostavljanja koljena leži u nižim troškovima proizvodnje, to jest, manjem broju strukturnih dijelova koji trebaju biti zavareni na konstrukciju.

## 5.2.2. Postupak ojačanja za led konstrukcije boka korištenjem nelinearne analize metodom konačnih elemenata

### 5.2.2.1 Projektiranje konstrukcije boka broda

Postupak uključuje četiri koraka za alternativni projekt konstrukcije boka opterećene ledom koje su dane u tablici 5.12.

**Tablica 5.12 Koraci ojačavanja za led konstrukcije boka**

| Korak | Projekt                                 | Opis                                                                                             |
|-------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | FSICR projekt, temeljni projekt         | Projekt je u potpunosti usuglašen sa FSICR (razmak uzdužnjaka manji od 450 mm)                   |
| 2     | FMA privremeni projekt                  | Projekt je u usuglašen sa Priručnikom FMA (razmak uzdužnjaka je veći od onog određenog FSICR-om) |
| 3     | Alternativni projekt za uzdužnjake boka | Uzdužnjaci boka bez koljena su određeni korištenjem NMKE analize                                 |
| 4     | Alternativni projekt za oplatu boka     | Debljina oplata boka je određena korištenjem NMKE analize za ekstremna opterećenja leda          |

#### 1. korak: FSICR projekt

Inicijalni projekt konstrukcije boka bi trebao biti potpuno usuglašen sa FSICR-om koji zahtijeva minimalni razmak uzdužnjaka koji neće prekoračiti 0.35 metra prema klasama za led 1A SUPER i 1A, i ni u kojem slučaju neće prekoračiti 0.45 metra. Zahtijevana su koljena koja povezuju uzdužnjake i rebra. Postupak je opisan u poglavlju 5.1.

#### 2. korak: FMA privremeni projekt

FMA privremeni projekt koristi Priručnik FMA za projektiranje konstrukcije boka s razmacima uzdužnjaka 800 mm. Tlak leda je veći od onog prema FSICR-u. Potrebna su koljena za povezivanje uzdužnjaka s rebrima.

Debljina oplata boka je proračunata, u mm, prema Priručniku FMA po jednadžbi:

$$t = 667s \sqrt{\frac{p_{PL}}{f_2 R_{eH}}} + t_C ,$$

gdje je  $p_{PL}$  tlak leda koji djeluje na oplatu boka. Detalji jednadžbe su dani u poglavlju 5.1.5.1.

### **3. korak: Alternativni projekt za uzdužnjake boka**

Kako bi se osigurala usklađenosti kod iznosa trajnih deformacija uzdužnjaka boka, alternativne konstrukcije trebaju pratiti Priručnik FMA. Nelinearna MKE analiza se može primijeniti za procjenu te usklađenosti. Modeliranje konstrukcije treba slijediti postupak ABS Guidance Notes-a.

Trajna deformacija uzdužnjaka boka se provjerava kriterijima prihvatljivosti. Detalji ovog koraka koji uključuju MKE modeliranje, primijenjeno opterećenje i kriterije prihvatljivosti su navedeni dalje u tekstu.

#### **MKE modeliranje**

Postupak MKE modeliranja, rubni uvjeti, MKE rješenja te uvjeti konvergencije opisani su u daljnjem tekstu.

#### **Nelinearni FE Model**

##### **Idealizacija konstrukcije**

Kako bi se napravio trodimenzionalni model koji se može analizirati u razumnom roku, razmatra se samo dio konstrukcije boka. Taj dio mora biti dovoljno velik da se rubni uvjeti mogu smatrati dovoljno udaljeni od opterećenog područja koji se promatra.

Budući da se proučava ponašanje vanjske oplata u području utjecaja leda, nije potrebno modelirati cijeli brod kao nelinearni model konačnih elemenata, već je dovoljno uzeti jedan dio iz tog opterećenog područja. Međutim, kako bi trodimenzionalni model konstrukcije valjano predstavljao ponašanje bočne konstrukcije opterećene ledom, treba imati određeni raspon u uzdužnom, vertikalnom i poprečnom smjeru.

U uzdužnom smjeru model mora obuhvaćati minimalno tri okvirna rebra s dodatnim dijelom u iznosu polovine razmaka okvirnih rebara i to na prednjoj i stražnjoj strani.

Vertikalni raspon modela je u principu između dvije bočne proveze koje uključuju područje pojasa leda. Uglavnom, pojas leda djeluje na području jednog uzdužnjaka koji se nalazi na sredini razmaka proveza. Model bi trebao sadržavati barem jedan trodimenzionalan uzdužnjak ispod i poviše uzdužnjaka koji nas zanima.

U poprečnom smjeru model se rasprostire do, i uključuje unutrašnju oplatu dvoboka.

Konstrukcija koja se modelira sadrži:

- vanjsku oplatu boka s pripadajućim uzdužnjacima,
- okvirna rebra s poprečnim ukrepama i koljenima (ako postoje),
- unutrašnju oplatu dvoboka s pripadajućim uzdužnjacima.

## MKE elementi

Dvodimenzionalni pločasti konačni elementi (s uključenim savijanjem) se uglavnom koriste pri modeliranju vanjske i unutrašnje oplata, okvirnih rebara i struka i pojasa uzdužnjaka unutar pojasa opterećenja leda.

Gredni elementi se mogu koristiti za uzdužnjake izvan pojasa opterećenja leda.

Pojasevi uzdužnjaka unutar područja opterećenja leda se mogu modelirati koristeći ili elemente oplata ili gredne elemente.

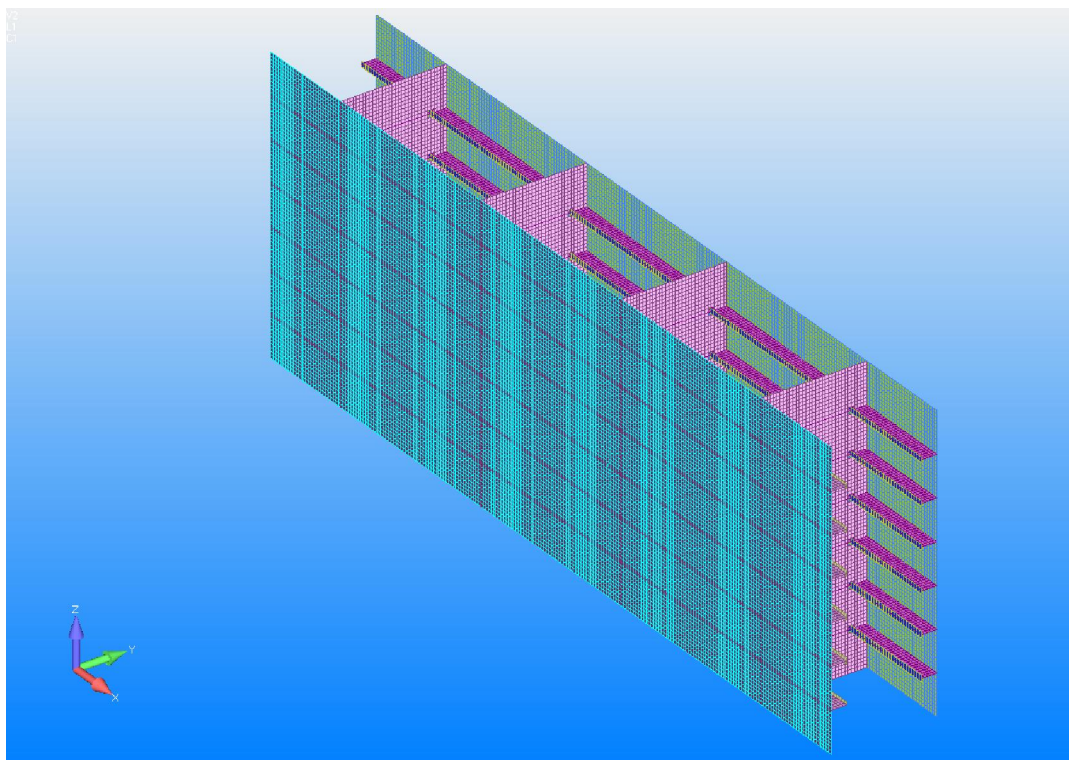
Prilikom izrade modela prikazanog na slici 5.4 koristili su se samo pločasti elementi.

Veličina konačnih elemenata se odabire tako da modelirana konstrukcija vjerodostojno predstavlja nelinearno ponašanje konstrukcije. Područja u kojima se očekuju povećana razina naprezanja ili veće deformacije potrebno je modelirati finijom mrežom.

Poželjno je koristiti pravokutne elemente s omjerom stranica manjim od 3 prema 1. Struk uzdužnjaka treba biti podijeljen s najmanje tri reda elemenata. Pojas uzdužnjaka može biti modeliran jednim pločastim elementom ili grednim elementom.

Vanjska i unutrašnja oplata, te okvirna rebra se mogu podijeliti u elemente koji su jednake veličine kao i elementi struka uzdužnjaka. Struktura koja je udaljenija od pojasa opterećenja leda može se modelirati grubljom mrežom.

Pri modeliranju koljena, mreža bi trebala biti finija, te bi trebala imati bar tri elementa u području gdje se spajaju koljena s pojasom uzdužnjaka. Također se ne preporučuje upotreba četverokutnih elemenata tako da dotiču rub koljena sa samo jednom točkom.



**Slika 5.4 Model konstrukcije boka broda napravljen u programu Femap s Nastranom**

### Definiranje materijala modela

Materijal modela ima nelinearnu karakteristiku koja je rezultat nelinearnog odnosa između naprezanja i deformacije nakon što se prođe granica elastičnosti (vidi sliku 5.5). Ponašanje materijala preko granice tečenja je u pravilu karakterizirano nagibom krivulje naprezanja-deformacije što označava stupanj očvršćivanja i prikazano je na slici 5.5 isprekidanom linijom "model: linearno očvršćivanje".

U uputama ABS-a se propisuje upotreba elastično – idealno plastičnog modela materijala za brodograđevni čelik koji ne uzima u obzir efekte očvršćivanja materijala čija karakteristika je prikazana na slici 5.5 isprekidanom linijom "model: idealno plastičan". To pojednostavljenje omogućava učinkovitije izračune za slučajeve koji uključuju ograničeno popuštanje u malom području i, u odnosu na modele materijala koji uračunavaju linearno očvršćivanje, daje rezultate na strani sigurnosti.

Uglavnom je u projektima ojačanja za led dopušteno blago prekoračenje kapaciteta materijala iznad točke popuštanja, što je otprilike označeno krugom na slici 5.5.

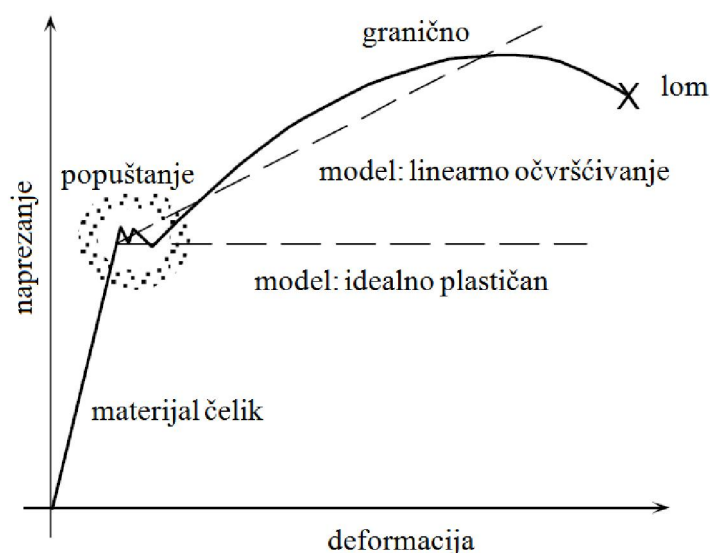
Za modeliranje brodograđevnog čelika koriste se elastično – idealno plastični materijali sljedećih karakteristika:

Youngov modul elastičnosti  $E = 206000 \text{ MPa}$

Poissonov koeficijent  $\nu = 0.3$

**Tablica 5.13 Granica razvlačenja brodograđevnog čelika**

| Brodograđevni čelik    | Granica razvlačenja<br>$R_{eH} \text{ [N/mm}^2\text{]}$ |
|------------------------|---------------------------------------------------------|
| meki čelik A           | 235                                                     |
| povišene čvrstoće AH32 | 315                                                     |
| povišene čvrstoće AH36 | 355                                                     |



**Slika 5.5 Krivulja naprezanje-deformacija čelika (puna linija) i modeli materijala (isprekidana linija)**

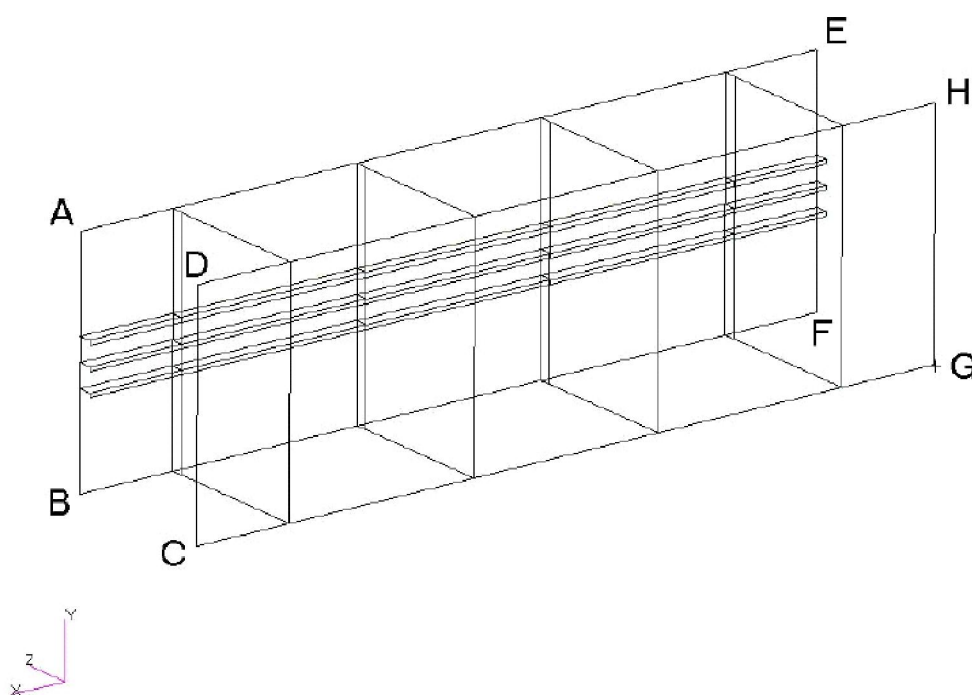
### Definiranje rubnih uvjeta

Rubni uvjeti sprečavaju pomake modela u prostoru kao krutog tijela dopuštajući istovremeno savijanje uzdužnjaka koje bi se dogodilo kao i kad bi cijela konstrukcija bila modelirana.

Slika 5.6 i tablica 5.14 pokazuju preporučene rubne uvjete.

Gornja i donja ravnina (ADHE i BCGF) predstavljaju rubove kojima se sprečavaju pomaci u svim smjerovima, ali je omogućena rotacija oko uzdužne osi. Na taj se način oponaša krutost uzdužnih proveza koje omeđuju model.

Prednja i stražnja ravnina (ABCD i EFGH) predstavljaju rubove koji imaju simetrične uvjete s obzirom na ravninu koja je okomita na uzdužni smjer broda, što predstavlja neprekidnost konstrukcije u uzdužnom smjeru broda.



Slika 5.6 Definiranje rubnih uvjeta

Tablica 5.14 Rubni uvjeti za model

| Rubni uvjeti na granicama modela | Ravnine ADHE i BCGF (gornji i donji kraj) | Ravnine ABCD i EFGH (prednji i stražnji kraj) |
|----------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Pomak u smjeru osi x             | spriječen                                 | spriječen                                     |
| Pomak u smjeru osi y             | spriječen                                 | /                                             |
| Pomak u smjeru osi z             | spriječen                                 | /                                             |
| Rotacija oko osi x               | /                                         | /                                             |
| Rotacija oko osi y               | spriječen                                 | spriječen                                     |
| Rotacija oko osi z               | spriječen                                 | spriječen                                     |

### Linijsko opterećenje na uzdužnjake boka

U svrhu projektiranja uzdužnjaka boka i njegovih veza s okvirnim rebrom opterećenje leda se predstavlja kao linijsko opterećenje koje djeluje na uzdužnjak boka koji je unutar pojasa leda.

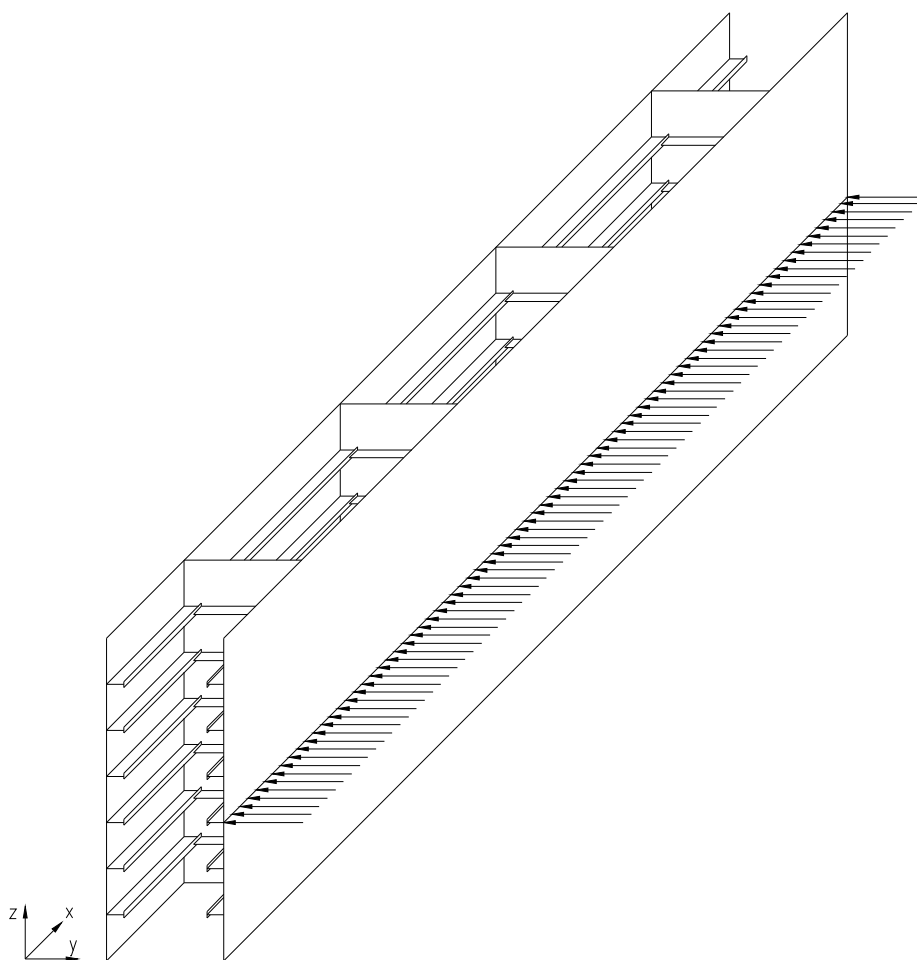
Ekstremni tlak leda  $p_{\max}$ , u  $\text{N/mm}^2$ , koji se primjenjuje na model se računa prema sljedećoj formuli:

$$p_{\max} = 3.37 c_d c_1 p_0 (1.059 - 0.175 L), \quad (5.24)$$

gdje je izračun vrijednosti  $c_d$ ,  $c_1$  i  $p_0$  dan u poglavlju 5.1.4.2, a  $L$  je raspon uzdužnjaka.

Linijsko opterećenje  $Q$ , u  $\text{N/mm}$ , je maksimalni tlak leda pomnožen sa visinom opterećenja  $h$  (vidi tablicu 5.7) koje se primjenjuje na uzdužnjak oplata boka i to duž cijele duljine modela:

$$Q = p_{\max} \cdot h \quad (5.25)$$



Slika 5.7 Linijsko opterećenje na uzdužnjak boka

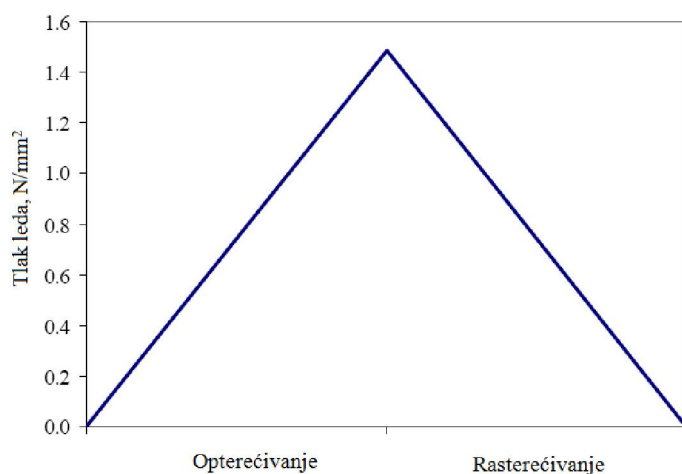
## MKE rješenje

### Inkrementalno rješenje

Nelinearna analiza koristi nelinearnu statičku analizu s postupnim povećavanjem opterećenja. Temeljni pristup u nelinearnoj analizi je postupno dodavanje opterećenja do primijenjenog opterećenja. U svakom koraku (inkrementu) odvija se iterativni postupak dok rješenje ne konvergira opterećenju tog koraka. Stoga bi korak povećanja trebao biti dovoljno malen kako bi se osigurao točnost predviđanja u malom broju iteracija. Unutar svakog koraka opterećenja je ponekad potreban niz pod-iteracija kako bi se postigla uravnoteženost konvergencija sa trenutnim korakom opterećenja. Na kraju svakog inkrementalnog koraka, deformacija bilo kojeg dijela konstrukcije se može prikazati kao funkcija razine opterećenja.

Kao rezultat analize NMKE se najčešće se traže maksimalne postignute deformacije, kao i trajne deformacije na konstrukciji nakon procesa rasterećenja.

Opterećivanje i rasterećivanje modela je shematski prikazano na slici 5.8 za slučaj linijskog opterećenja na uzdužnjak boka. Za površinsko opterećenje oplata boka vrijedi sličan dijagram.



Slika 5.8 Promjenjivost linijskog opterećenja

### Konvergencija

Ispitivanje konvergencije u svakom koraku je bitan faktor koji utječe na točnost i opću učinkovitost u nelinearnoj analizi. Kako bi se osigurala točnost i dosljedna konvergencija, mnogostruki kriteriji s mjerenjem greški u pogledu pomaka, opterećenja i energije bi se trebali kombinirati. Test konvergencije se obavlja pri svakom koraku opterećenja. Kad je konvergencija postignuta, prelazi se na sljedeći korak.

Iako nema univerzalno prihvaćenih kriterija, neki kriteriji tolerancije su predloženi za kontrolu grešaka izračuna na svakom koraku opterećenja. Cilj kriterija tolerancije je dosljedno osiguravanje dovoljno točnih rješenja u širokom spektru problema bez većeg smanjivanja učinkovitosti izračuna.

Slijedeće tolerancije su predložene za nelinearnu analizu koja se obavlja u ovom radu:

Tolerancija greške za pomak je manja od  $10^{-3}$ .

Tolerancija greške za opterećenje je manja od  $10^{-3}$ .

Tolerancija greške za energiju/rad je manja od  $10^{-3}$ .

Korak opterećenja bi se trebao konvergirati kada se zadovolje sva tri kriterija tolerancije.

Ako rješenje ne konvergira, preporučuje se povećanje broja koraka opterećenja.

### **Kriteriji prihvatljivosti**

FMA preporučuje "...modeliranje konstrukcije oplata i prema zahtjevima pravila s koljenima i za predloženu konstrukciju bez koljena. Ako su plastične deformacije za predloženu konstrukciju jednake ili manje od one prema pravilima, dimenzije predložene konstrukcije se mogu smatrati prihvatljivima."

Predložen projekt bez koljena se uspoređuje s FMA privremenim projektom. Postupci metode konačnih elemenata opisani u uputama ABS-a se trebaju koristiti za izvedbu analiza projekata s koljenima i bez. FSICR inicijalni projekt i FMA privremeni projekt se mogu koristiti kao referentna točka za ovu usporedbu.

#### 4.korak Alternativni projekt za oplatu boka

Alternativni projekt za debljinu oplata boka se također može prihvatiti, ako je dobivena trajna deformacija oplata izložene ekstremnima opterećenjima leda u prihvatljivom rasponu. Nelinearna MKE analiza se provodi za izračun trajne deformacije oplata boka. Uzdužnjak boka je jednak FMA alternativnom projektu kao u koraku 3. Trajna deformacija oplata boka se treba kontrolirati prema kriterijima prihvatljivosti danim dalje u tekstu kao bi se odredila razumna debljina oplata.

#### MKE modeliranje

KE model je isti kao i FMA alternativni projekt u 3. koraku, te prati iste zahtjeve s jednakim uzdužnjacima boka. Debljina oplata boka se može smanjiti temeljem zahtjeva za debljinu proračunatih iz FMA Guidelines u 3. koraku. Rubni uvjeti i uvjeti konvergencije su jednaki onima u 3. koraku.

#### Površinsko opterećenje na oplati boka

Oplata boka je podvrgnuta površinskom opterećenju koje je određeno umnoškom:

$$F = p h l, \quad (5.26)$$

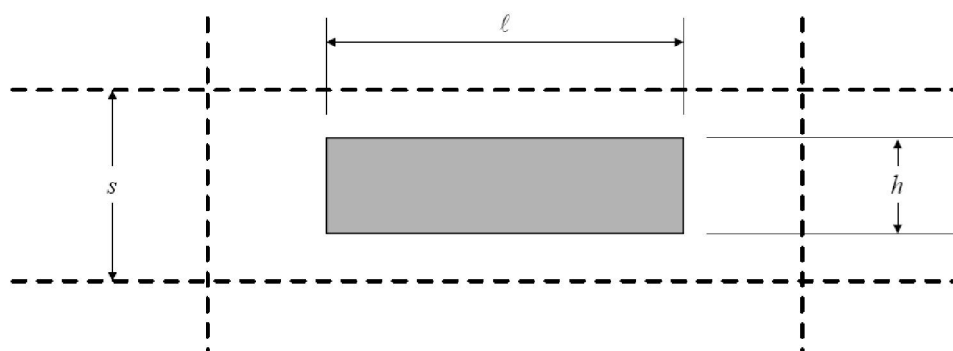
gdje je:

$p$  : ekstremni tlak leda na oplatu, u N/mm, koji je triput veći od projektnog tlaka definiranog u 5.1.4.2 i jednak je:

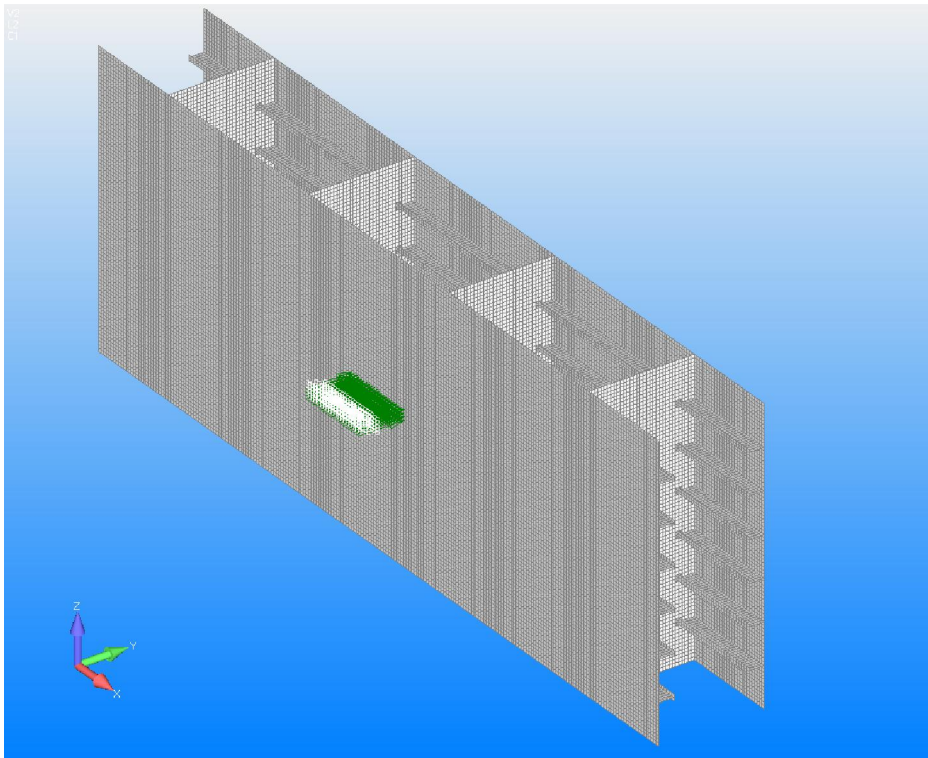
$$p = 3 c_d c_1 c_a p_0 \quad (5.27)$$

$h$  : visina opterećenja, u m, je definirana prema FSICR-u i vrijednosti su dane u tablici 5.7.

$l$  : duljina opterećenja, u m, je jednaka dvostrukom razmaku uzdužnjaka.



Slika 5.9 Dimenzije površine na kojoj djeluje opterećenje na oplati boka



**Slika 5.10 Površinsko opterećenje na oplati boka**

### **Kriteriji prihvatljivosti**

Trajna deformacija na oplati boka između uzdužnjaka je dozvoljena do 2% vrijednosti razmaka uzdužnjaka. Međutim, u nijednom slučaju debljina, prije nego što je uzet u obzir dodatak za abraziju/koroziju, ne smije biti manja od 90% od trenutnih zahtjeva FMA.

(Korak 2)

### **Abrazija/korozija**

Dodatak za abraziju/koroziju od 2 mm mora biti dodan na bočnu oplatu osim ako nije neki posebni tretman primijenjen na površinu trupa. Taj dodatak na abraziju/koroziju se treba dodati debljini po proračunu.

### 5.2.3. Projektiranje konstrukcije boka prema The Finnish Maritime Administration, “Tentative Note for Application of Direct Calculation Methods for Longitudinally Framed Hull Structure“

#### 5.2.3.1 Maksimalni razmak uzdužnjaka

Zahtjev koji traži kako maksimalan razmak uzdužnjaka  $s$  za klase leda 1AS i 1A ne prekoračuju 0.35 metra, te za ostale klase leda ne prekoračuju 0.45 metra proizlazi iz činjenice kako je opterećenje leda koncentrirano uzduž uskog horizontalnog pojasa. Ta koncentracija opterećenja od leda je uzeta u obzir s faktorom  $F_2$  u pravilima za debljinu oplata (vidi poglavlje 5.1.5.1) i faktorom  $F_3$  za moment tromosti i površinu poprečnog presjeka uzdužnjaka (vidi poglavlje 5.1.5.2). Ti faktori su funkcija omjera visine opterećenja i razmaka uzdužnjaka.

U pojedinim slučajevima moguće je imati veće razmake uzdužnjaka od onih koja Pravila predviđaju ako se primjenjuju slijedeći izrazi vezani za proračun debljine oplata i momenta tromosti uzdužnjaka.

#### 5.2.3.2 Debljina oplata

Debljina oplata boka se računa, u mm, po jednadžbi danoj u poglavlju 5.1.5.1:

$$t = 667s \sqrt{\frac{p_{PL}}{f_2 R_{eH}}} + t_C$$

gdje je:

$R_{eH}$  : granica razvlačenja brodograđevnog čelika, u  $\text{N/mm}^2$ , dana u tablici 5.13

$p_{PL}$  : tlak leda koji djeluje na oplatu boka i jednak je

$$p_{PL} = 0.75 p,$$

$p$  : projektni tlak koji se računa prema izrazu

$$p = c_d c_1 c_a p_0$$

$c_a$  : vrijednosti koeficijenta dane u tablici 5.15.

**Tablica 5.15 Vrijednosti koeficijenta  $c_a$**

| Notacija | $c_a$ |
|----------|-------|
| 1AS      | 1.0   |
| 1A       | 1.0   |
| 1B       | 0.97  |
| 1C       | 0.97  |

Vrijednosti koeficijenta  $c_d$ ,  $c_1$  i  $p_0$  su definirani u poglavlju 5.1.4.2.

### 5.2.3.3 Moment tromosti i površina poprečnog presjeka uzdužnjaka

Moment tromosti uzdužnjaka i površina poprečnog presjeka uzdužnjaka se računaju prema formulama danim u poglavlju 5.1.5.2.

Moment tromosti uzdužnjaka, u  $\text{cm}^3$  :

$$z = \frac{F_3 F_4 p h l^2}{m_1 R_{eH}} 10^6$$

Površina poprečnog presjeka uzdužnjaka, u  $\text{cm}^2$  :

$$A_{Sh} = \frac{\sqrt{3} F_3 p h l}{2 R_{eH}} 10^4$$

Međutim, u tim formulama vrijednost koeficijenta  $F_3$  se računa koristeći stvarni omjer  $h/s$ .

Prilikom računanja momenta tromosti uzdužnjaka, ako se uzima veći razmak uzdužnjaka od onog predviđenog po Pravilima, sunosiva širina pojasa se uzima 0.15  $l$  gdje je  $l$  raspon uzdužnjaka.

Debljina struka uzdužnjaka treba biti najmanje polovica debljine oplata i barem 9 mm. Ako se koristi manja debljina od one predviđene Pravilima, trebalo bi se napraviti ispitivanje granične čvrstoće struka uzdužnjaka na savijanje koristeći opterećenje dano u sljedećem paragrafu. Analiza bi se trebala napraviti korištenjem MKE programa sposobnog za nelinearnu analizu.

### 5.2.3.4 Koljena na spoju uzdužnjaka i okvirnih rebara

Opterećenje leda uzeto u proračunu dimenzija prema Pravilima za led je  $F = p h l$ , gdje je  $p$  tlak leda izračunat u ovisnosti o formi broda, istisnini i snazi (vidi poglavlje 5.1.4.2). Klasa leda daje visinu opterećenja  $h$ , a duljina opterećenja  $l$  je jednaka rasponu uzdužnjaka.

U Uputama ABS-a je predloženo da se koljena na uzdužnjacima mogu izostaviti ako je projekt uzdužnjaka napravljen prema kontroli projekta napravljenom korištenjem NMKE. U takvoj kontroli projekta, trebala bi se izračunati granična nosivost uzdužnjaka. Pogotovo bi se trebao istražiti prijenos opterećenja na okvirna rebra i moguće izvijanje i triping uzdužnjaka.

Opterećenje koje se primjenjuje (umjesto  $p$  definiranog u poglavlju 5.1.4.2) je :

$$p_{\max} = 3.37 c_d c_1 p_0 (1.059 - 0.175L)$$

Gdje je maksimalna vrijednost izraza u zagradi 1.

Preporučuje se modeliranje konstrukcije po pravilima s koljenima i s predloženom konstrukcijom bez koljena.

Ako su plastične deformacije za predloženu konstrukciju jednake ili manje od onih po pravilima, dimenzije predložene konstrukcije se mogu smatrati prihvatljivima.

## 6. REZULTATI ANALIZE

U postupku prilagođavanja konstrukcije oplata tankera za naftu za plovidbu kroz zaleđeno more, potrebna snaga stroja, tlak leda koji djeluje na oplatu boka i dimenzije konstrukcijskih elemenata su se odredile za klase leda 1C, 1B, 1A i 1AS prema pravilima opisanim u poglavljima 5.1 i 5.2.

### 6.1. Rezultati FSICR projekta

U prvom koraku analize projekt je u potpunosti usuglašen sa FSICR-om gdje se za razmak uzdužnjaka uzima 0.43 m za klase leda 1C i 1B, te 0.35 m za klase leda 1A i 1AS.

U Tablica 6.1, u ovisnosti o klasama leda, dane su izračunate vrijednosti otpora broda prilikom plovidbe kanalom, minimalne potrebne snage stroja i tlaka leda koji djeluje na oplatu boka.

U Tablica 6.2 dane su izračunate karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka.

**Tablica 6.1 Vrijednosti otpora broda, minimalne potrebne snage stroja i tlaka leda koji djeluje na oplatu broda u ovisnosti o klasama leda**

| Notacija | $h$ , m | $R_{CH}$ , kN | $P$ , kW | $p$ , N/mm <sup>2</sup> |
|----------|---------|---------------|----------|-------------------------|
| 1AS      | 0.35    | 2212.09       | 31350.90 | 1.52                    |
| 1A       | 0.30    | 1757.11       | 22194.49 | 1.23                    |
| 1B       | 0.25    | 1387.97       | 15581.71 | 0.97                    |
| 1C       | 0.22    | 1036.92       | 10061.57 | 0.66                    |

**Tablica 6.2 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka određene prema FSICR projektu**

| Notacija | Oplata   |           | Uzdužnjak       |           |                       |                            |                       |                            |
|----------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
|          | Debljina | Materijal | Dimenzije       | Materijal | Prema (1.1.5.3)       |                            | Prema (1.1.5.2)       |                            |
|          | $t$ , mm | čelik     | T profil        | čelik     | $w$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> | $z$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> |
| 1AS      | 18.28    | A         | 300x15 + 120x15 | AH 32     | 915.49                | 45.0                       | 809.30                | 42.88                      |
| 1A       | 16.17    | A         | 300x12 + 120x15 | AH 32     | 839.02                | 36.0                       | 580.49                | 30.75                      |
| 1B       | 16.05    | A         | 300x12 + 120x15 | A         | 840.12                | 36.0                       | 544.06                | 28.82                      |
| 1C       | 13.19    | A         | 300x12 + 120x15 | A         | 828.00                | 36.0                       | 330.86                | 17.53                      |

## 6.2. Rezultati FMA privremenog projekta

U drugom koraku analize, čiji je postupak objašnjen u poglavlju 5.2, se koristi Priručnik FMA za projektiranje konstrukcije boka s razmacima uzdužnjaka 0.8 m. Potrebna su koljena za povezivanje uzdužnjaka s rebrima. Izračunati tlak leda je veći od onog prema FSICR-u i dan je u tablici 6.3.

**Tablica 6.3 Vrijednosti tlaka izračunatog prema FMA privremenom projektu**

| Notacija | $h$ , m | $p$ , N/mm <sup>2</sup> |
|----------|---------|-------------------------|
| 1AS      | 0.35    | 2.33                    |
| 1A       | 0.30    | 1.88                    |
| 1B       | 0.25    | 1.43                    |
| 1C       | 0.22    | 0.98                    |

## 6.3. Rezultati alternativnog projekta za uzdužnjake boka

Konstrukcija boka broda je modelirana kompjuterskim programom Femap s NX Nastranom prema postupku opisanom u trećem koraku poglavlja 5.2.

Direktnim proračunom, primjenom nelinearne metode konačnih elemenata, određene su maksimalne i trajne deformacije uzdužnjaka oplata koje uzrokuje ekstremno opterećenje leda. Ekstremno opterećenje leda se predstavlja kao linijsko opterećenje  $Q$  koje se primjenjuje na uzdužnjak oplata boka koji se nalazi unutar pojasa leda, te se računa kao umnožak maksimalnog tlak leda  $p_{\max}$  i visine opterećenja  $h$  čije su vrijednosti u ovisnosti o klasi leda dane u tablici 6.4.

**Tablica 6.4 Vrijednosti maksimalnog tlaka leda i linijskog opterećenja izračunati alternativnim projektom za uzdužnjake boka**

| Notacija | $h$ , m | $p_{\max}$ , N/mm <sup>2</sup> | $Q$ , N/mm |
|----------|---------|--------------------------------|------------|
| 1AS      | 0.35    | 3.31                           | 1.16       |
| 1A       | 0.30    | 2.67                           | 0.80       |
| 1B       | 0.25    | 2.10                           | 0.53       |
| 1C       | 0.22    | 1.43                           | 0.31       |

Osnovni model predstavlja postojeću konstrukciju naftnog tankera i njegove karakteristike su dane u tablici 5.2.

Osnovni model je analiziran za klase leda 1C i 1B, te su nazivi tih modela "1C" i "1B".

Za svaku klasu leda su napravljene tri varijacije osnovnog modela konstrukcije boka.

Prva varijacija je u skladu s Priručnikom FMA, koji je opisan u 2. koraku u poglavlju 5.2, gdje je razmak uzdužnjaka veći od onog određenog FSICR-om i jednak je 0.8 m. Ta verzija ima koljena na mjestima spajanja uzdužnjaka vanjske oplata s ukrepama okvirnog rebra.

Nazivi tih modela imaju u imenu oznaku odgovarajuće klase leda i u nastavku riječ "koljena" (na primjer "1C\_koljena", "1B\_koljena"...)

Druga varijacija je modificirana prva gdje je jedina razlika to što su uzdužnjaci boka bez koljena. Na istom principu kao i nazivi modela prve varijacije, nazivi modela druge varijacije imaju u imenu oznaku odgovarajuće klase leda i u nastavku "ABS" (na primjer "1C\_ABS", "1B\_ABS"...)

Treća varijacija je ojačana druga varijacija, gdje se za vanjsku oplatu boka broda i pripadajuće uzdužnjake koristi veća klasa čelika povišene čvrstoće. Nazivi tih modela su "1C\_ojačan", "1B\_ojačan" i "1A\_ojačan".

Karakteristike modificiranih modela, u zavisnosti o određenoj klasi leda, dane su u tablicama 6.5 do 6.8.

Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za određene varijacije modela, kao i za osnovni model, u zavisnosti o određenoj klasi leda, su dane na slikama 6.1 do 6.5. Na slici 6.6 je dan zajednički prikaz krivulja opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata varijacija modela za klase 1C, 1B i 1A.

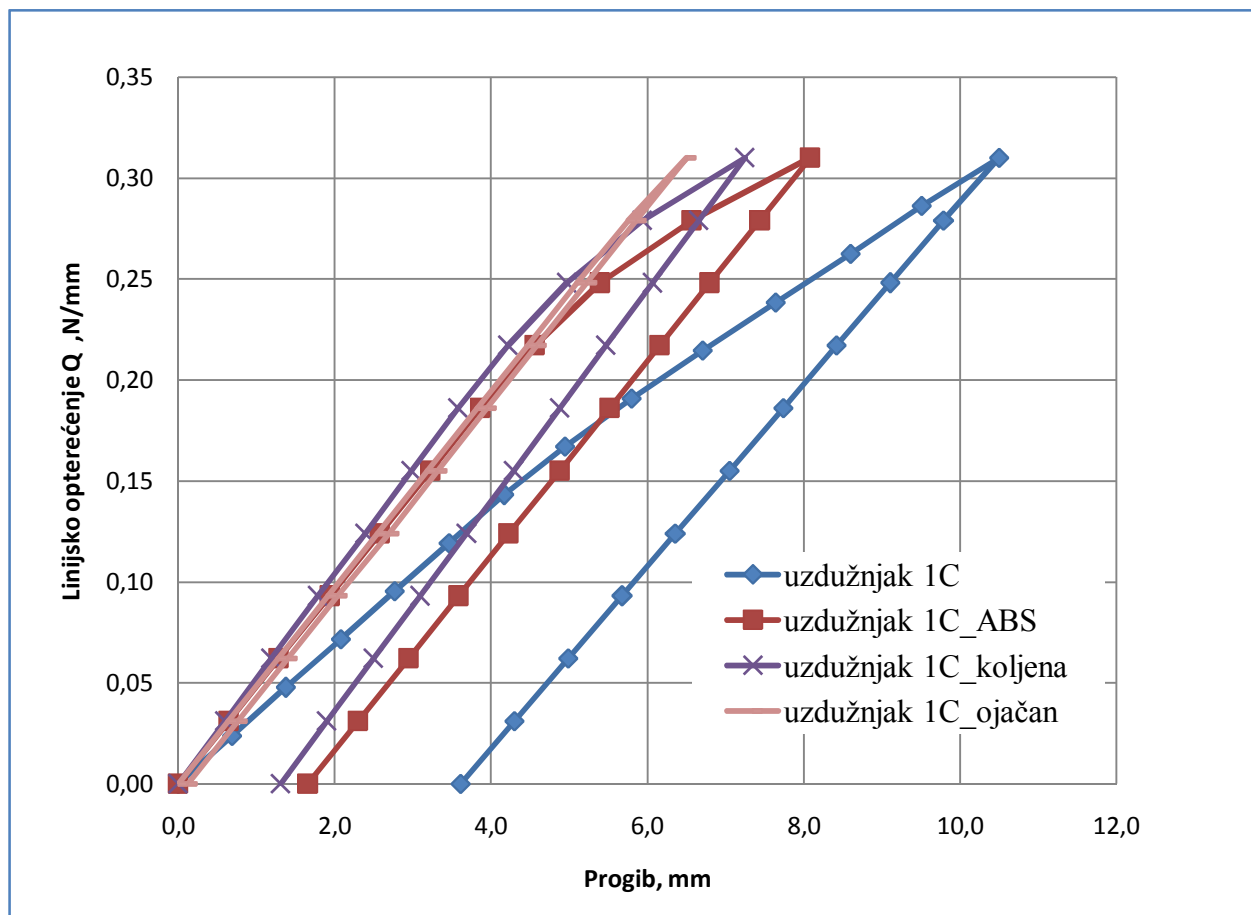
Iz krivulja opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata, mogu se očitati maksimalne postignute deformacije, kao i trajne deformacije na konstrukciji nakon procesa rasterećenja.

Iz slika se može primijetiti da su maksimalni progibi i trajne deformacije ojačanih modela manji od modela s koljenima, tj onih koji su u skladu s Priručnikom FMA, te je stoga alternativni projekt prihvatljiv.

Na slikama 6.7 do 6.10 prikazana su Von Misesova naprezanja na deformiranom osnovnom modelu "1C" i modelu "1C\_koljena". U prilogu II su dane su slike za ostale modele.

**Tablica 6.5 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1C**

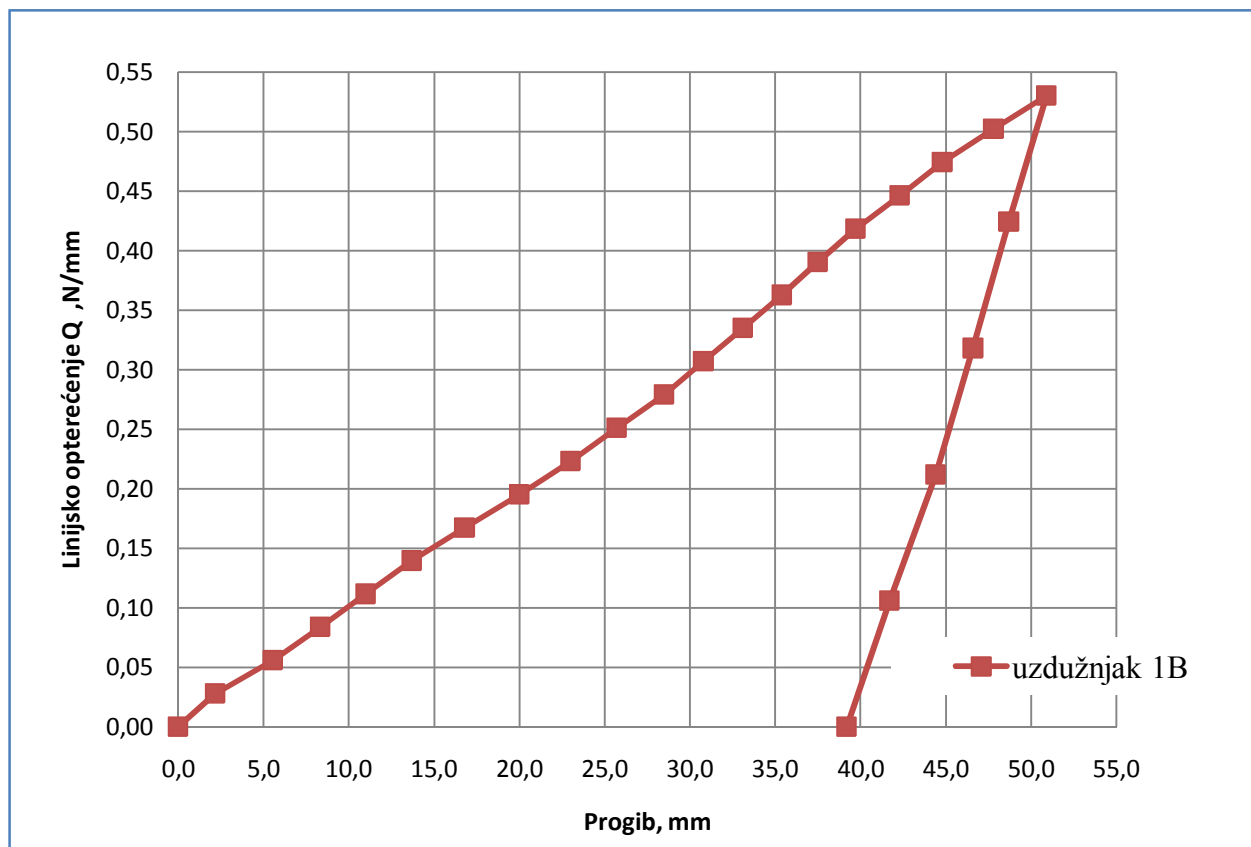
| Modeli     | Oplata   |           | Uzdužnjak       |           |                       |                            |                       |                            |
|------------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
|            | Debljina | Materijal | Dimenzije       | Materijal | Prema (1.1.5.3)       |                            | Prema (1.1.5.2)       |                            |
|            | $t$ , mm | čelik     | T profil        | čelik     | $w$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> | $z$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> |
| 1C_koljena | 23.0     | A         | 300x12 + 120x15 | A         | 854.48                | 36.0                       | 516.17                | 27.22                      |
| 1C_ABS     | 23.0     | A         | 300x12 + 120x15 | A         | 854.48                | 36.0                       | 516.17                | 27.22                      |
| 1C_ojačan  | 20.0     | AH 32     | 300x12 + 120x15 | AH 32     | 848.94                | 36.0                       | 385.08                | 20.31                      |



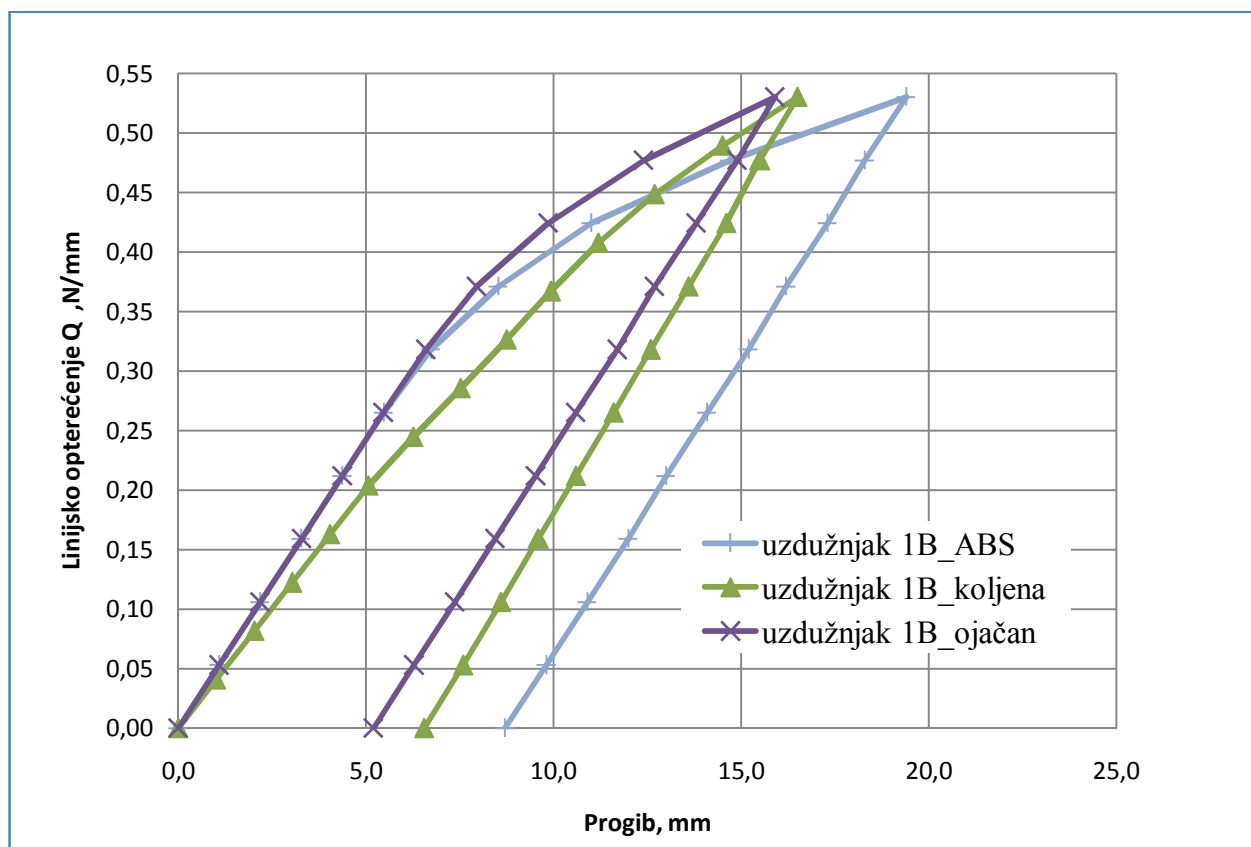
**Slika 6.1 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1C**

**Tablica 6.6 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1B**

| Modeli     | Oplata   |           | Uzdužnjak       |           |                       |                            |                       |                            |
|------------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
|            | Debljina | Materijal | Dimenzije       | Materijal | Prema (1.1.5.3)       |                            | Prema (1.1.5.2)       |                            |
|            | $t$ , mm | čelik     | T profil        | čelik     | $w$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> | $z$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> |
| 1B_koljena | 23.5     | AH 36     | 300x12 + 120x15 | AH 32     | 855.59                | 36.0                       | 638.10                | 33.65                      |
| 1B_ABS     | 23.5     | AH 36     | 300x12 + 120x15 | AH 32     | 855.59                | 36.0                       | 638.10                | 33.65                      |
| 1B_ojačan  | 23.5     | AH 36     | 300x12 + 120x15 | AH 36     | 855.59                | 36.0                       | 566.20                | 29.86                      |



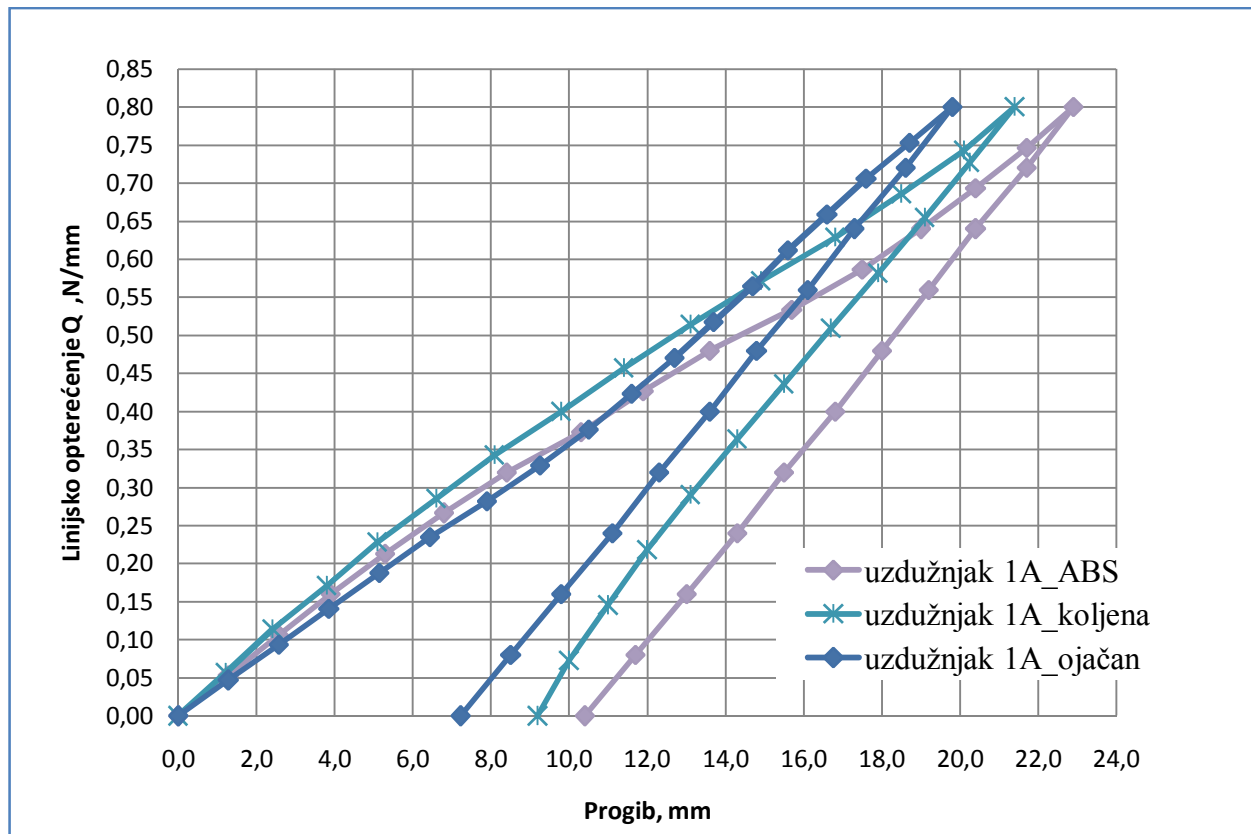
**Slika 6.2 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1B za osnovni model**



Slika 6.3 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1B

**Tablica 6.7 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1A**

| Modeli     | Oplata   |           | Uzdužnjak       |           |                       |                            |                       |                            |
|------------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
|            | Debljina | Materijal | Dimenzije       | Materijal | Prema (1.1.5.3)       |                            | Prema (1.1.5.2)       |                            |
|            | $t$ , mm | čelik     | T profil        | čelik     | $w$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> | $z$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> |
| 1A_koljena | 23.5     | AH 36     | 300x18 + 120x18 | AH 32     | 1115.16               | 54.0                       | 990.07                | 52.22                      |
| 1A_ABS     | 23.5     | AH 36     | 300x18 + 120x18 | AH 32     | 1115.16               | 54.0                       | 990.07                | 52.22                      |
| 1A_ojačan  | 23.5     | AH 36     | 300x18 + 120x18 | AH 36     | 1115.16               | 54.0                       | 878.52                | 46.33                      |

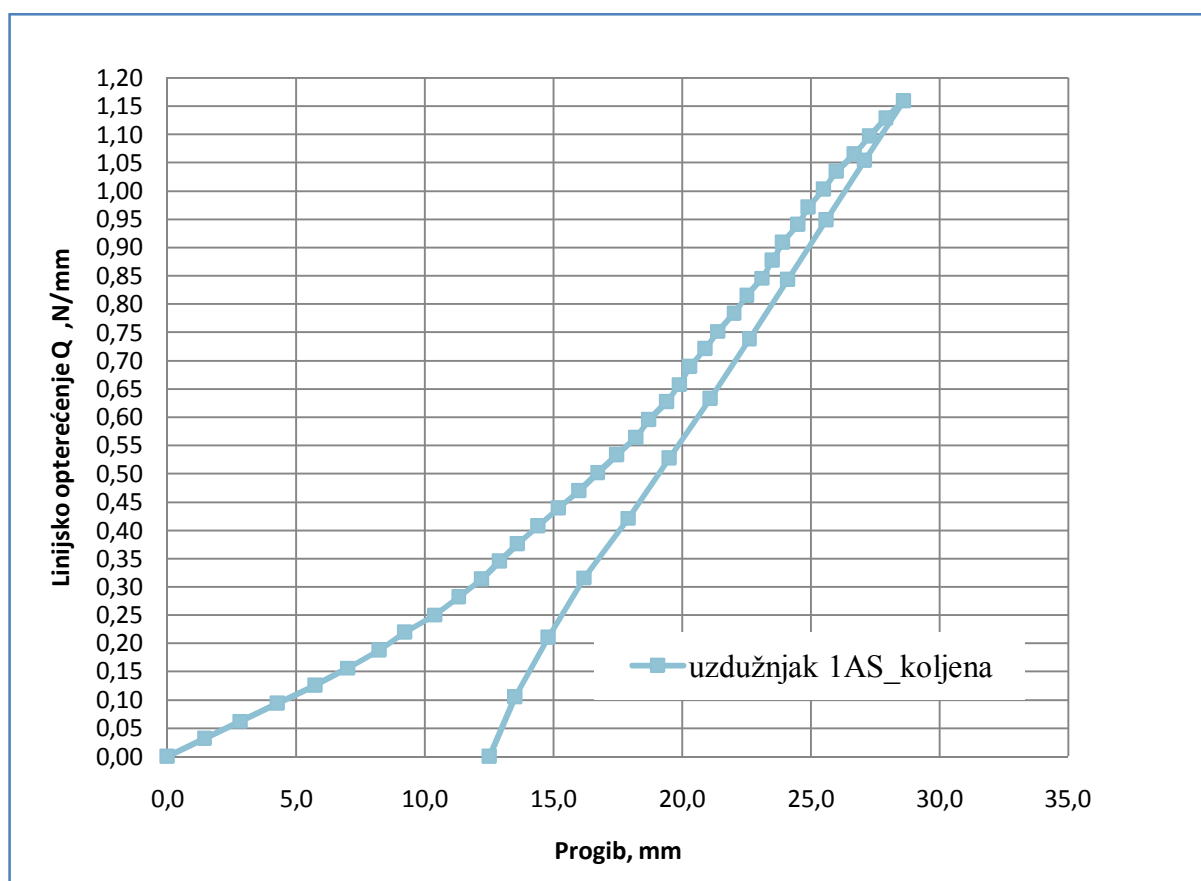


**Slika 6.4 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1A**

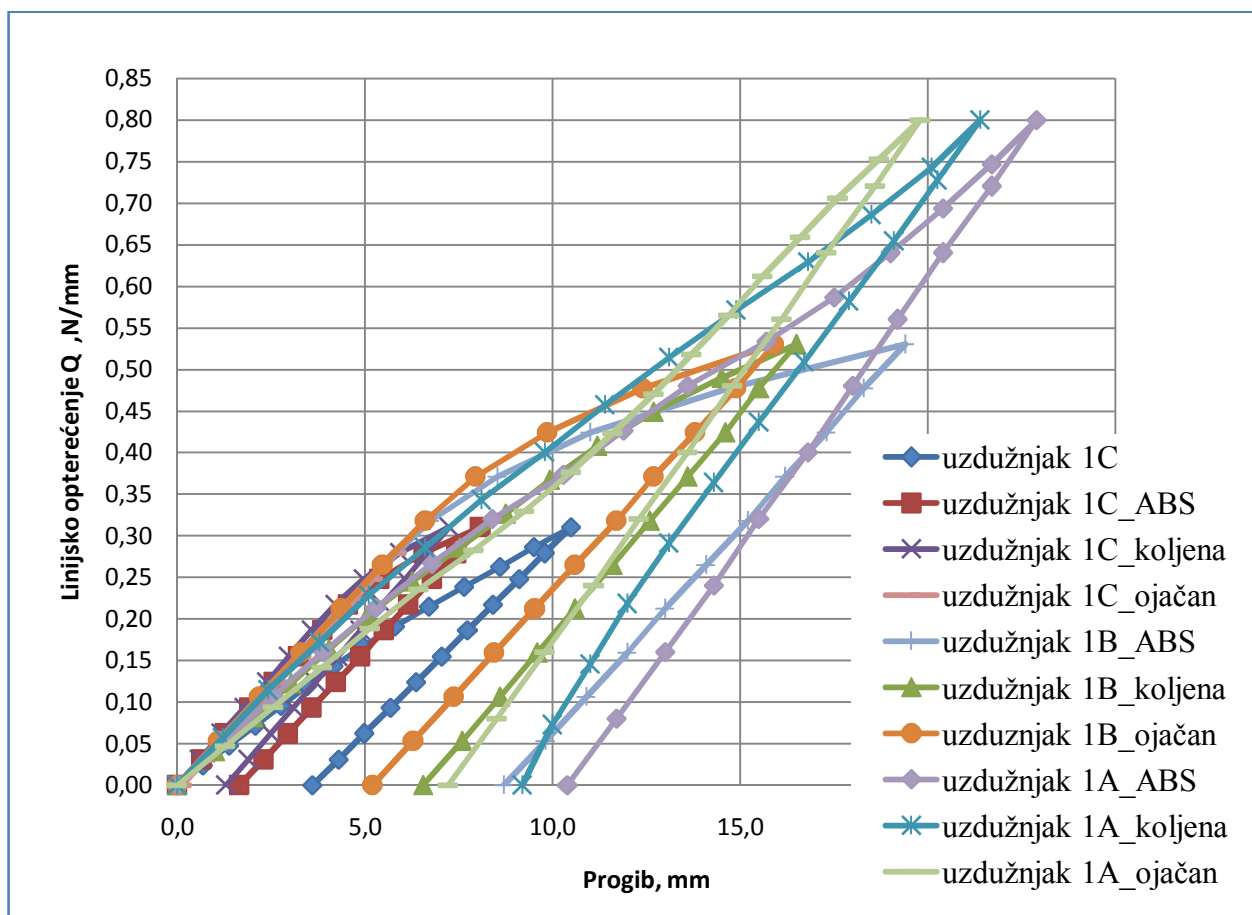
**Tablica 6.8 Karakteristike vanjske oplata i uzdužnjaka za klasu leda 1AS**

| Modeli      | Oplata   |           | Uzdužnjak       |           |                       |                            |                       |                            |
|-------------|----------|-----------|-----------------|-----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
|             | Debljina | Materijal | Dimenzije       | Materijal | Prema (1.1.5.3)       |                            | Prema (1.1.5.2)       |                            |
|             | $t$ , mm | čelik     | T profil        | čelik     | $w$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> | $z$ , cm <sup>3</sup> | $A_{Sh}$ , cm <sup>2</sup> |
| 1AS_koljena | 32.5     | AH 36     | 300x25 + 120x25 | AH 36     | 1115.16               | 54                         | 990.07                | 52.22                      |
| 1AS_ABS     | 32.5     | AH 36     | 300x25 + 120x25 | AH 36     | 1115.16               | 54                         | 990.07                | 52.22                      |

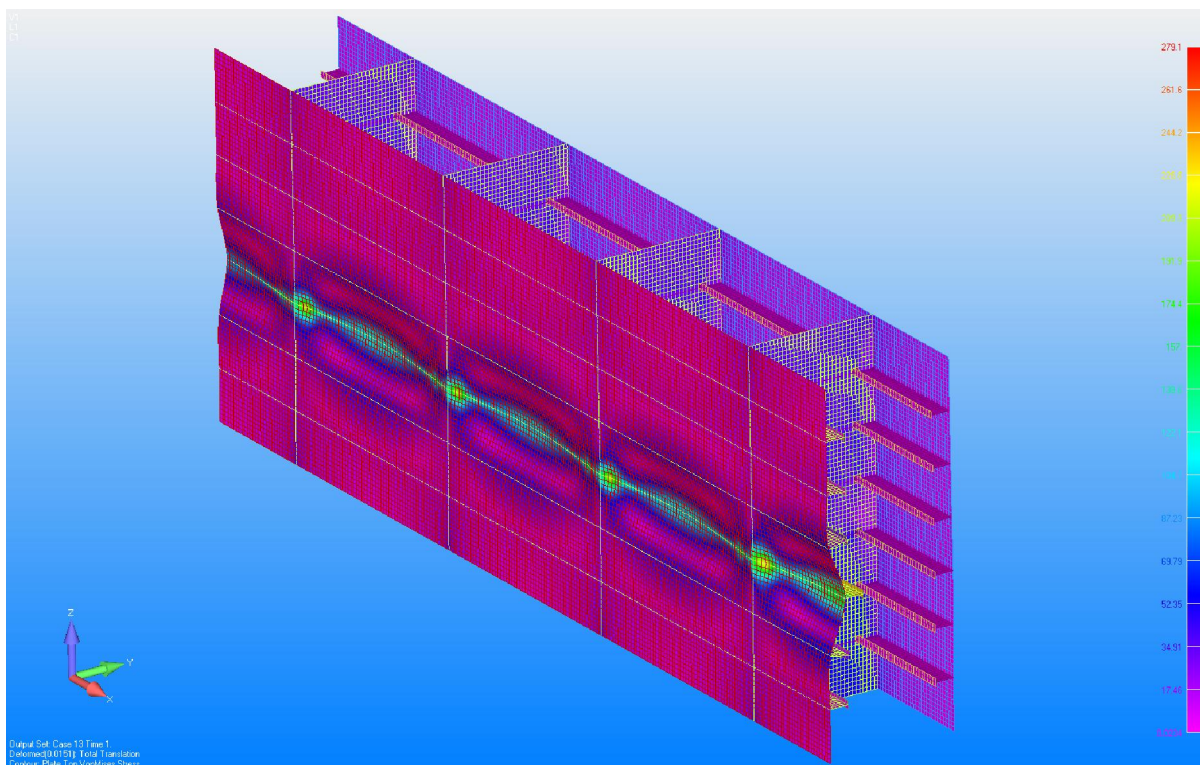
Analiza ojačanog modela za klasu leda 1AS, kao ni za model 1AS\_ABS nije napravljena zbog problema s konvergencijom. Budući da se radi o velikom opterećenju leda za tu klasu, vrijeme analize je trajalo preko 10 sati gdje je program radio veliki broj koraka povećanja opterećenja. Trebalo bi modificirati model KE (povećavati uzdužnjake itd.) što nije bilo predviđeno. Inače je postupak isti i može se napraviti za IAS kao i za druge klase.



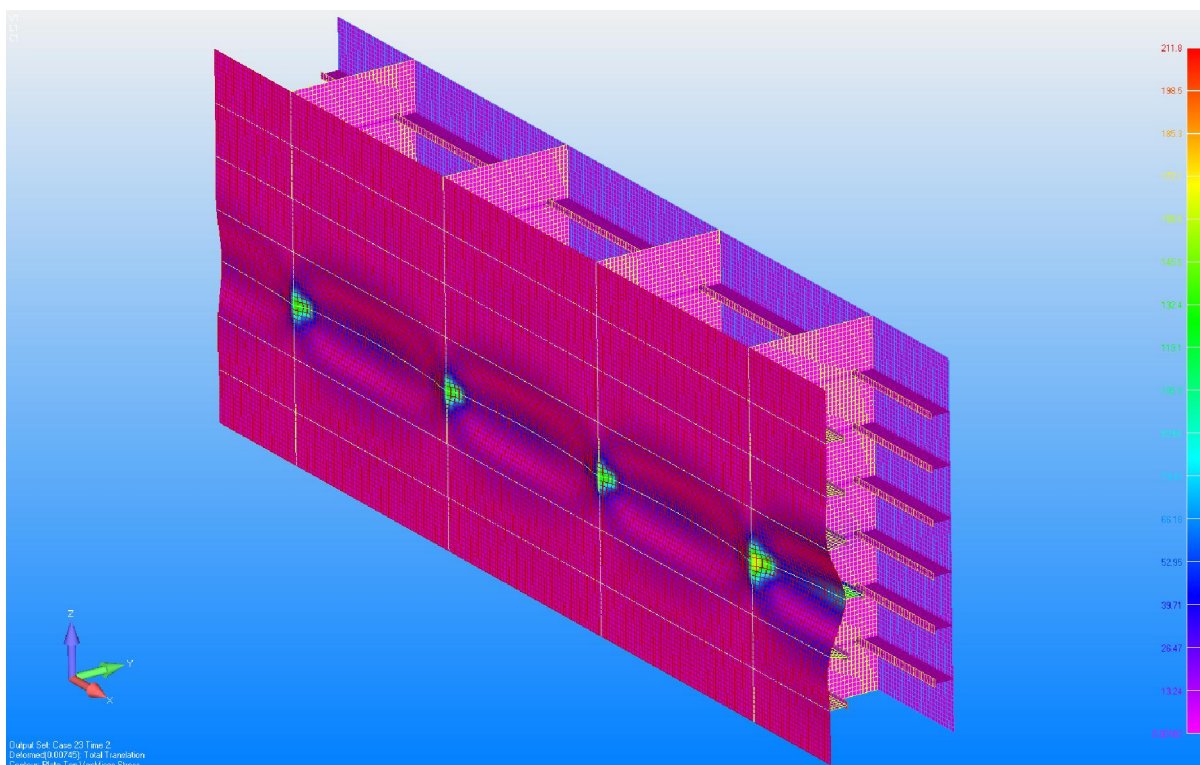
**Slika 6.5 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klasu leda 1AS**



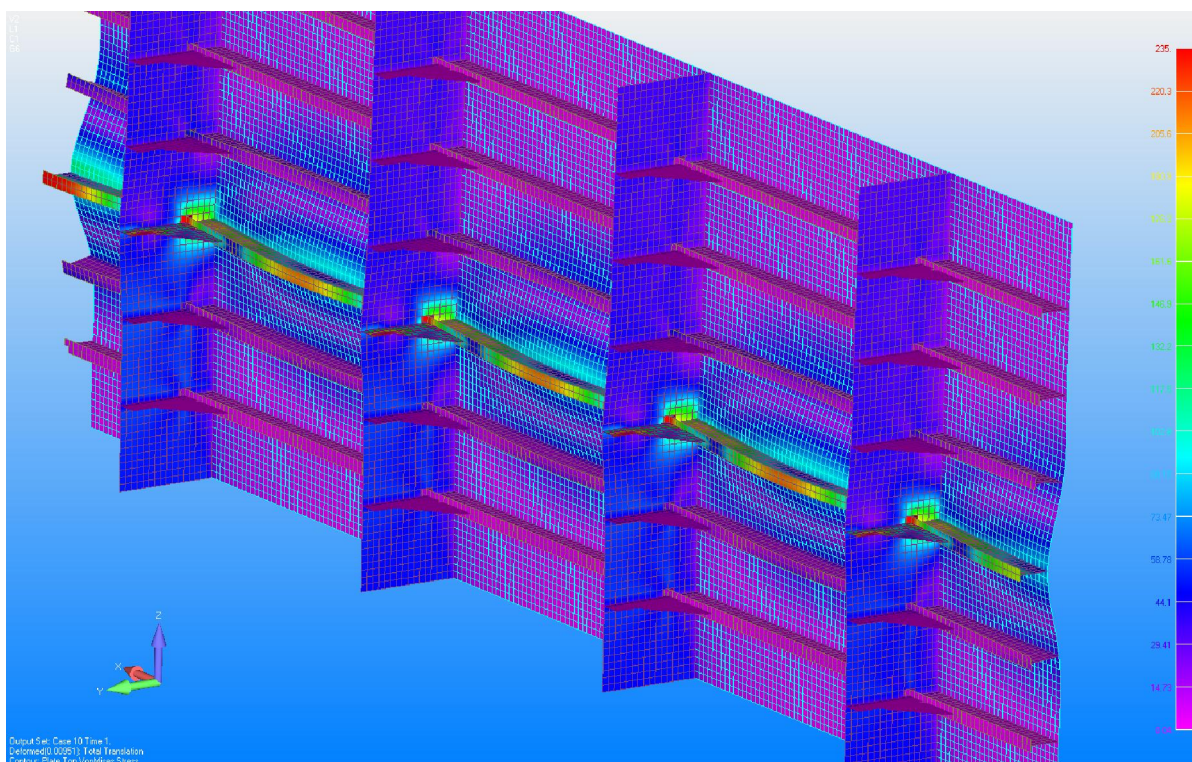
Slika 6.6 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za uzdužnjak vanjske oplata za klase leda 1C, 1B i 1A



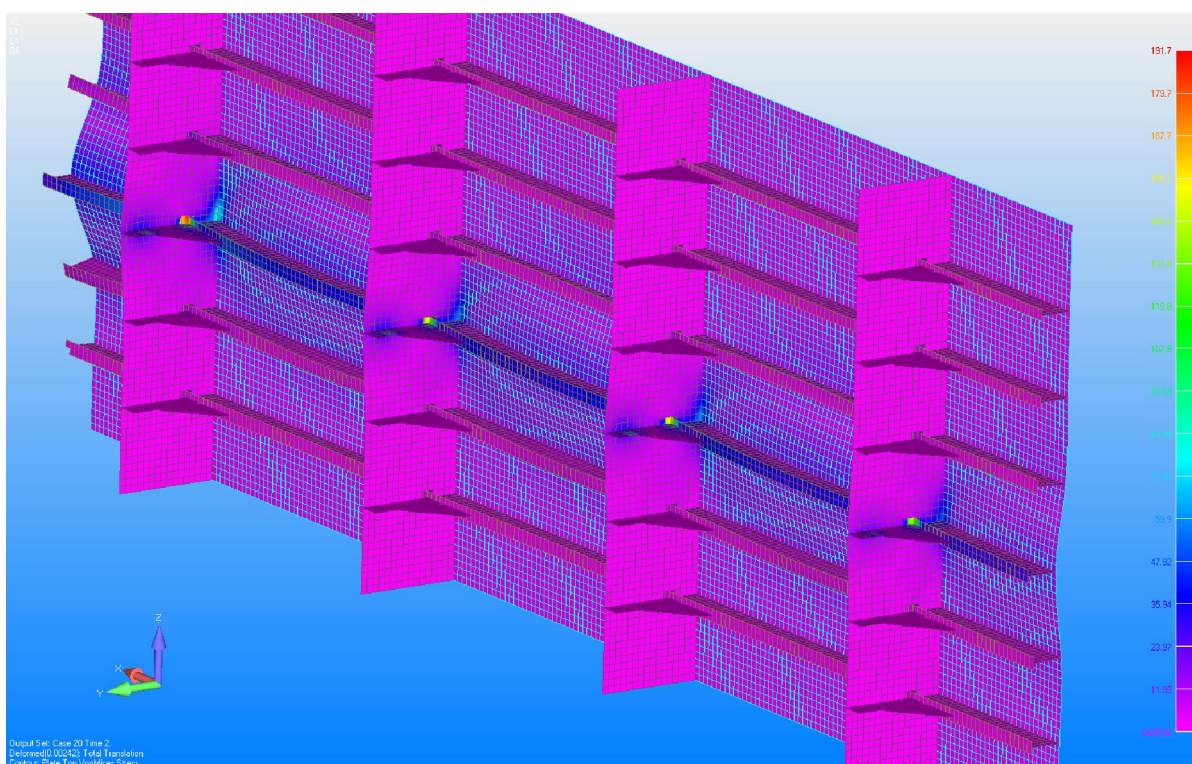
**Slika 6.7 Von Misesova naprezanja na deformiranom osnovnom modelu "1C" pri maksimalnom opterećenju**



**Slika 6.8 Von Misesova naprezanja na deformiranom osnovnom modelu "1C" nakon rasterećenja**



**Slika 6.9 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1C\_koljena" pri maksimalnom opterećenju**



**Slika 6.10 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1C\_koljena" nakon rasterećenja**

#### 6.4. Rezultati alternativnog projekta za oplatu boka

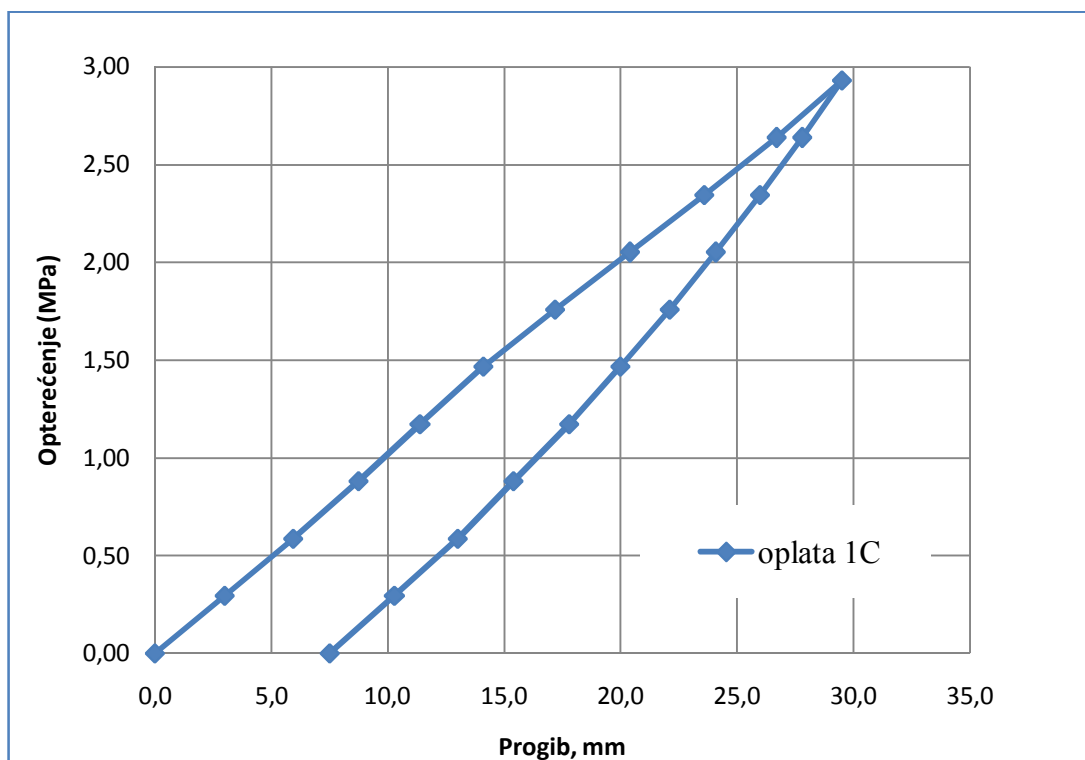
Debljina oplata boka je određena korištenjem NMKE analize za ekstremna opterećenja leda. Oplata boka je podvrgnuta površinskom opterećenju  $F$  koje je određeno umnoškom ekstremnog tlak leda na oplatu  $p$  (koji je triput veći od projektnog tlaka definiranog u 5.1.4.2), visine opterećenja  $h$  i duljine opterećenja  $l$  koja je jednaka dvostrukom razmaku uzdužnjaka. Vrijednosti površinskog opterećenja i tlaka leda na oplatu broda u ovisnosti o klasi leda su dane u tablici 6.9.

**Tablica 6.9 Vrijednosti površinskog opterećenja i tlaka leda na oplatu broda izračunati alternativnim projektom za oplatu boka**

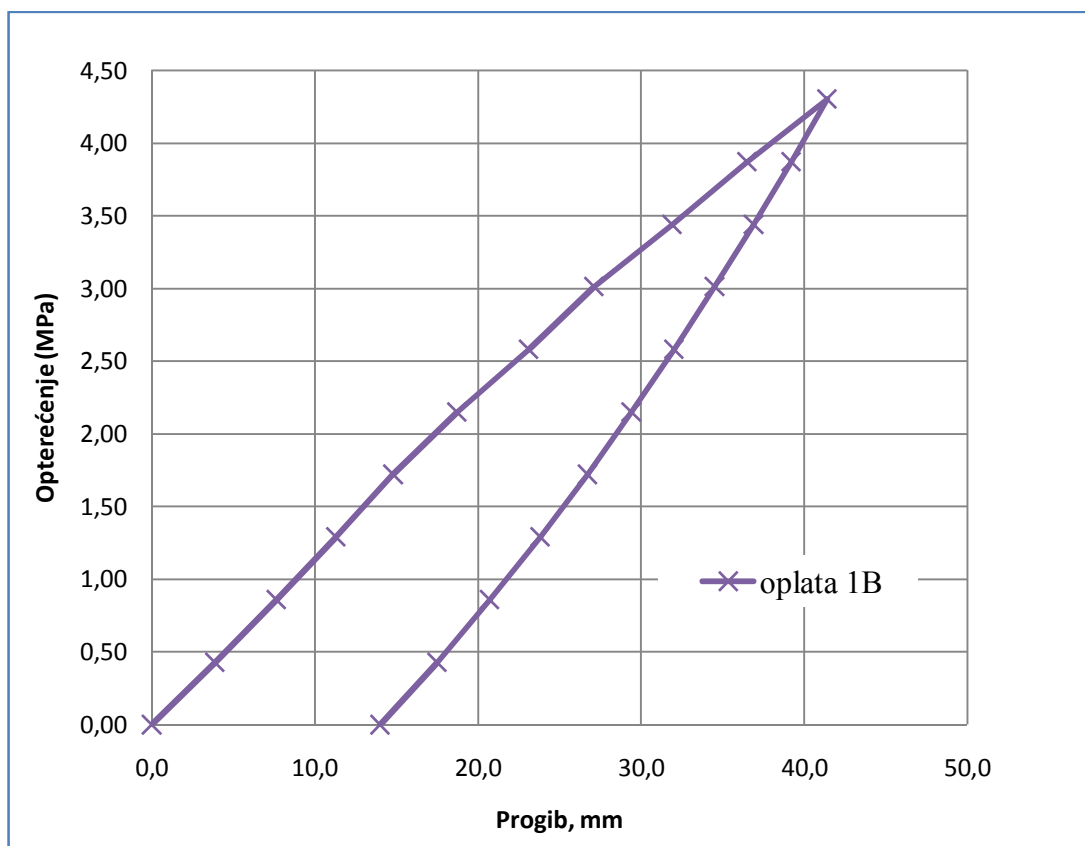
| Notacija | $h$ , m | $p$ , N/mm <sup>2</sup> | $F$ , kN |
|----------|---------|-------------------------|----------|
| 1AS      | 0.35    | 6.98                    | 3909.56  |
| 1A       | 0.30    | 5.64                    | 2707.54  |
| 1B       | 0.25    | 4.30                    | 1721.74  |
| 1C       | 0.22    | 2.93                    | 1030.78  |

Krivulje opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu u zavisnosti o određenoj klasi leda, su dane na slikama 6.7 do 6.9. Na slici 6.10 dan je njihov zajednički prikaz. Budući da su trajne deformacije vanjske oplata modela manje od 2% razmaka uzdužnjaka (16 mm), može se zaključiti da je alternativni projekt zadovoljavajući i prihvatljiv.

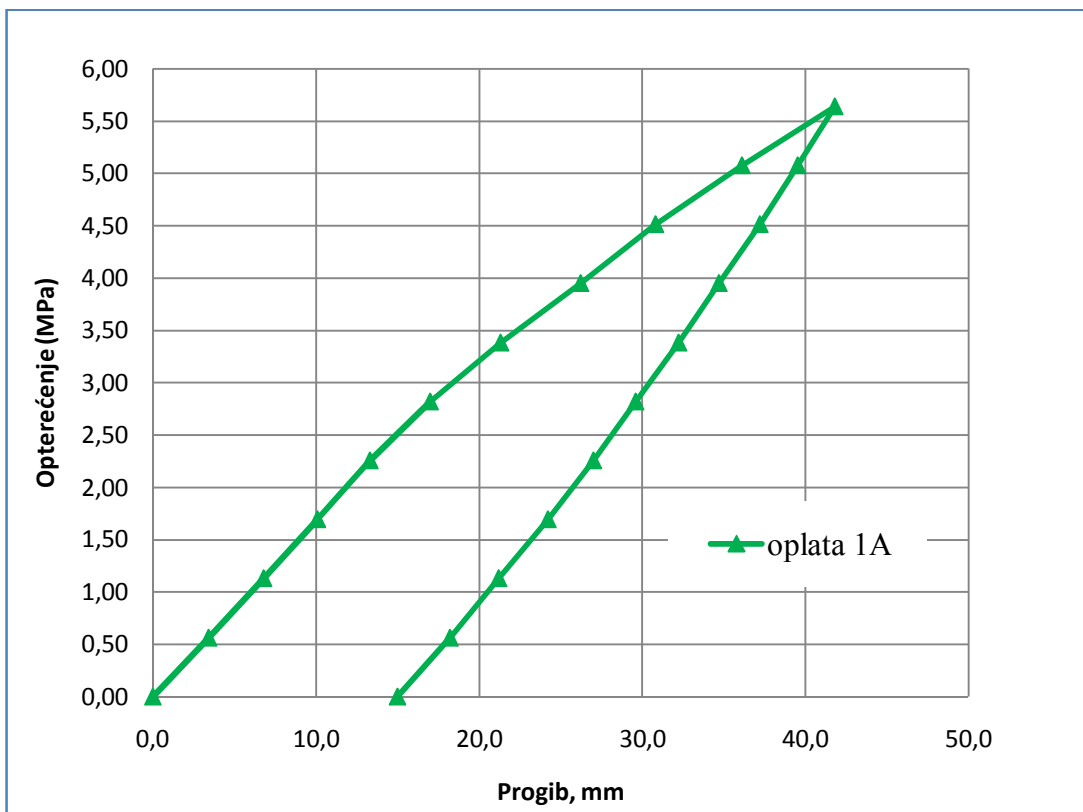
Na slikama 6.15 i 6.16 prikazana su Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A". U prilogu II su dane su slike za ostale modele.



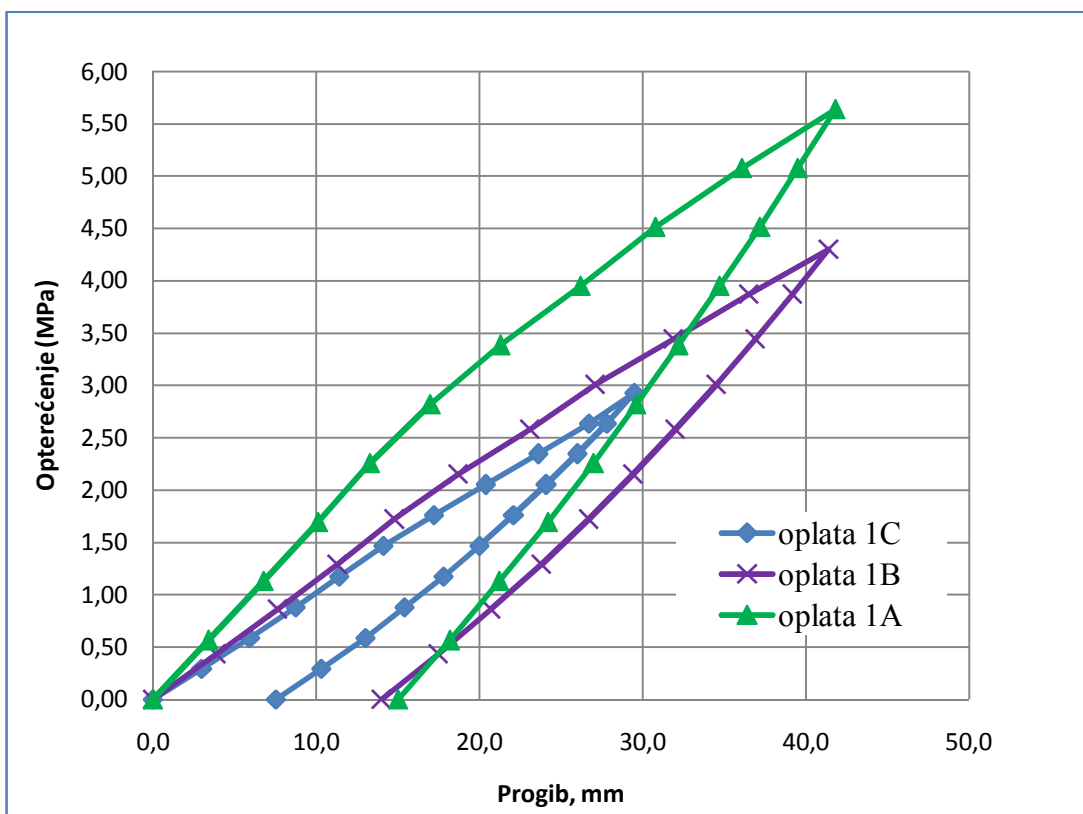
Slika 6.11 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klasu leda 1C



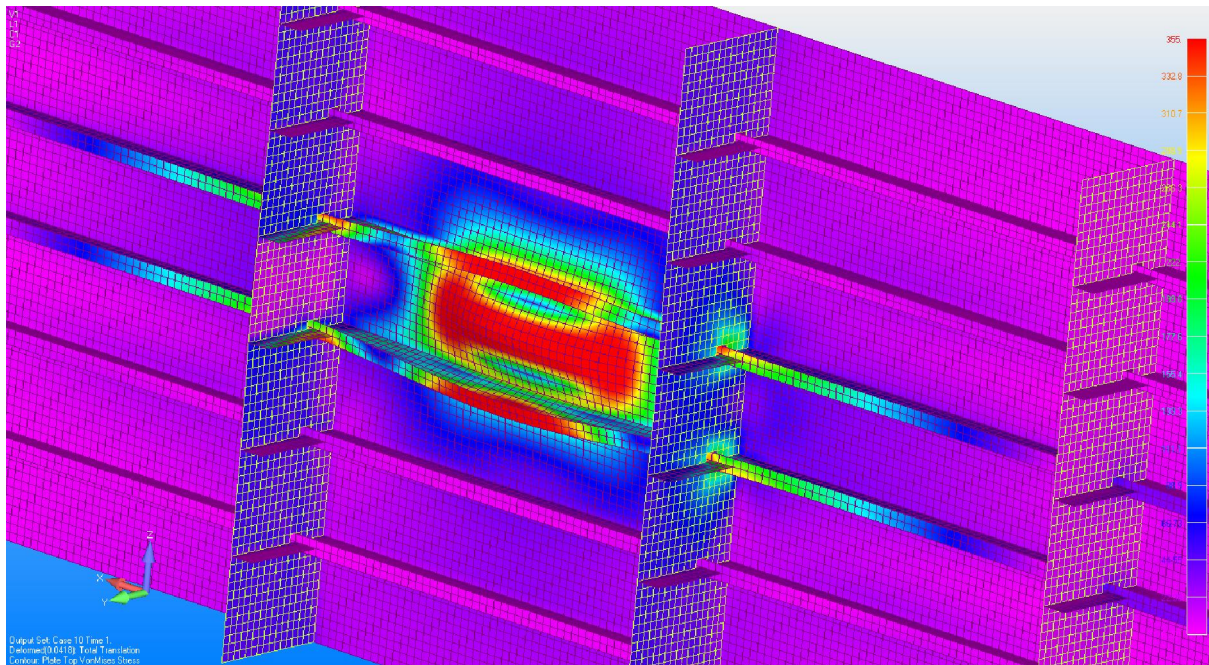
Slika 6.12 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klasu leda 1B



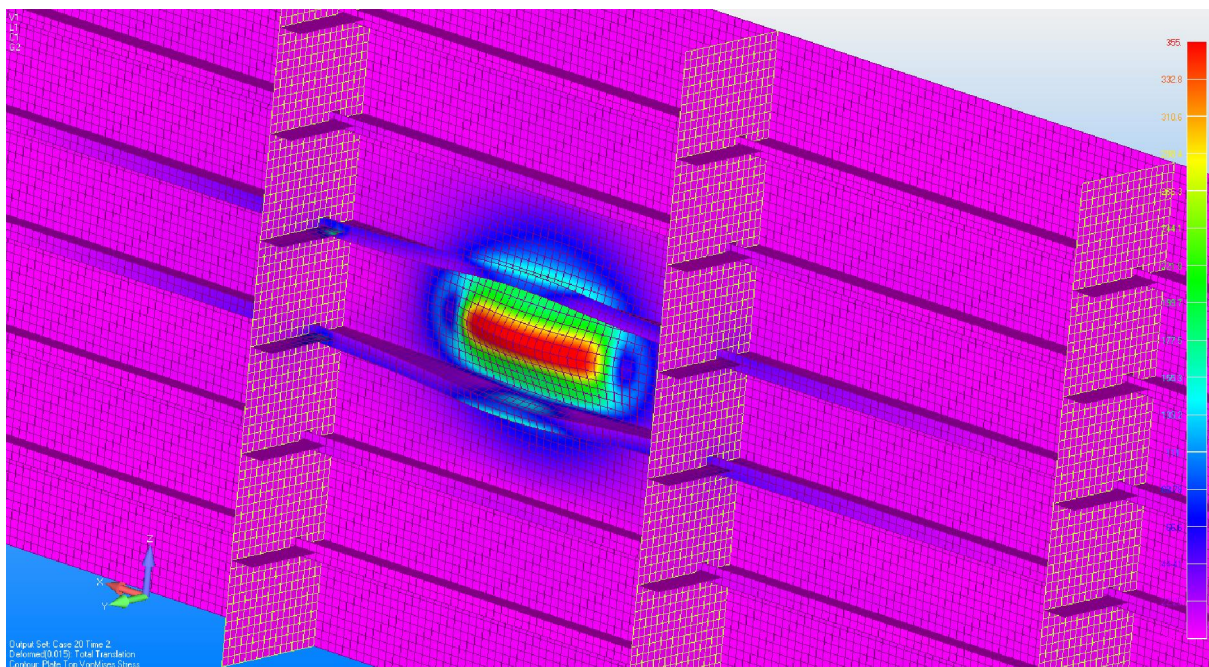
Slika 6.13 Krivulja opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klasu leda 1A



Slika 6.14 Krivulje opterećenje-maksimalni progib za vanjsku oplatu za klase leda 1C, 1B i 1A



**Slika 6.15 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A" pri maksimalnom opterećenju**



**Slika 6.16 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A" nakon rasterećenja**

## 7. EKONOMSKA ANALIZA

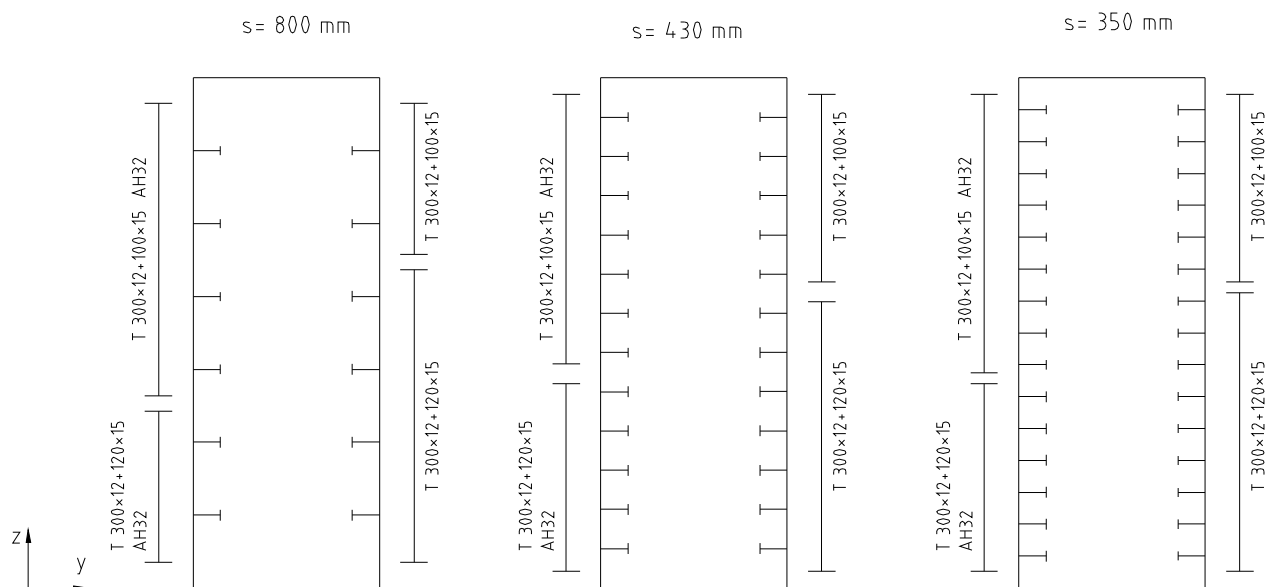
U ekonomskoj analizi se računaju troškovi materijala i troškovi zavarivanja elemenata konstrukcije boka broda koji su dimenzionirani prema pravilima FSICR gdje su propisani maksimalni razmaci uzdužnjaka 0.45 m za klase leda 1C i 1B, te 0.35 m za klasu leda 1A i prema pravilima klasifikacijskog društva ABS koji dopuštaju veće razmake uzdužnjaka.

U tablici 6.2 dane su dimenzije razmatranih konstrukcijskih elemenata izračunatih prema pravilima FSICR, a u tablicama 6.5 do 6.8 prema pravilima klasifikacijskog društva ABS. U 7.1 dane se karakteristike ukrepa okvirnog rebra i koljena koja ih spajaju s uzdužnjacima vanjske oplata.

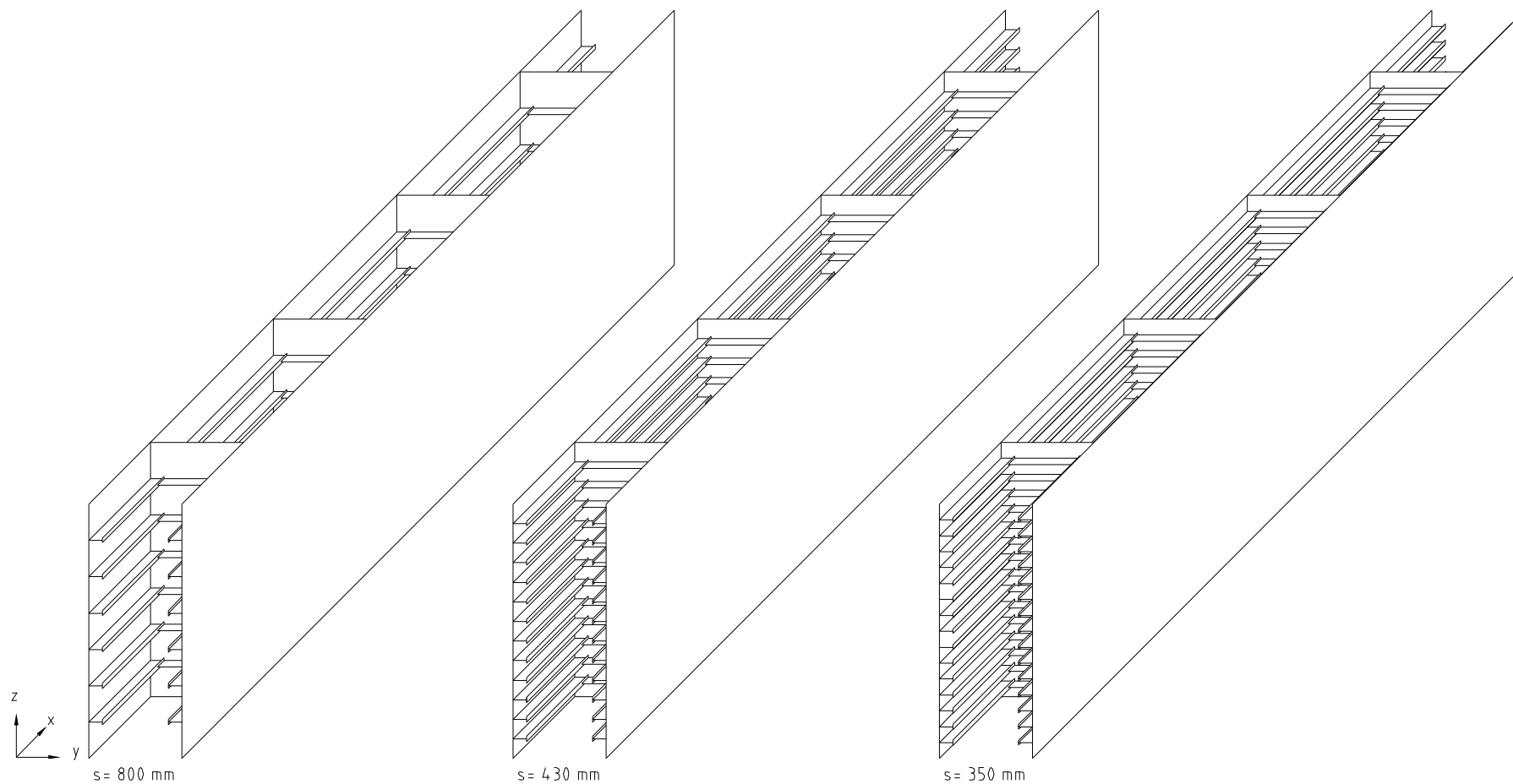
Na Slika 7.1 7.1 i 7.2 prikazan je razmatrani dio konstrukcije oplata u području glavnog rebra za različite razmake uzdužnjaka.

**Tablica 7.1 Karakteristike ukrepa okvirnog rebra i koljena**

| Konstrukcijski element | Dimenzije   | Materijal |
|------------------------|-------------|-----------|
| Ukrepa okvirnog rebra  | 450x450x12  | AH 32     |
| Koljena                | 1420x200x12 | AH 32     |



**Slika 7.1 Prikaz presjeka glavnog rebra za različite razmake uzdužnjaka**



**Slika 7.2 Trodimenzionalni prikaz dijela konstrukcije boka u području glavnog rebra**

## 7.1. Troškovi materijala

U tablicama 7.2 do 7.4 su, u ovisnosti o klasama leda, dane vrijednosti masa vanjske oplata boka, uzdužnjaka unutrašnje i vanjske oplata, koljena, te ukrepa okvirmih rebara za područje paralelnog srednjaka broda i to u području pojasa leda. U njima je dana usporedba iznosa masa konstrukcijskih elemenata boka broda koji su dimenzionirani u skladu s uputama klasifikacijskog društva ABS i masa konstrukcijskih elemenata koji su dimenzionirani prema FSICR pravilima.

U tablici 7.5 dani su iznosi cijena brodograđevnog čelika u ovisnosti o klasi čelika. Cijena je dana u dolarima.

**Tablica 7.2 Iznosi masa razmatranih konstrukcijskih elemenata boka broda za klasu leda 1C**

| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | $m_{\text{vanjske oplata}}, t$ | $m_{\text{uzdužnjaka}}, t$ | $m_{\text{koljena}}, t$ | $m_{\text{ukrepa okvirmih rebara}}, t$ | $m_{\text{ukupna}}, t$ |
|-------------------|------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| s=800 mm          | 1C_koljena | 116.48                         | 56.97                      | 2.08                    | 4.82                                   | 360.68                 |
|                   | 1C_ABS     | 116.48                         | 56.97                      | -                       | 4.82                                   | 356.53                 |
|                   | 1C_ojačan  | 101.28                         | 56.97                      | -                       | 4.82                                   | 326.14                 |
| s= 430 mm         | 1C         | 66.80                          | 113.94                     | 4.15                    | 9.63                                   | 389.05                 |

**Tablica 7.3 Iznosi masa razmatranih konstrukcijskih elemenata boka broda za klasu leda 1B**

| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | $m_{\text{vanjske oplata}}, t$ | $m_{\text{uzdužnjaka}}, t$ | $m_{\text{koljena}}, t$ | $m_{\text{ukrepa okvirmih rebara}}, t$ | $m_{\text{ukupna}}, t$ |
|-------------------|------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| s=800 mm          | 1B_koljena | 119.01                         | 56.97                      | 2.08                    | 4.82                                   | 365.75                 |
|                   | 1B_ABS     | 119.01                         | 56.97                      |                         | 4.82                                   | 361.59                 |
|                   | 1B_ojačan  | 119.01                         | 56.97                      |                         | 4.82                                   | 361.59                 |
| s= 430 mm         | 1B         | 81.28                          | 113.94                     | 4.15                    | 9.63                                   | 418.02                 |

**Tablica 7.4 Iznosi masa razmatranih konstrukcijskih elemenata boka broda za klasu leda 1A**

| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | $m_{\text{vanjske oplata}}, t$ | $m_{\text{uzdužnjaka}}, t$ | $m_{\text{koljena}}, t$ | $m_{\text{ukrepa okvirmih rebara}}, t$ | $m_{\text{ukupna}}, t$ |
|-------------------|------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------------------|------------------------|
| s=800 mm          | 1A_koljena | 141.80                         | 80.09                      | 2.08                    | 4.82                                   | 457.55                 |
|                   | 1A_ABS     | 141.80                         | 80.09                      |                         | 4.82                                   | 453.40                 |
|                   | 1A_ojačan  | 141.80                         | 80.09                      |                         | 4.82                                   | 453.40                 |
| s= 350 mm         | 1A         | 81.89                          | 142.43                     | 5.19                    | 12.04                                  | 483.10                 |

**Tablica 7.5 Cijene čelika za određene klase brodograđevnog čelika**

| Klasa čelika | Cijena, \$/t |
|--------------|--------------|
| A            | 790          |
| AH32         | 815          |
| AH36         | 825          |

\*u tablici su dane cijene čelika koje su vrijedile na dan 11.10.2010.

U tablicama 7.6 do 7.8 dani su iznosi cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente boka u ovisnosti o klasi leda. Prikazana je i, u postotku, usporedba cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente dimenzionirane u skladu s uputama klasifikacijskog društva ABS i konstrukcije koja je određena prema FSICR pravilima (slika 7.3).

**Tablica 7.6 Cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente boka broda za klasu leda 1C**

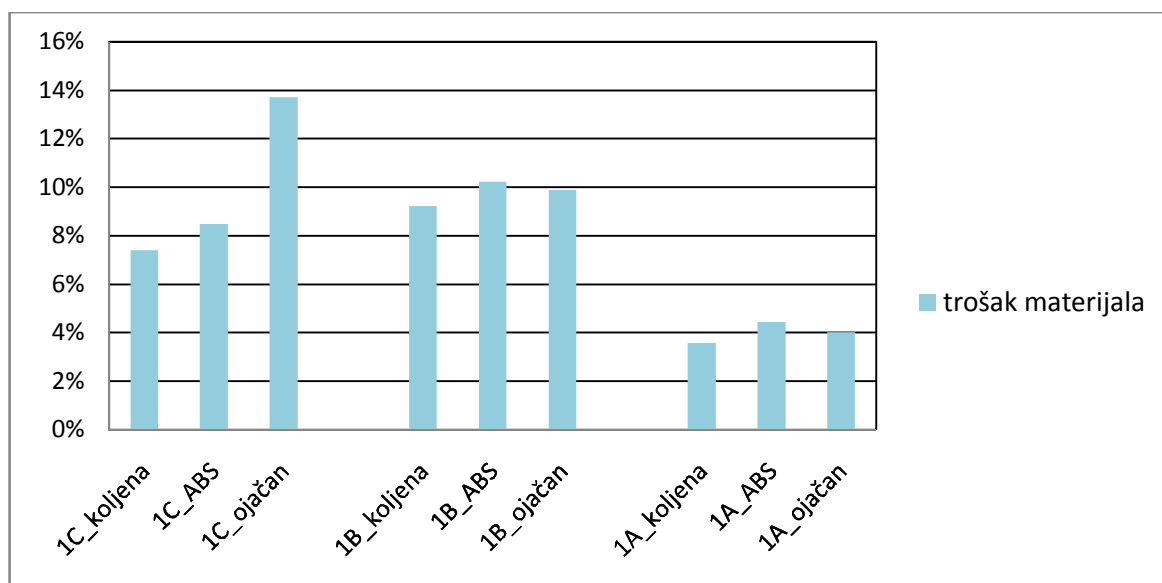
| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | Cijena čelika, \$ | Razlika, % |
|-------------------|------------|-------------------|------------|
| s=800 mm          | 1C_koljena | 285284            | 7.4        |
|                   | 1C_ABS     | 281898            | 8.5        |
|                   | 1C_ojačan  | 265807            | 13.7       |
| s= 430 mm         | 1C         | 308041            |            |

**Tablica 7.7 Cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente boka broda za klasu leda 1B**

| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | Cijena čelika, \$ | Razlika, % |
|-------------------|------------|-------------------|------------|
| s=800 mm          | 1B_koljena | 300464            | 9.2        |
|                   | 1B_ABS     | 297078            | 10.2       |
|                   | 1B_ojačan  | 298217            | 9.9        |
| s= 430 mm         | 1B         | 330925            |            |

**Tablica 7.8 Cijena čelika za razmatrane konstrukcijske elemente boka broda za klasu leda 1A**

| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | Cijena čelika, \$ | Razlika, % |
|-------------------|------------|-------------------|------------|
| s=800 mm          | 1A_koljena | 375742            | 3.6        |
|                   | 1A_ABS     | 372356            | 4.4        |
|                   | 1A_ojačan  | 373958            | 4.0        |
| s= 350 mm         | 1A         | 389632            |            |



**Slika 7.3 Razlika (%) u cijeni čelika alternativnih konstrukcija u odnosu na FSICR konstrukcije**

## 7.2. Troškovi zavarivanja

Za ekonomsku analizu je potrebno izračunati troškove zavarivanja po metru zavora.

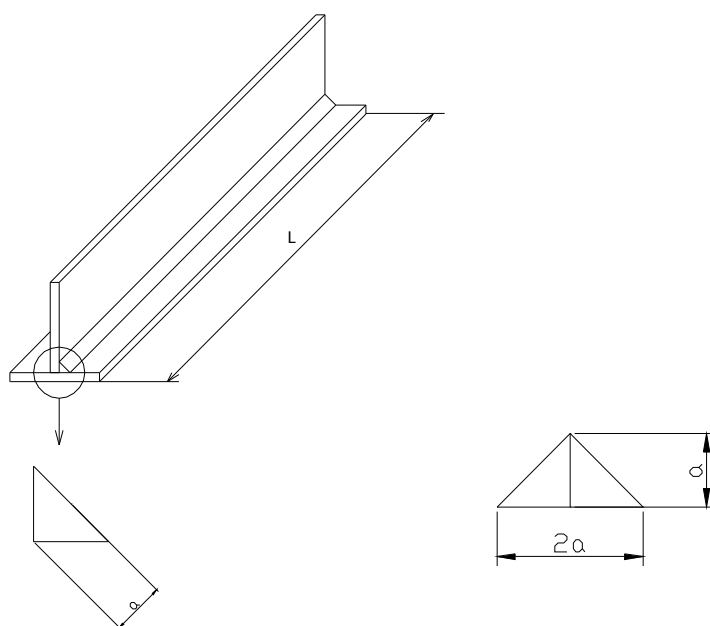
Troškovi po metru zavora  $T_{ZAV}$  se računaju kao umnožak mase zavora po metru duljine  $m_1$  i ukupnih troškova po kilogramu zavora  $T_{UK}$ , čiji je izračun opisan u poglavljima 7.2.1 i 7.2.2.

$$T_{ZAV} = T_{UK} \cdot m_1 \quad (7.1)$$

$$T_{ZAV} = 55.52 \text{ kn/m zavora}$$

### 7.2.1. Izračun mase zavora

Prilikom određivanja mase zavora po metru duljine, zbog jednostavnosti izračuna, za sve zavora uzdužnjaka, uzdužnjaka za oplatu boka broda, ukrepa za okvirno rebro i koljena, uzet je jednaki oblik zavora i postupak zavarivanja je MAG.



Slika 7.4 Shematski prikaz kutnog zavora

Masa zavora po metru duljine zavora  $m_1$  je jednaka:

$$m_1 = V \cdot \rho_{ZAV} \quad (7.2)$$

$$m_1 = 0.785 \text{ kg/m}$$

gdje je:

$V$  : volumen zavora koji se računa prema izrazu

$$V = \frac{a \cdot 2a}{2} \cdot L \quad (7.3)$$

$L$  : jedinična duljina; 1 m

- $a$  : visina kutnog zavora koja se okvirno uzima da je 70% debljine lima koji se zavaruje; za ovaj proračun odabrana je vrijednost 10 mm
- $\rho_{ZAV}$  : gustoća zavora; 7850 kg/m<sup>3</sup>.

### 7.2.2. Troškovi po kilogramu zavora

Ukupni troškovi zavarivanja po kilogramu zavora se računaju prema slijedećem izrazu:

$$T_{UK} = T_Z + T_{EL.EN} + T_{ODI} + T_{CO_2} \quad (7.4)$$

$$T_{UK} = 70.72 \text{ kn/kg}$$

Pojedini troškovi se računaju prema dolje navedenom postupku.

#### Trošak žice

Trošak žice  $T_Z$  se računa prema izrazu

$$T_Z = C_Z \cdot k_{tl} \quad (7.5)$$

$$T_Z = 21 \text{ kn/kg zavora}$$

gdje je:

$C_Z$  : cijena žice po kilogramu, uzima se da je jednaka 20 kn/kg

$k_{tl}$  : koeficijent taljenja žice, za MAG zavarivanje se uzima vrijednost 1.05 kg žice/kg

#### Trošak električne energije

Trošak električne energije  $T_{EL.EN}$  se računa prema izrazu:

$$T_{EL.EN} = \left[ \frac{U \cdot I}{1000 \cdot \eta_s} \cdot \varepsilon + N_0 \cdot (1 - \varepsilon) \right] \cdot \frac{1}{k_{t2} \cdot \varepsilon} \cdot C_{EL.EN}^1 \quad (7.6)$$

$$T_{EL.EN} = 3.02 \text{ kn/kg zavora}$$

gdje je

$U$  : napon električnog luka, uzima se 25 V

$I$  : struja zavarivanja, uzima se da je jednaka 200 A

$\eta_s$  : stupanj korisnog djelovanja izvora struje, uzima se da je jednak 0.8

$\varepsilon$  : intermitencija, računa se prema izrazu

$$\varepsilon = \frac{\text{vrijeme gorenja luka}}{\text{ukupno radno vrijeme}}$$

Za postupak CO2 zavarivanja je u rasponu od 0.4 do 0.5, te je za proračun uzeta vrijednost 0.5.

$N_0$  : snaga koju stroj koristi u praznom hodu, kada luk ne gori; jednaka je 1.

$k_{t2}$  : efikasnost taljenja žice; za postupak MAG je jednaka 1.8 kg zavora/h

$C_{EL.EN}^1$  : jedinična cijena električne energije; usvaja se vrijednost 0.75 kn/kW.

### Troškovi osobnog dohotka izrade

Troškovi osobnog dohotka izrade  $T_{ODI}$  se računaju prema izrazu:

$$T_{ODI} = \frac{ODI}{\varepsilon \cdot k_{t2}} \quad (7.7)$$

$$T_{ODI} = 41.7 \text{ kn/kg}$$

gdje je:

$ODI$  : bruto iznos  $OD$  (osobnog dohotka) koji se dobije ako se neto  $OD$  dodaje u obavezna davanja društvenoj zajednici (mirovinsko, zdravstveno osiguranje i ostala izdavanja); za  $OD = 25$  kn, davanja društvenoj zajednici 60%

### Troškovi plina

Troškovi plina  $T_{CO_2}$  se računaju pomoću izraza:

$$T_{CO_2} = C_{CO_2} \cdot K_{CO_2} \quad (7.8)$$

$$T_{CO_2} = 5 \text{ kn/kg zavara}$$

gdje je:

$K_{CO_2}$  : potrošnja plina po kilogramu zavara

$$K_{CO_2} = \frac{p_{CO_2} \cdot 60}{k_{t2}} = 500 \text{ l/kg} \quad (7.9)$$

$k_{t2}$  : koeficijent taljenja za MAG postupak, kg zavara/h

$p_{CO_2}$  : potrošnja plina MAG; uzima se vrijednost 15 l/min

$C_{CO_2}$  : cijena MAG, je jednaka 0.01 kn/l

### 7.2.3. Ukupni trošak zavarivanja

Ukupni trošak zavarivanja razmatranih konstrukcijskih elemenata dan je u tablici 7.9. Izračunat je umnoškom ukupne duljine zavarivanja  $l_{ZAV,UK}$  i troškova po metru zavora  $T_{ZAV}$  koji su izračunati u prethodnom poglavlju 7.2.1. Za razmak uzdužnjaka  $s = 800$  mm, dane su vrijednosti ukupne duljine zavarivanja za modele sa i bez koljena. Cijena zavarivanja izračunata je u kunama, te s tečajem 5.5 preračunata u dolare.

**Tablica 7.9 Iznosi ukupnog troška zavarivanja**

|         | $l_{ZAV,UK}$ | Cijena zavarivanja |           |
|---------|--------------|--------------------|-----------|
|         | m            | kn                 | \$        |
| s=800mm | 12081.6      | 670720             | 121949.2  |
|         | 12729.6*     | 706695*            | 128489.9* |
| s=430mm | 25459.2      | 1413389            | 256979.9  |
| s=350mm | 31824.0      | 1766737            | 321224.8  |

\*s koljenima

### 7.3. Ukupni troškovi

U ukupnim troškovima su uračunati troškovi materijala koji su dani u tablicama 7.6, 7.7 i 7.8 i troškovi zavarivanja elemenata koji su dani u tablici 7.9.

Vrijednosti ukupnih troškova, u ovisnosti o klasama leda, su dane u tablicama 7.10 do 7.12. Ukupni trošak je izražen u dolarima. Također je dana, u postocima, razlika ukupnih troškova izrade elemenata konstrukcije boka broda koji su dimenzionirani prema pravilima FSICR s razmacima uzdužnjaka 0.43 m i 0.35 m, ovisno o odabranoj klasi, i prema pravilima klasifikacijskog društva ABS s razmacima uzdužnjaka 0.8 m (Slika 7.5).

Na slici 7.6 dan je zajednički prikaz razlike, u postocima, troškova materijala i ukupnih troškova alternativnih konstrukcija u odnosu na FSICR konstrukcije.

Međusobni omjer troškova materijala, zavarivanja i ukupnog troška, za klasu leda 1C, se može vidjeti na slici 7.7.

**Tablica 7.10 Usporedba ukupnih troškova za klasu leda 1C**

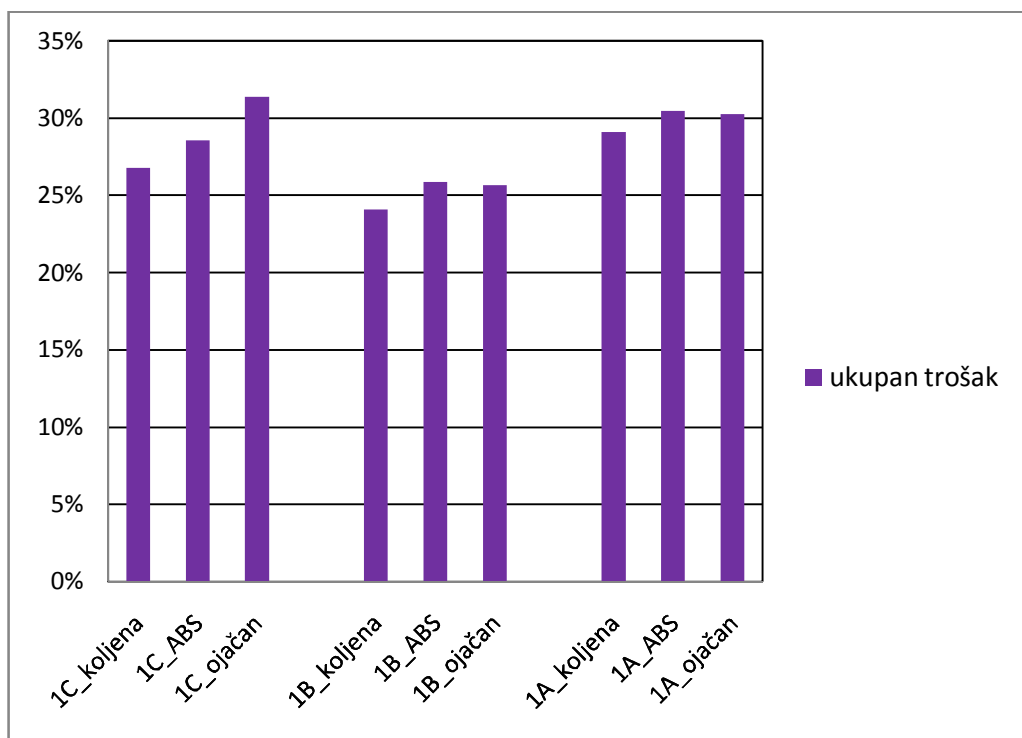
| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | Ukupni trošak, \$ | Razlika, % |
|-------------------|------------|-------------------|------------|
| s=800 mm          | 1C_koljena | 413773.6          | 26.8       |
|                   | 1C_ABS     | 403847.2          | 28.5       |
|                   | 1C_ojačan  | 387755.7          | 31.4       |
| s= 430 mm         | 1C         | 565020.6          |            |

**Tablica 7.11 Usporedba ukupnih troškova za klasu leda 1B**

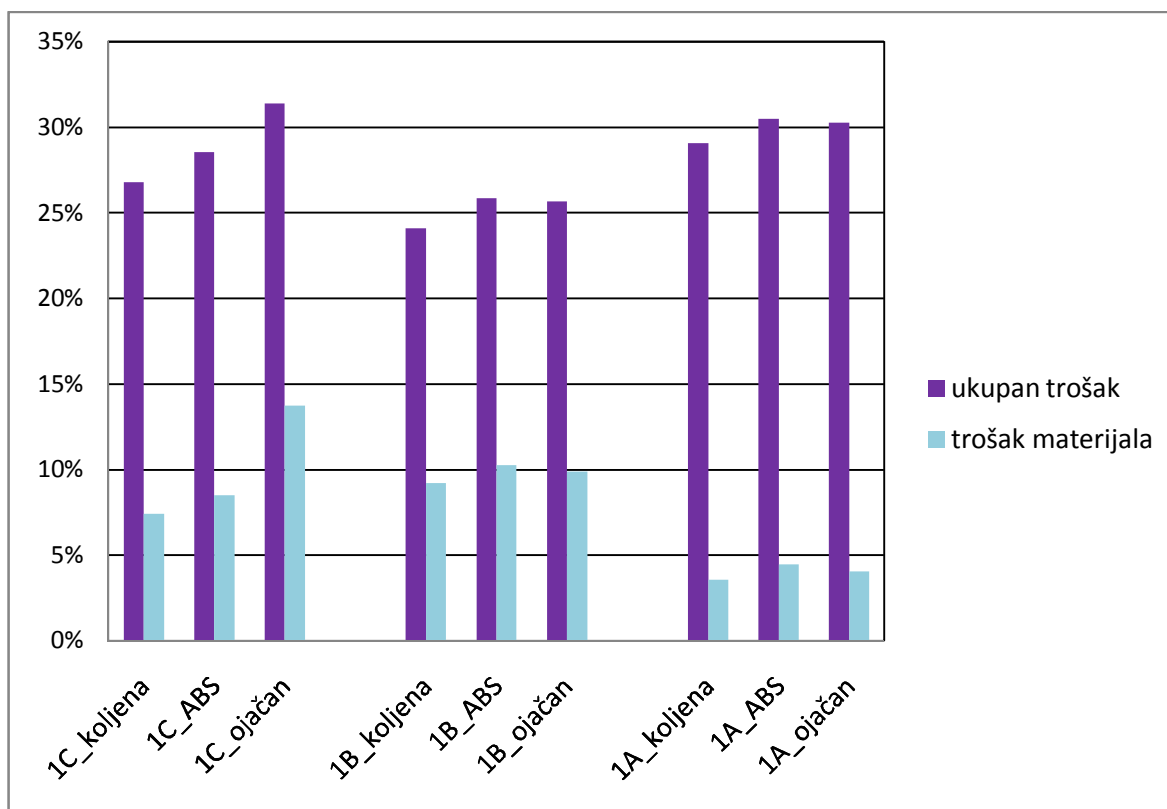
| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | Ukupni trošak, \$ | Razlika, % |
|-------------------|------------|-------------------|------------|
| s=800 mm          | 1B_koljena | 428953.6          | 24.1       |
|                   | 1B_ABS     | 419027.1          | 25.8       |
|                   | 1B_ojačan  | 420166.5          | 25.6       |
| s= 430 mm         | 1B         | 587904.7          |            |

**Tablica 7.12 Usporedba ukupnih troškova za klasu leda 1A**

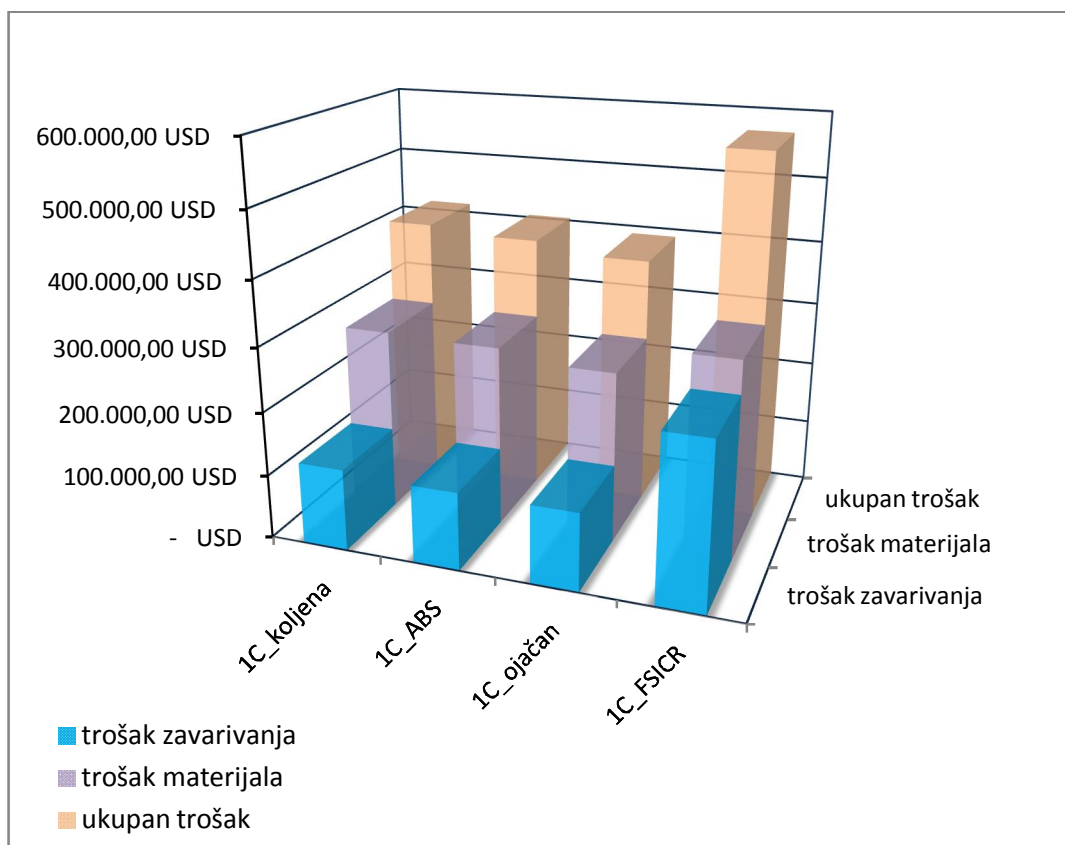
| Razmak uzdužnjaka | Modeli     | Ukupni trošak, \$ | Razlika, % |
|-------------------|------------|-------------------|------------|
| s=800 mm          | 1A_koljena | 504231.7          | 29.1       |
|                   | 1A_ABS     | 494305.2          | 30.5       |
|                   | 1A_ojačan  | 495907.0          | 30.2       |
| s= 350 mm         | 1A         | 710856.8          |            |



**Slika 7.5 Razlike (%) ukupnih troškova alternativnih konstrukcija u odnosu na FSICR konstrukcije**



**Slika 7.6 Razlike (%) troškova materijala i ukupnih troškova alternativnih konstrukcija u odnosu na FSICR konstrukcije**



**Slika 7.7** Međusobni omjer troškova materijala, zavarivanja i ukupnog troška za klasu 1C

## 8. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana praktična primjena nelinearne metode konačnih elemenata na projektiranje konstrukcije vanjske oplata postojećeg naftnog tankera. Metoda je nedavno propisana od klasifikacijskog društva American Bureau of Shipping.

Pokazalo se da je metoda učinkovita, primjenjiva i da se može primijeniti u praksi. Konstrukcija oplata naftnog tankera projektirana primjenom nelinearne metode konačnih elemenata je uspoređena s konstrukcijom projektiranom pravilima za gradnju brodova za različite ICE notacije. Provedena je detaljna ekonomska analiza s ciljem da se utvrde potencijalne uštede u troškovima gradnje primjenom takvog postupka.

U radu se pokazalo da se najveća ušteda može postići primjenom novih pravila Finnish Maritime Associationa (FMA) i to bez primjene nelinearne strukturne analize, jer je omogućeno da se razmak uzdužnjaka poveća sa cca.0.45m na uobičajenih cca.0.8m. Nedostatak FMA pravila je obavezna primjena koljena između ukrepa okvirnih rebara i uzdužnjaka. Koljena se mogu izbjeći ukoliko se nelinearnom metodom konačnih elemenata pokaže da se iste maksimalne i trajne deformacije mogu postići i konstrukcijom bez koljena. Međutim, u tom je slučaju nužno povećavanje ili dimenzija ili kvalitete materijala uzdužnjaka čime se djelomično poništava pozitivan efekt ispuštanja koljena. Rezultati ekonomske analize pokazuju da se određena ušteda može postići, ali ne znatna. Najveća korist se ostvaruje za najnižu notaciju (ICE 1C) i to uslijed značajnog smanjenja debljine vanjske oplata.

Unatoč činjenici da se ne postiže značajna ekonomska ušteda, izbjegavanje zavarivanja suvišnih koljena može posredno imati pozitivan utjecaj na troškove održavanja broda u službi, jer se smanjuje broj zavora koji su potencijalna mjesta koncentracija naprezanja i stvaranja neželjenih pukotina. Također, važno je napomenuti da se primjenom neposrednog proračunskog postupka zajedno razmatraju oplata, uzdužnjaci, okvirna rebra i ukrepe te njihova interakcija, dok se primjenom preskriptivnih pravila svi ovi konstrukcijski elementi dimenzioniraju zasebno. Projektiranje ledom opterećene konstrukcije zasnovano na nelinearnoj metodi konačnih elemenata je prema tome racionalniji postupak koji dugoročno dovodi i do ekonomske uštede i do povećanja sigurnosti.

## 9. LITERATURA

- [1] F . D. HAYNES, "Effect of Temperature on the Strength of Snow- Ice," Department of the Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Corps of Engineers, CRRELReport 78-27, Hanover, New Hampshire, December 1978.
- [2] E. M. SCHULSON, Journal of the Minerals, Metals, Materials Society 51 (1999) 21
- [3] J . H. CURRIER and E. M. SCHULSON, Acta metal. 30 (1982) 1511.
- [4] [http://skola.gfz.hr/d3\\_1.htm](http://skola.gfz.hr/d3_1.htm)
- [5] <http://www.caperace.com/stories/where-do-icebergs-really-come-from/>
- [6] <http://www.athropolis.com/gloss.htm>
- [7] <http://www.scribd.com/doc/38541888/Geografija-mora>
- [8] [http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/HYDRO/drake/gallery/photos/jcr\\_pk.jpg](http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/HYDRO/drake/gallery/photos/jcr_pk.jpg)
- [9] <http://rashidfaridi.wordpress.com/2010/06/03/ice-floes-in-oceans/>
- [10] Det Norske Veritas, "Operation of Ships in Cold Climates with Emphasis on Tankers and the New Requirements ", November 2003
- [11] Bureau Veritas, "Rules for the Classification of Steel Ships, Part E: Additional Class Notations, Chapter 8: Ice Class" (NR 467.E3), April 2007
- [12] Bureau Veritas, "Rules for the Classification of Polar Class Ships" (NR 527), February 2007
- [13] Bureau Veritas, "Rules for the Classification of Steel Ships", Part E: Additional Class Notations, Chapter 10: Other Additional Class Notations" (NR 467.E2), April 2007
- [14] ABS, "Using Nonlinear Finite Element Method to Design Ship Structures for Ice Loads", 2004
- [15] Bureau Veritas, "Technical developments for safe navigation in arctic waters", Bulletin Technique, 2009
- [16] J.Abraham, "Plastic response of ship structure subjected to ice loading", September 2008
- [17] Finnish Maritime Administration, "Tentative Note for Application of Direct Calculation Methods for Longitudinally Framed Hull Structure", 30. June 2003
- [18] Finnish Maritime Administration, "Regulations on the structural design and engine output required of ships for navigation in ice", September 2002
- [19] International Association of Classifications Societis, "IACS Unified requirements concerning Polar Class" October 2007
- [20] Transport Canada, "Arctic Ice Regime Shipping System" (TP 12259); June 2008
- [21] Gorshkovsky, A.M., Chief of the Administration of the NRS; "Review of the Guide to Navigation through the Northern Sea Route" A.G. Gorshkovsky
- [22] Baltic Icebreaking Management; internet adresa [www.baltice.org](http://www.baltice.org)
- [23] ABS, " Guidance Notes on Ice Class", 2005
- [24] P. Kujala , "Safety of ice-strengthened shell structures of ship navigating in the Baltic Sea"

## PRILOG I

## Kontrola rezultata analize alternativnog projekta oplata boka [24]

Kontrola se provodi pomoću polu-analitičkog postupka opisanog u članku "Safety of ice-strengthened shell structures of ship navigating in the Baltic Sea", P. Kujala. U postupku se preko trajnih deformacija oplata određuje opterećenje leda.

Tlakovi leda koji su dobiveni alternativnim projektom oplata boka i kojima se opteretila oplata modela u NMKE u programu Femap s Nastanom i tlakovi leda koji se računaju preko dobivenih trajnih deformacija oplata čiji je postupak opisan dalje u tekstu su uspoređeni u tablici I.3.

U procjenjivanju opterećenja koji uzrokuje trajne deformacije na vanjskoj oplati koristi se pristup koji je razvio Hayward (2001). Pristup se temelji na opsežnim proračunima metode konačnih elemenata pomoću kojih bi se odredila korekcija  $f_{DT}$ , koja uzima u obzir utjecaj visine opterećenja na trajnu deformaciju.

Prema Haywardu (2001) linijsko opterećenje se računa u ovisnosti o omjeru  $w_p / t$ .

Ako vrijedi  $w_p / t \leq 1$ , tada se linijsko opterećenje računa prema izrazu:

$$q = \frac{p_c h_c}{f_{DT}} \left[ 1 + \frac{w_p^2}{3t^2} \left( \frac{\zeta_0 + (3 - 2\zeta_0)^2}{3 - \zeta_0} \right) \right],$$

a ako je  $w_p / t \geq 1$ , prema izrazu:

$$q = \frac{2p_c h_c w_p}{t f_{DT}} \left[ 1 + \frac{\zeta_0 (2 - \zeta_0)}{3 - \zeta_0} \left( \frac{t^2}{3w_p^2} - 1 \right) \right]$$

gdje je:

$t$  : debljina vanjske oplata

$w_p$  : trajna deformacija na oplati

$h_c$  : visina opterećenja

$p_c$  : granični tlak koji uzrokuje popuštanje materijala u obliku dvostrukog Y i računa se po izrazu (Jones, 1972)

$$p_c = \frac{48M_p}{s^2 \left( \sqrt{3 + \left( \frac{s}{l} \right)^2} - \frac{s}{l} \right)^2}$$

$M_p$  : moment plastičnosti oplata, računa se prema izrazu

$$M_p = R_{eH} \frac{t^2}{4}$$

$R_{eH}$  : granica razvlačenja brodograđevnog čelika

$\zeta_0$  : parametar oblika

$$\zeta_0 = \frac{s}{l} \left( \sqrt{3 + \left( \frac{s}{l} \right)^2} - \frac{s}{l} \right)$$

$f_{DT}$  : koeficijent korekcije se računa prema izrazu

$$f_{DT} = -0.1330x_T^2 + 0.6701x_T$$

gdje je  $x_T = \frac{h_c}{s} \left( \frac{s}{t} \right)^{0.2}$

$s$  : razmak uzdužnjaka

$l$  : raspon uzdužnjaka

Izračunate vrijednosti su dane u slijedećim tablicama.

**Tablica I.1**

|                |      |
|----------------|------|
| $s, \text{ m}$ | 0.8  |
| $l, \text{ m}$ | 3.64 |
| $s / l$        | 0.22 |
| $\zeta_0$      | 0.34 |

**Tablica I.2 Određivanje opterećenje leda preko trajnih deformacija oplata**

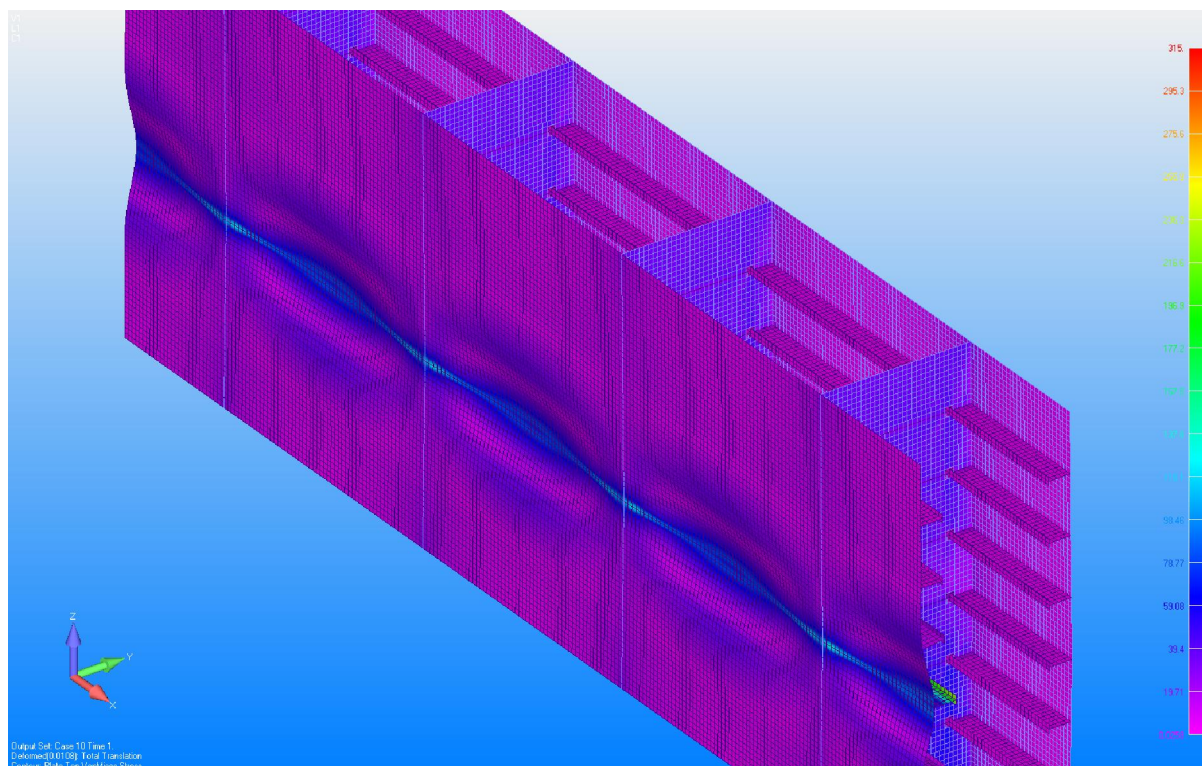
| Klasa leda | $h$  | $t$  | $w_p$ | $R_{eH}$          | $w_p / t$ | $x_T$ | $f_{DT}$ | $M_p$    | $p_c$             | $q$               | $p$               |
|------------|------|------|-------|-------------------|-----------|-------|----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
|            | m    | mm   | mm    | N/mm <sup>2</sup> |           |       |          | N        | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> |
| IA         | 0.3  | 28.0 | 15.0  | 355               | 0.54      | 0.73  | 0.42     | 69580.00 | 2.24              | 1932.18           | 6.44              |
| IB         | 0.25 | 23.5 | 14.0  | 355               | 0.60      | 0.63  | 0.37     | 49012.19 | 1.58              | 1336.30           | 5.35              |
| IC         | 0.22 | 20.0 | 7.5   | 355               | 0.38      | 0.58  | 0.34     | 31500.00 | 1.01              | 720.07            | 3.27              |

**Tablica I.3 Usporedba iznosa tlakova dobivenih proračunom po Hywardu i prema alternativnom projektu oplata boka prema ABS-u**

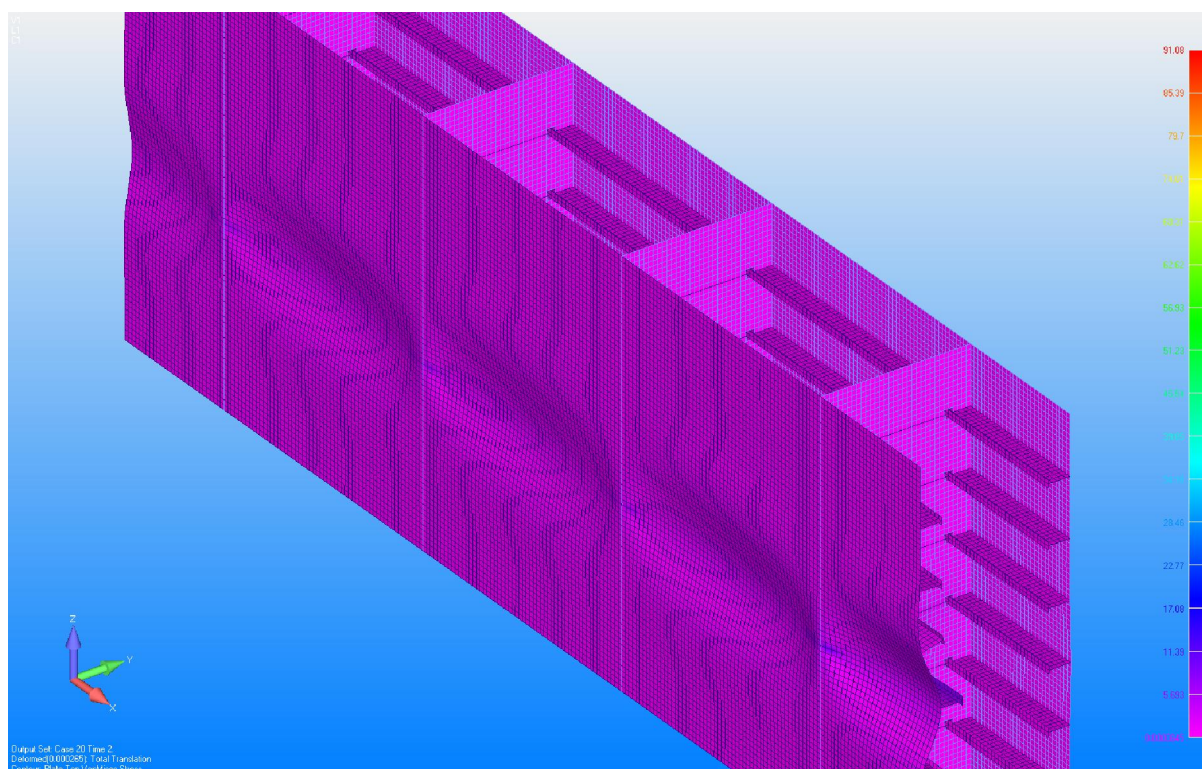
|            | $h$  | $p$ (tabl.9.2)    | $p$ (tabl.6.9)    | Razlika tlakova |
|------------|------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Klasa leda | m    | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup> | %               |
| IA         | 0.30 | 6.44              | 5.64              | 12.42           |
| IB         | 0.25 | 5.35              | 4.30              | 19.47           |
| IC         | 0.22 | 3.27              | 2.93              | 10.53           |

## PRILOG II

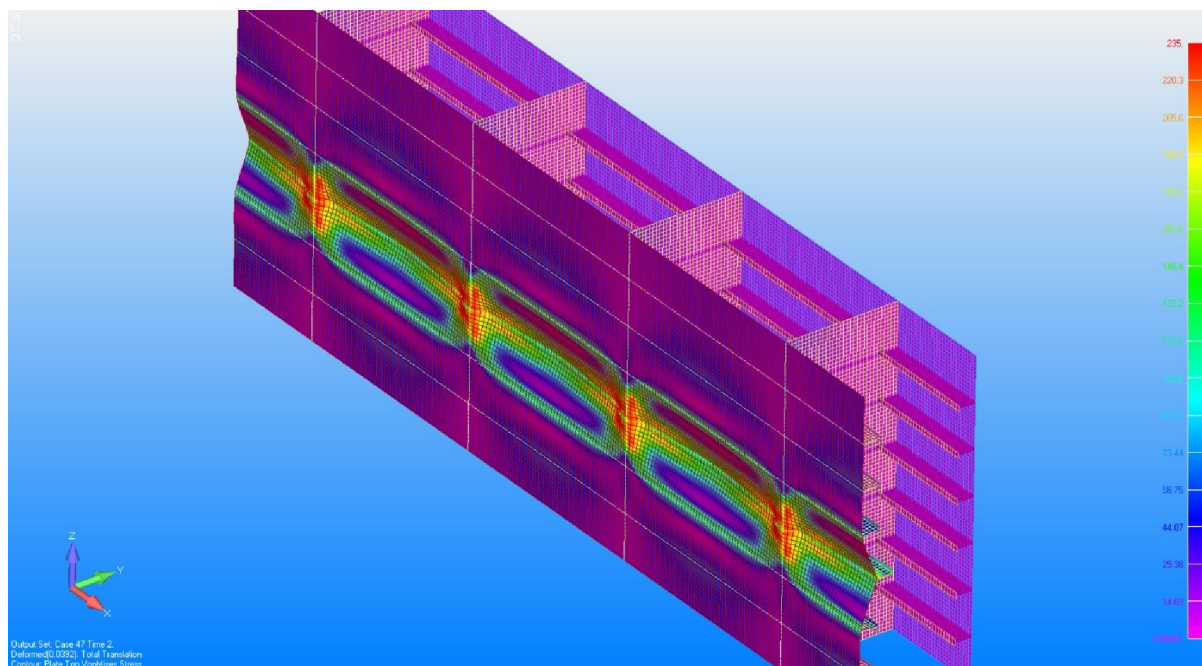
## II.1 Von Misesova naprežanja na deformiranim modelima koji su opterećeni linijskim opterećenjem



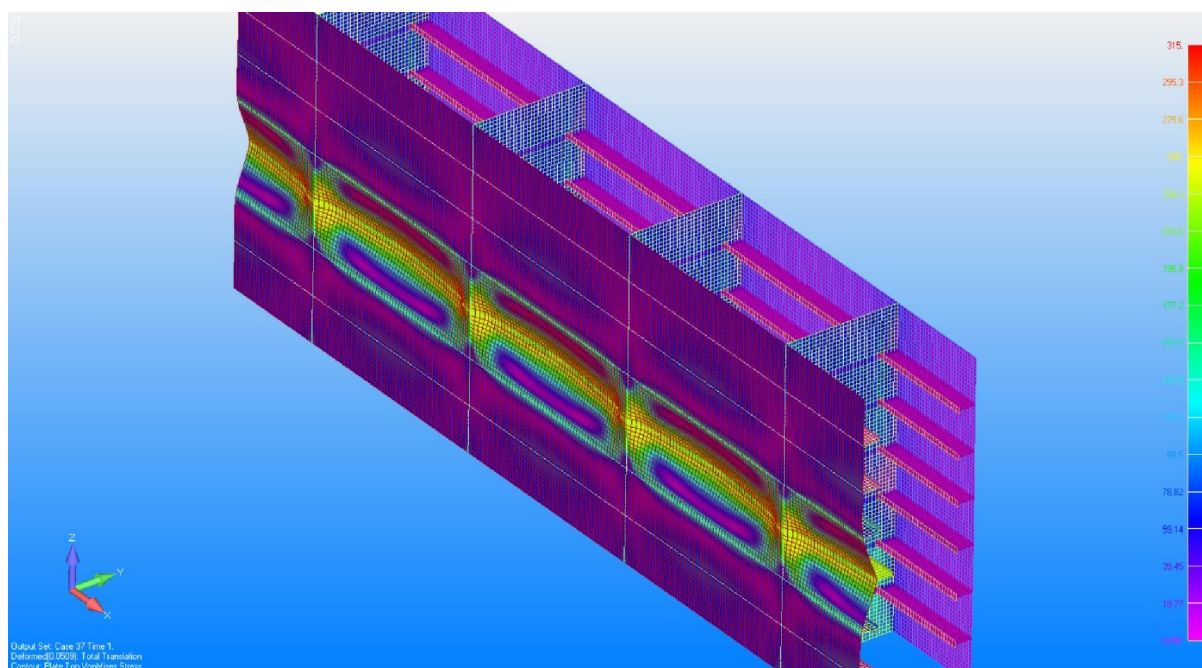
Slika II.1 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1C\_ojačan" pri maksimalnom opterećenju



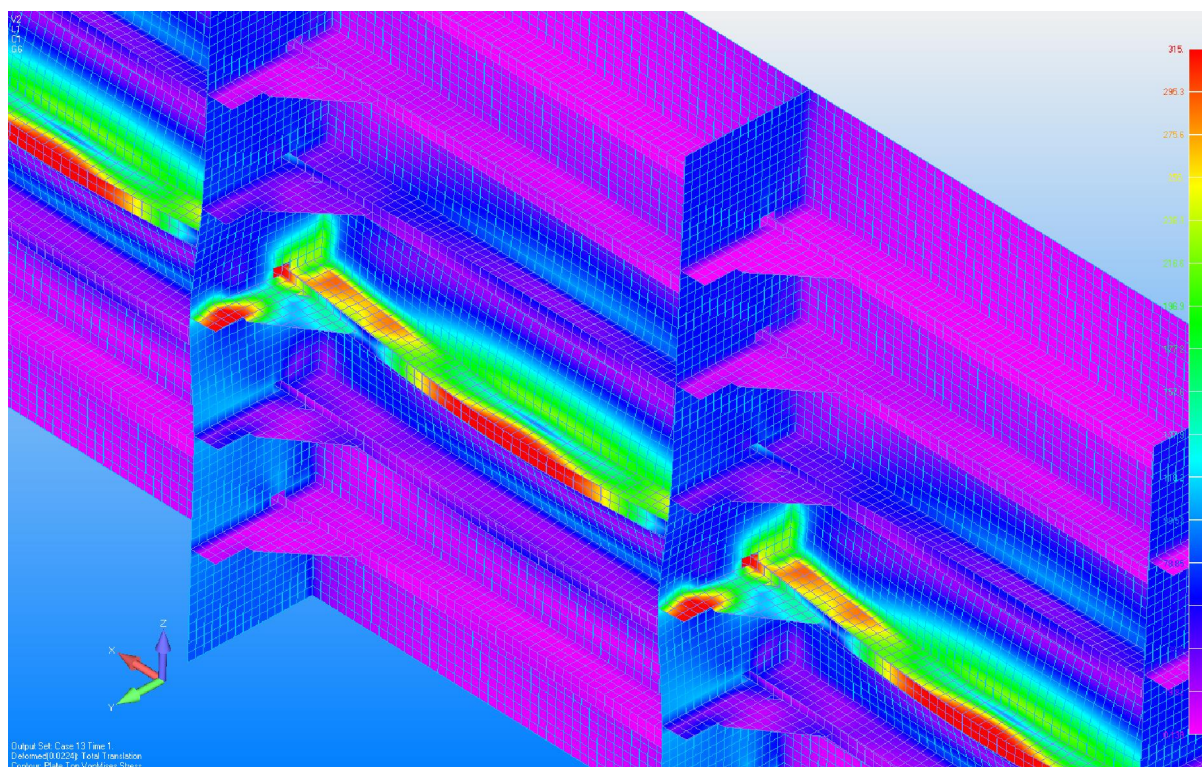
Slika II.2 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1C\_ojačan" nakon rasterećenja



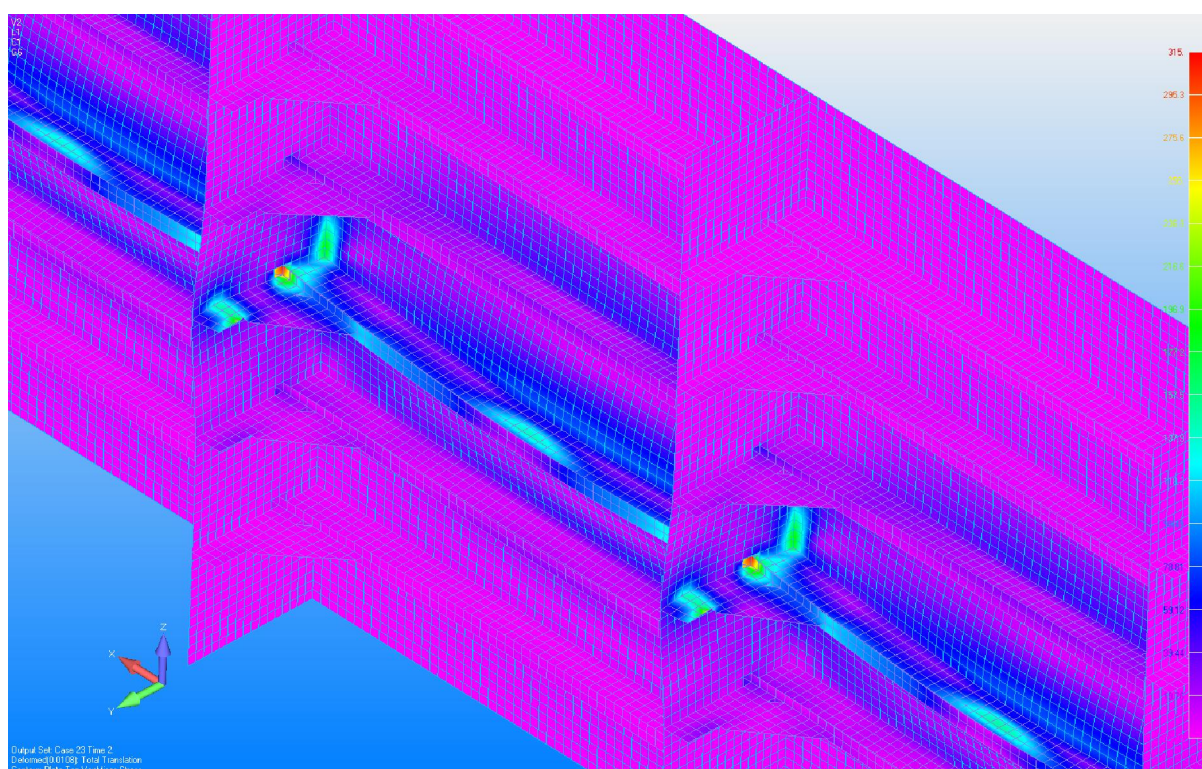
**Slika II.3 Von Misesova naprezanja na deformiranom osnovnom modelu "1B " pri maksimalnom opterećenju**



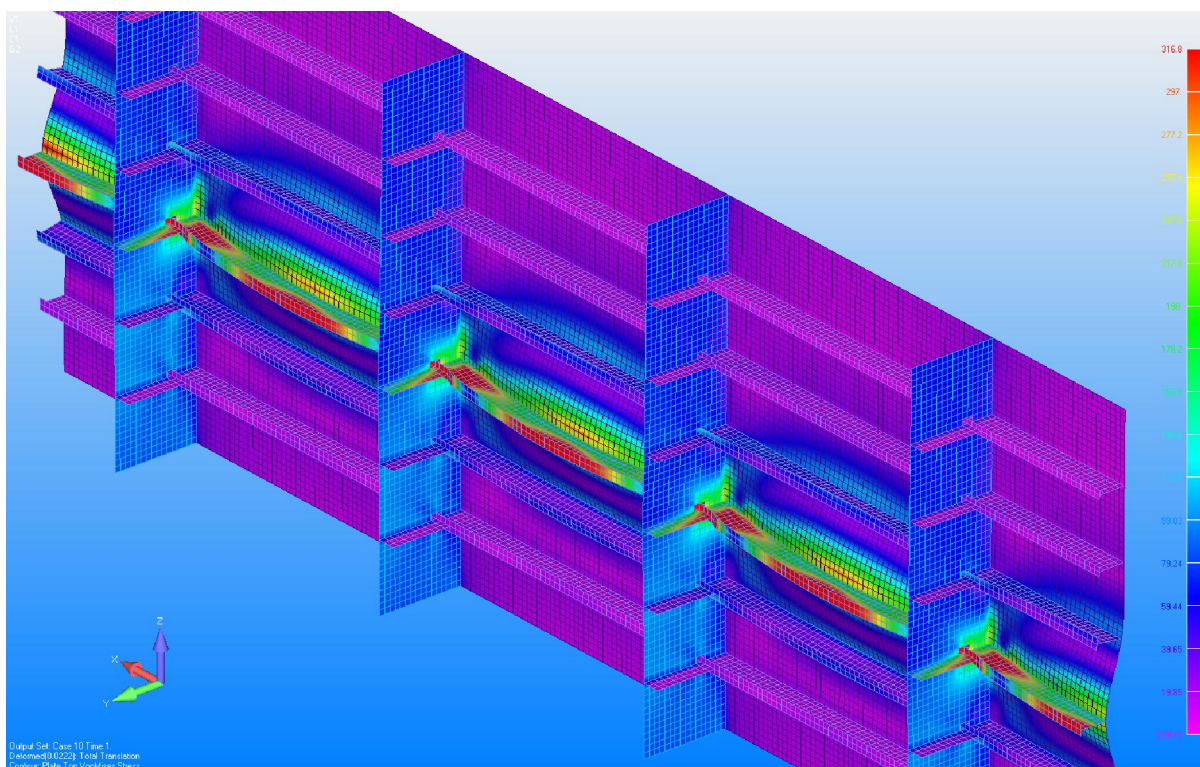
**Slika II.4 Von Misesova naprezanja na deformiranom osnovnom modelu "1B" nakon rasterećenja**



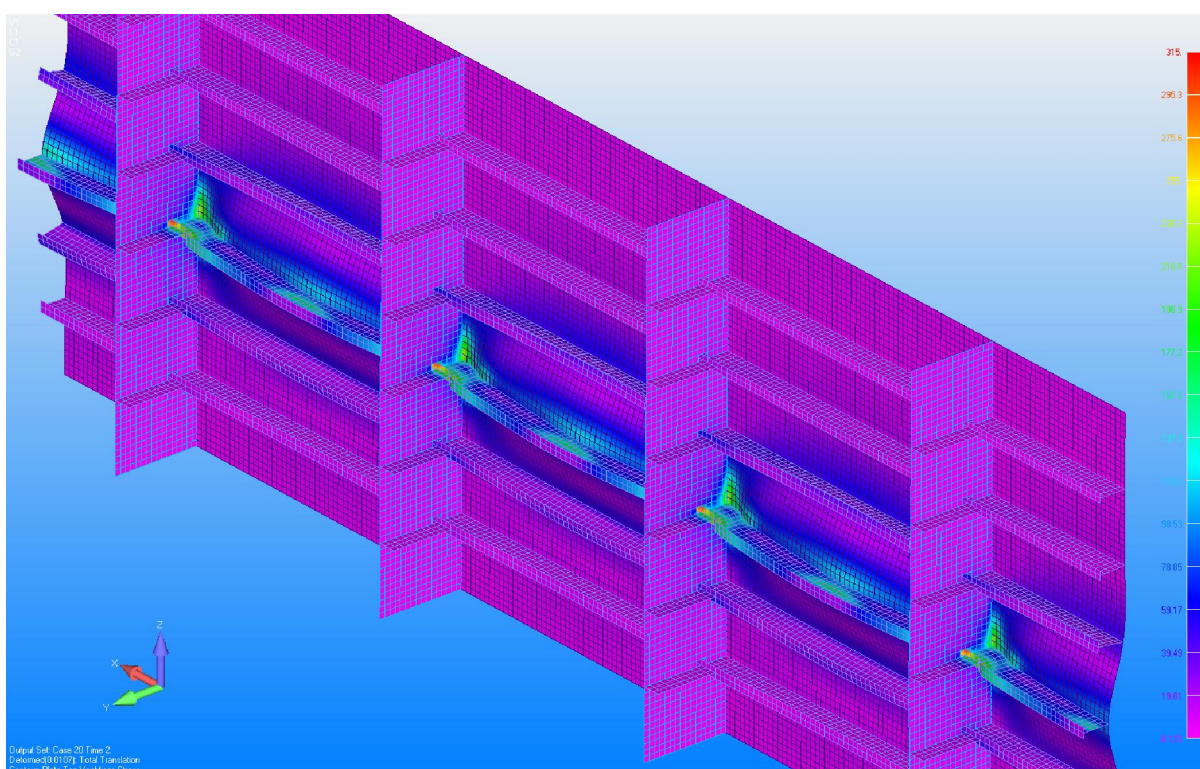
**Slika II.5 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_koljena" pri maksimalnom opterećenju**



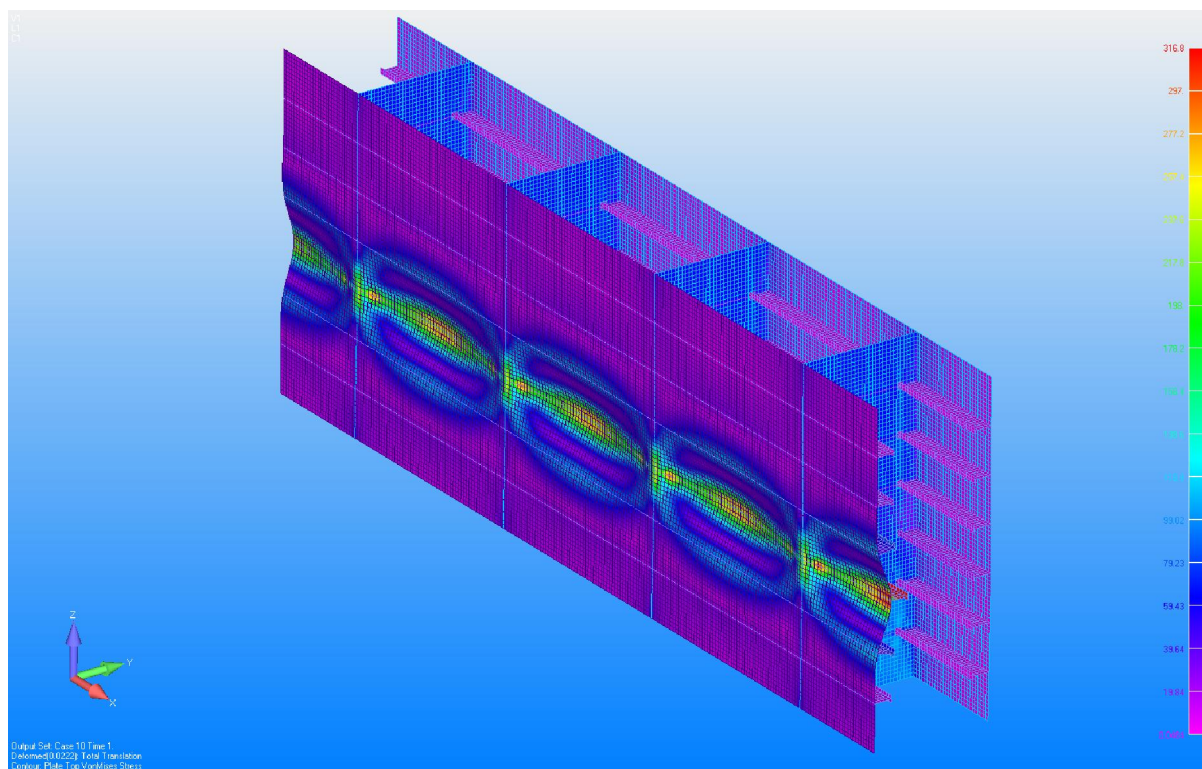
**Slika II.6 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_koljena" nakon rasterećenja**



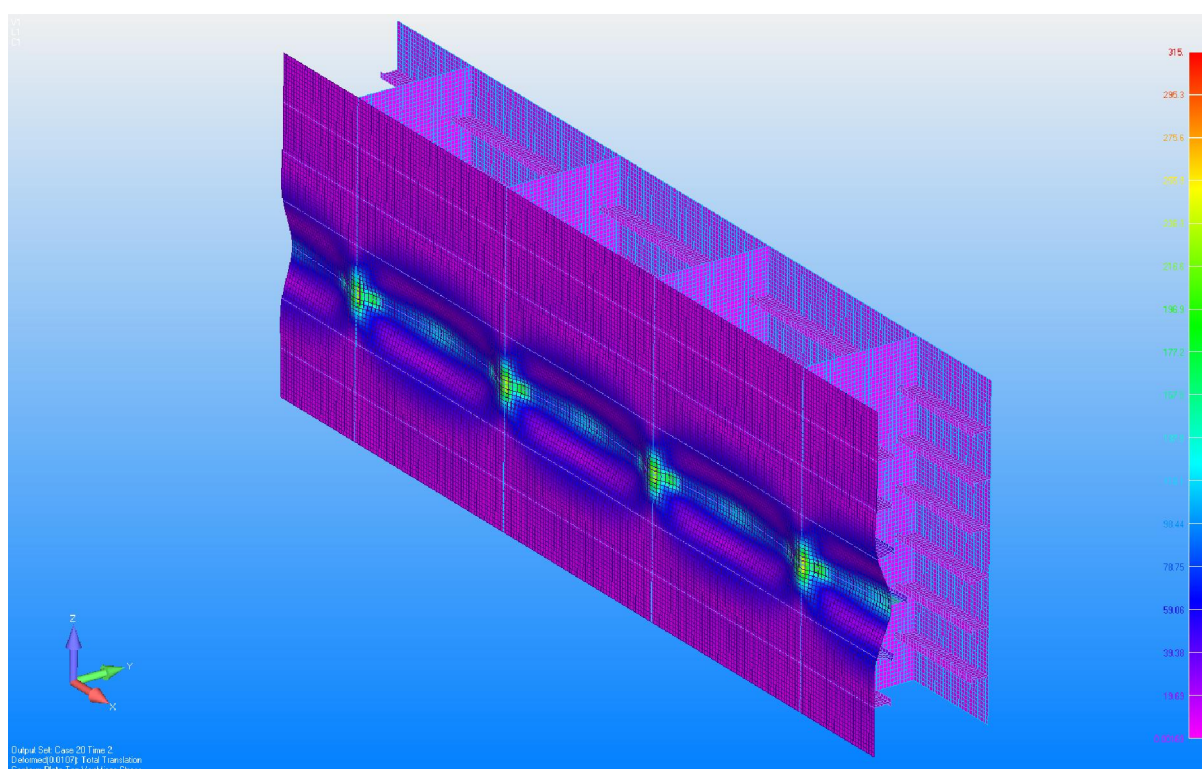
**Slika II.7 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_ABS" pri maksimalnom opterećenju**



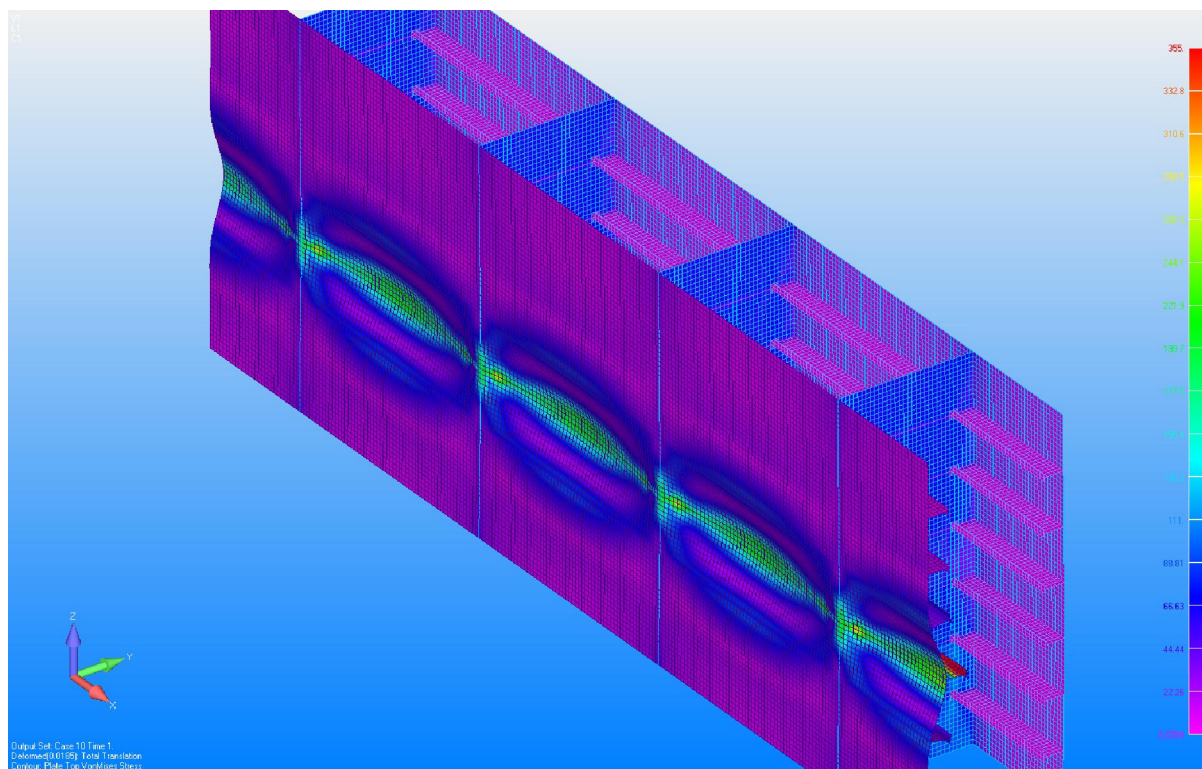
**Slika II.8 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_ABS" nakon rasterećenja**



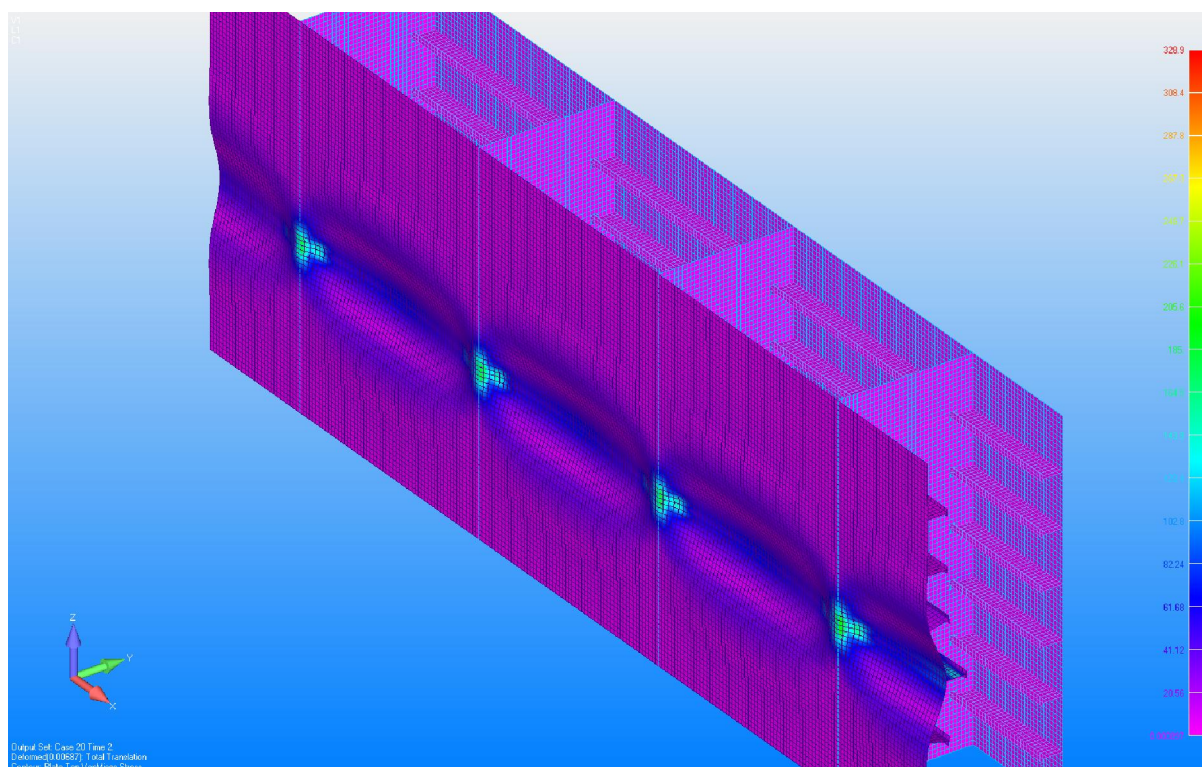
**Slika II.9 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_ABS" pri maksimalnom opterećenju**



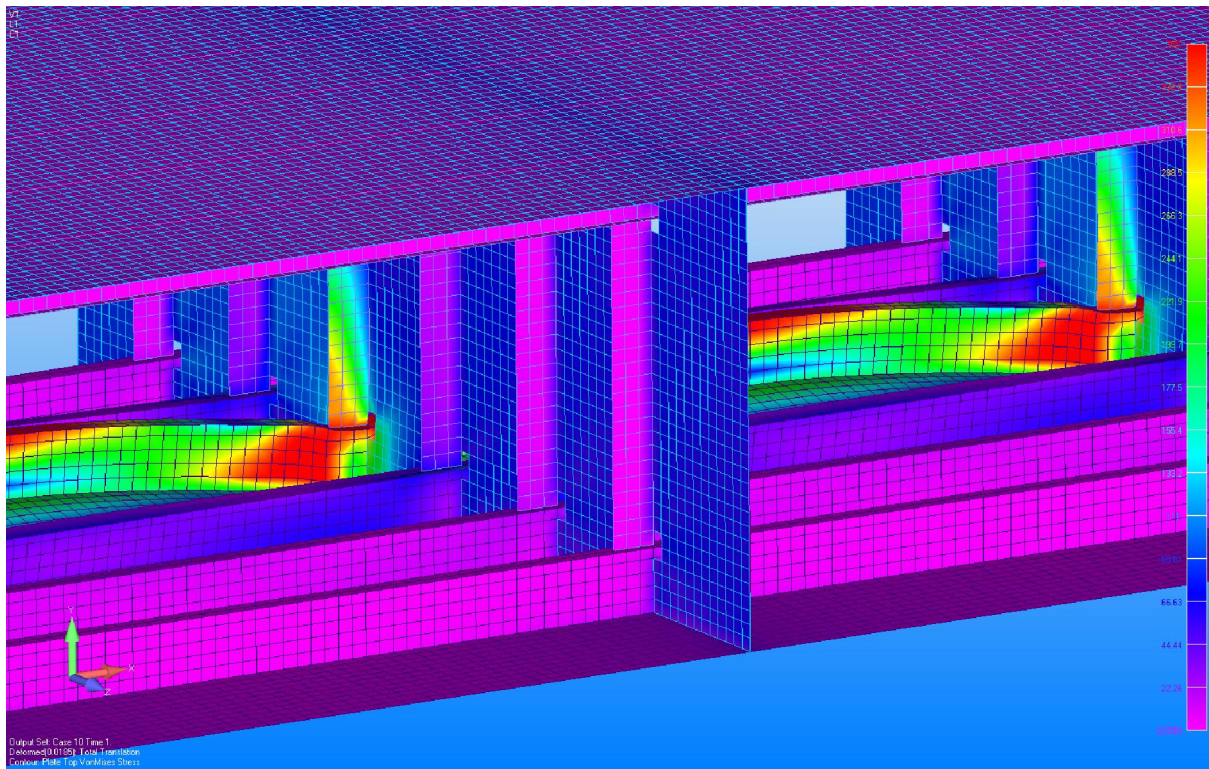
**Slika II.10 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_ABS" nakon rasterećenja**



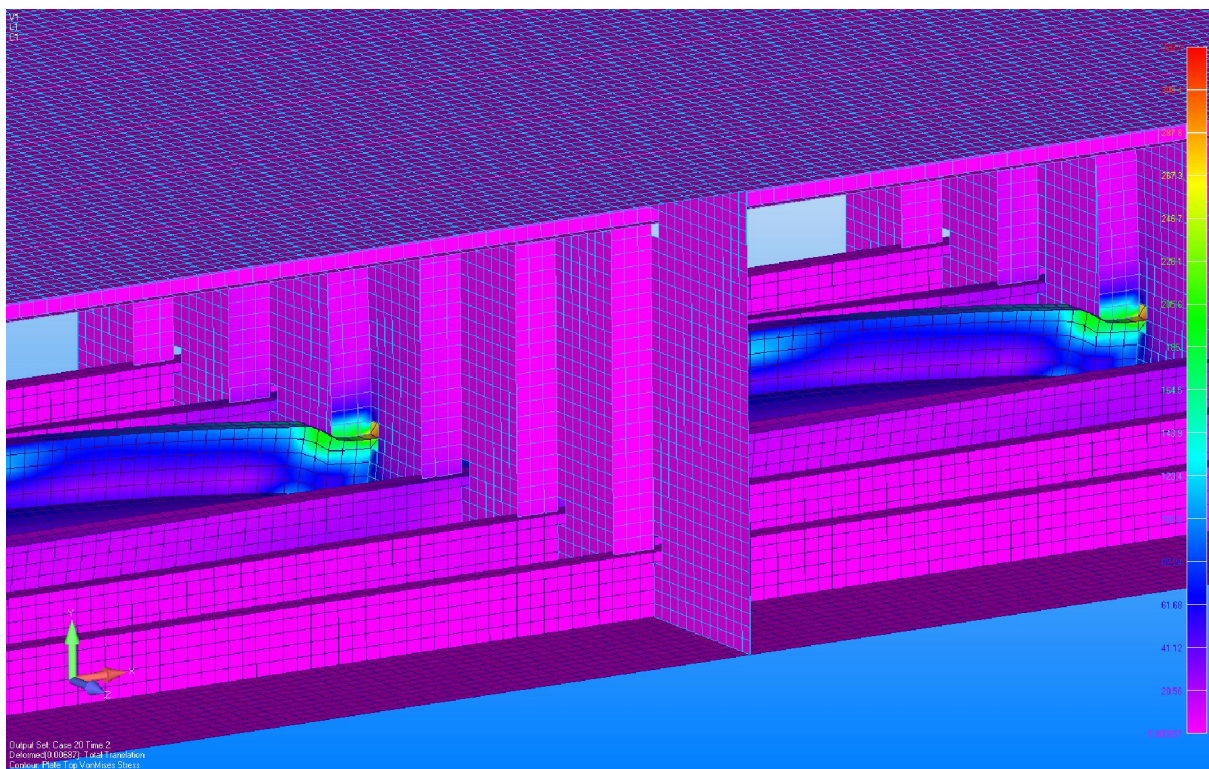
**Slika II.11 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1B\_ojačan" pri maksimalnom opterećenju**



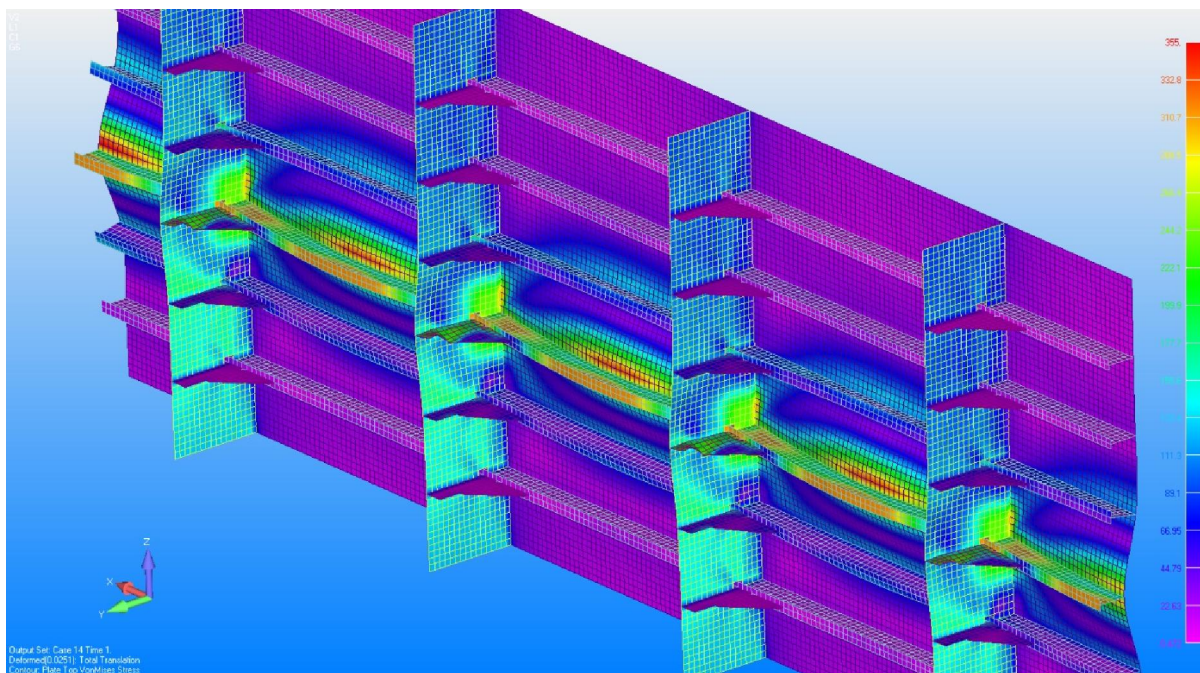
**Slika II.12 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1B\_ojačan" nakon rasterećenja**



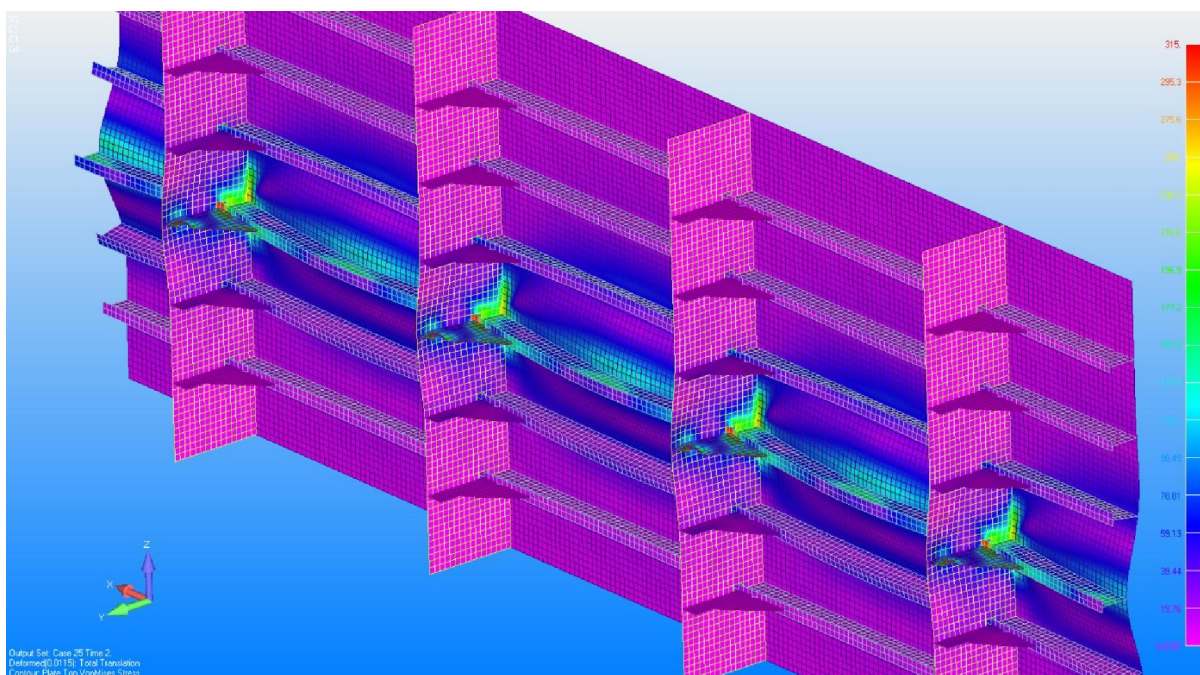
**Slika II. 13 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_ojačan" pri maksimalnom opterećenju**



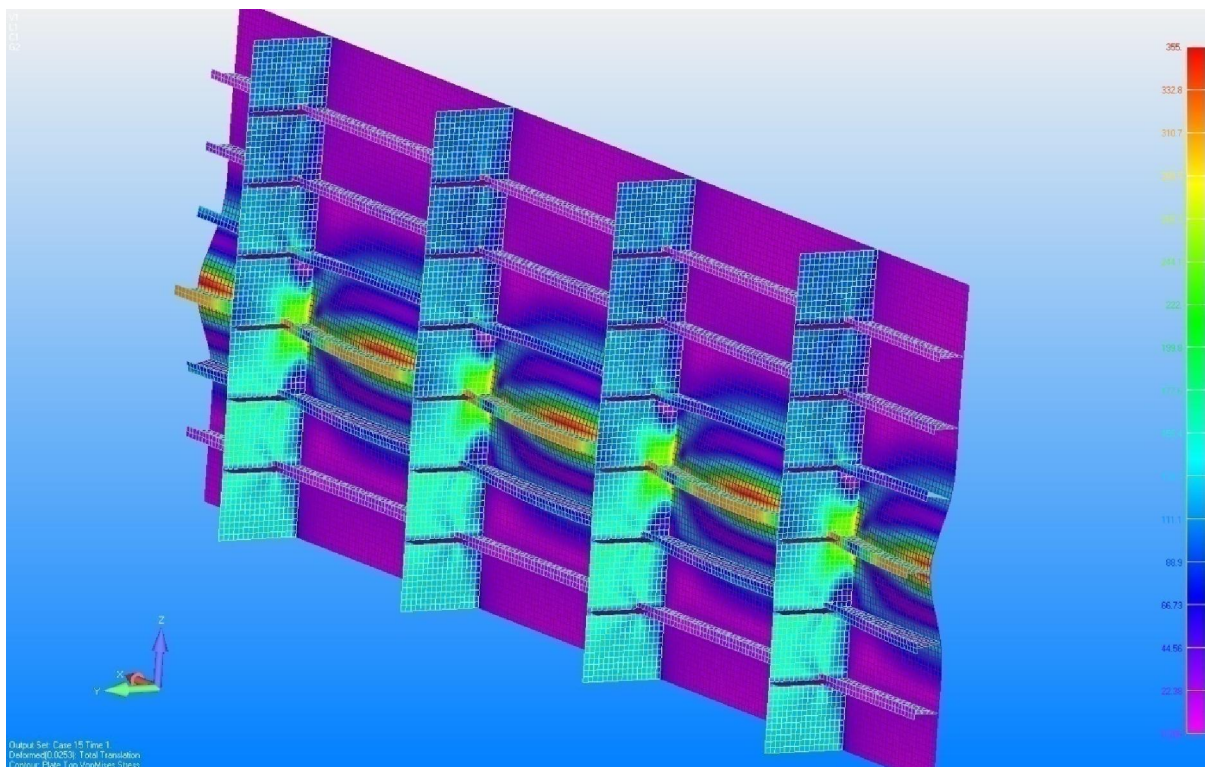
**Slika II.14 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1B\_ojačan" nakon rasterećenja**



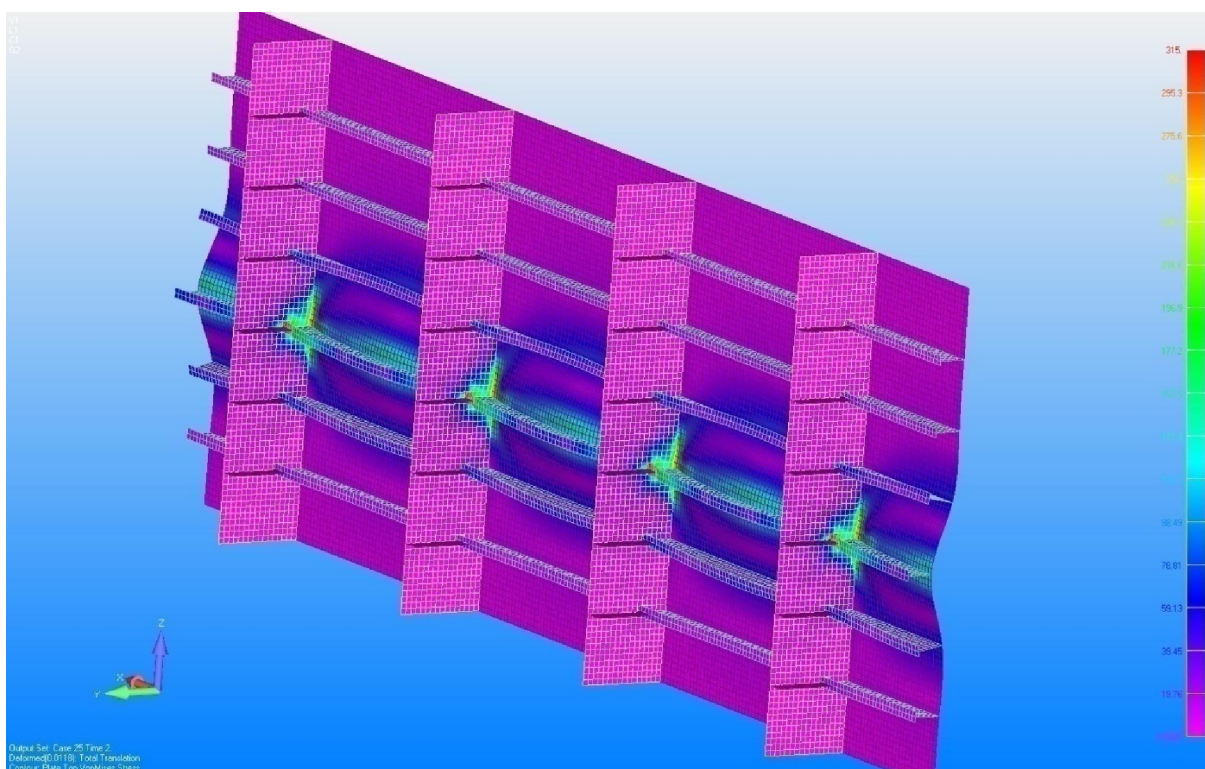
**Slika II.15 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1A\_koljena" pri maksimalnom opterećenju**



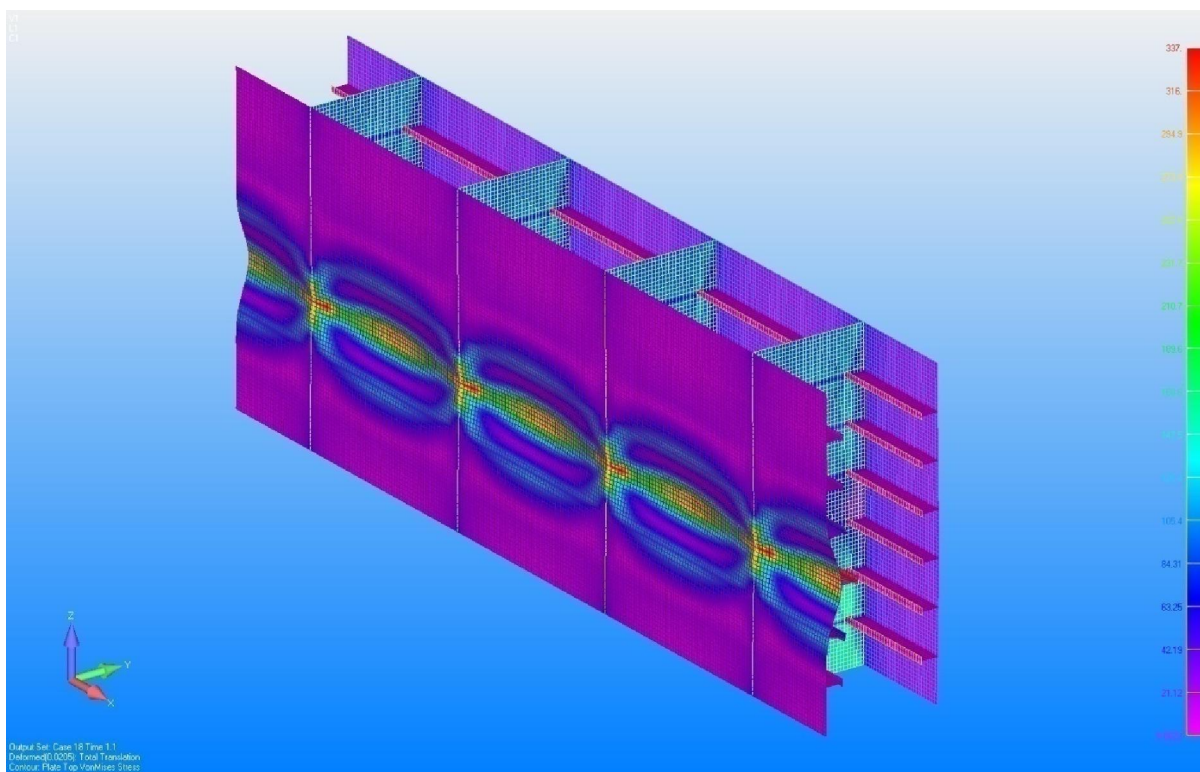
**Slika II.16 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1A\_koljena" nakon rasterećenja**



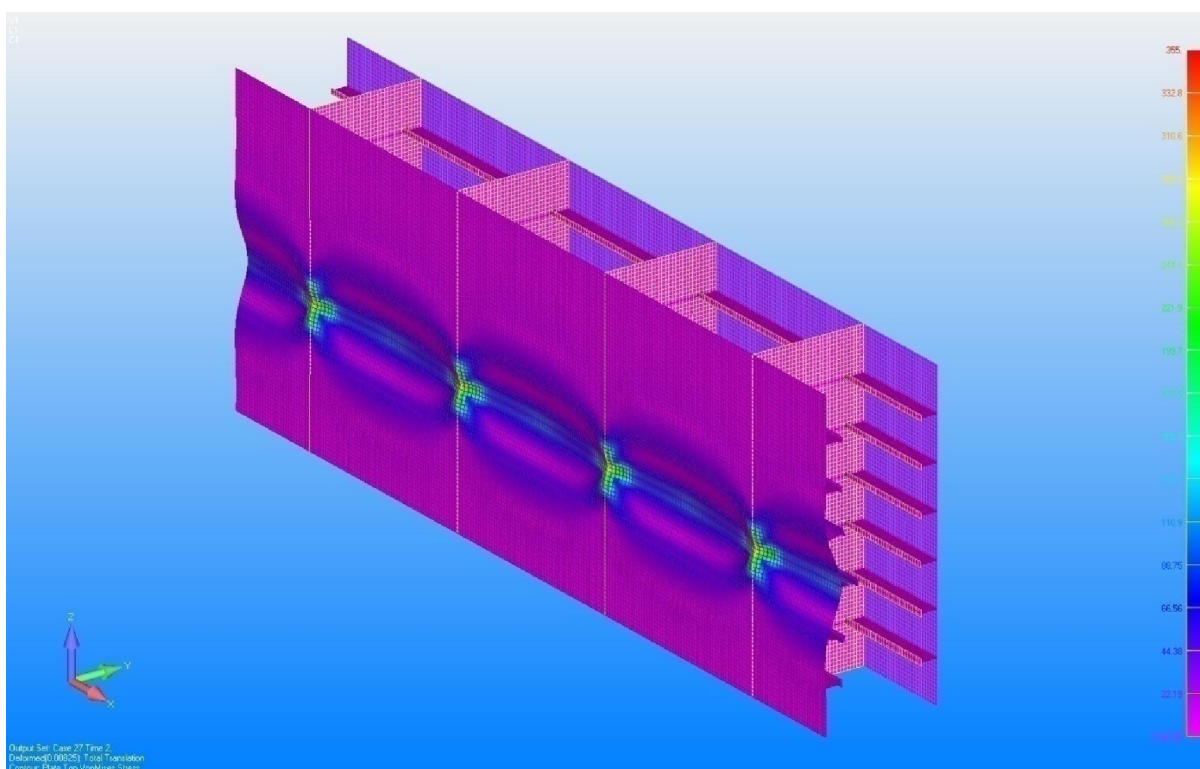
**Slika II.17** Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A\_ABS" pri maksimalnom opterećenju



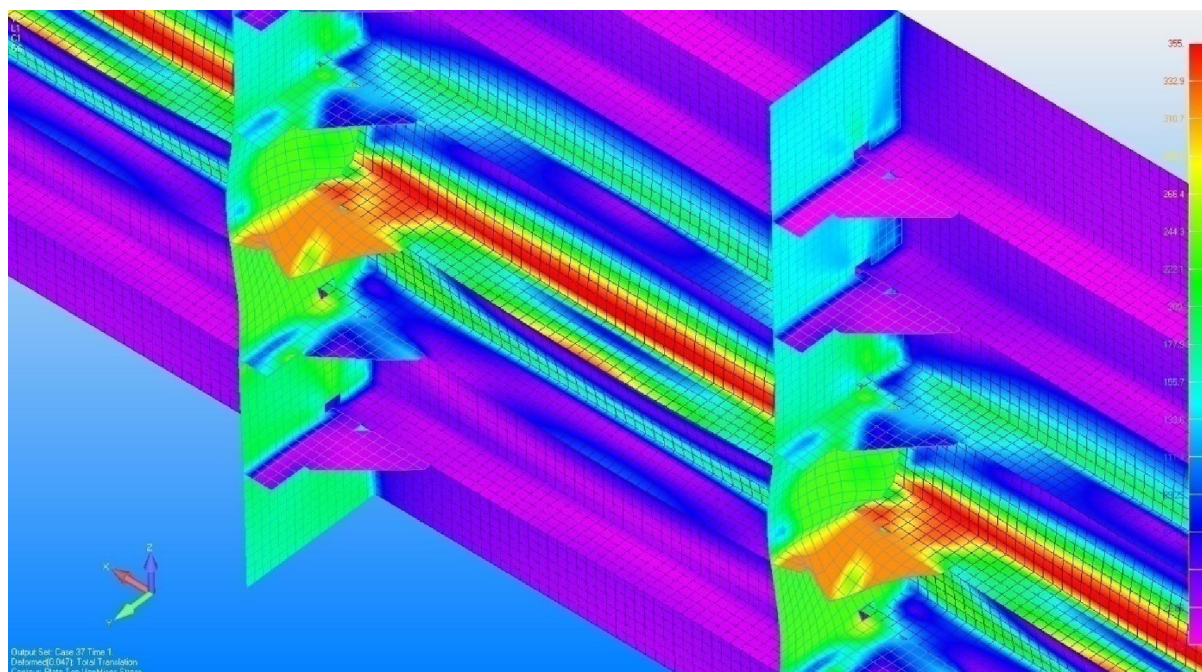
**Slika II.18** Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A\_ABS" nakon rasterećenja



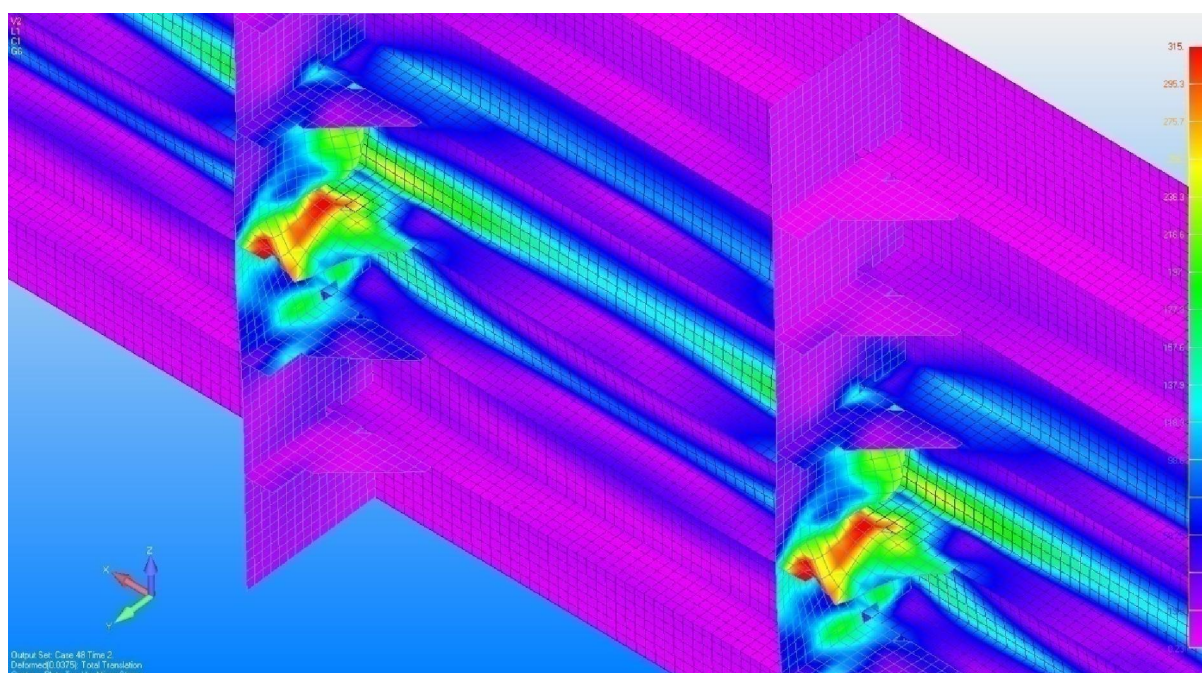
**Slika II.19 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A\_ojačan" pri maksimalnom opterećenju**



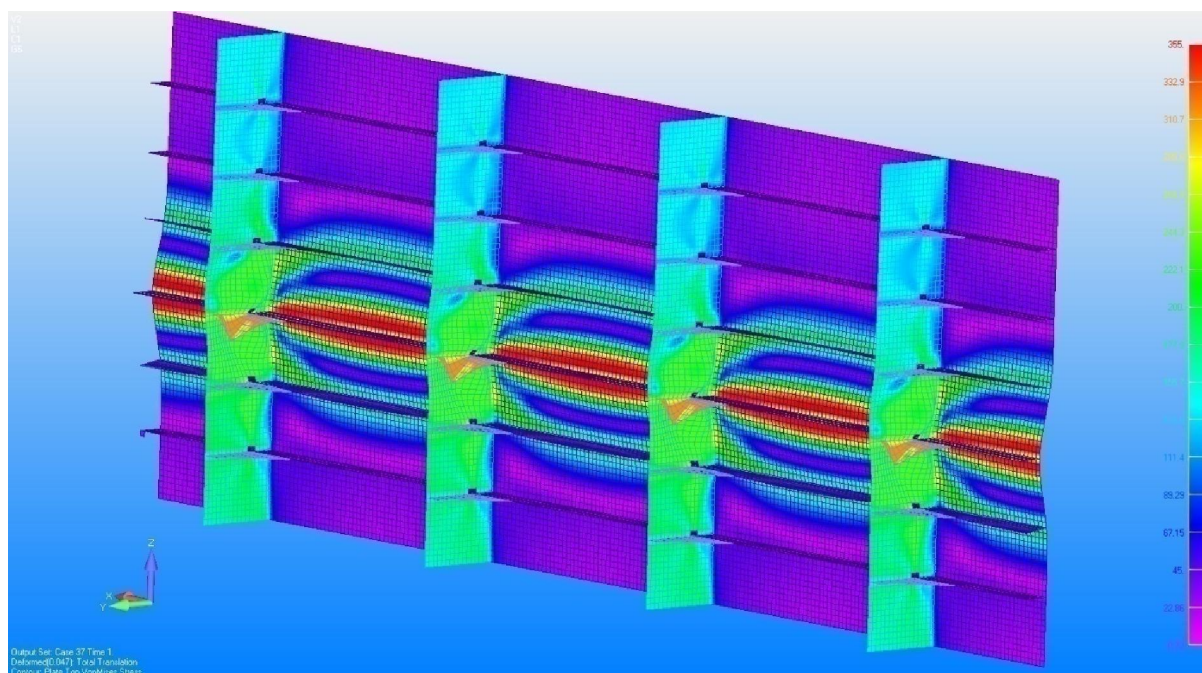
**Slika II.20 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1A\_ojačan" nakon rasterećenja**



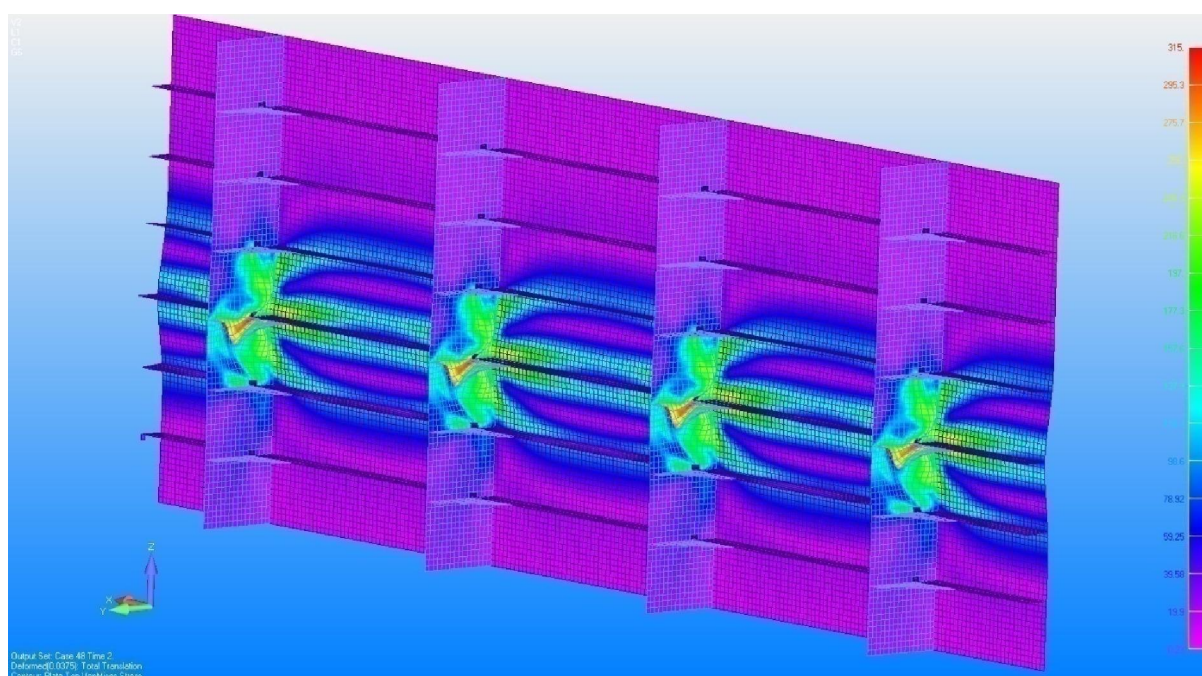
**Slika II.21 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1AS\_koljena" pri maksimalnom opterećenju**



**Slika II.22 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1AS\_koljena" nakon rasterećenja**

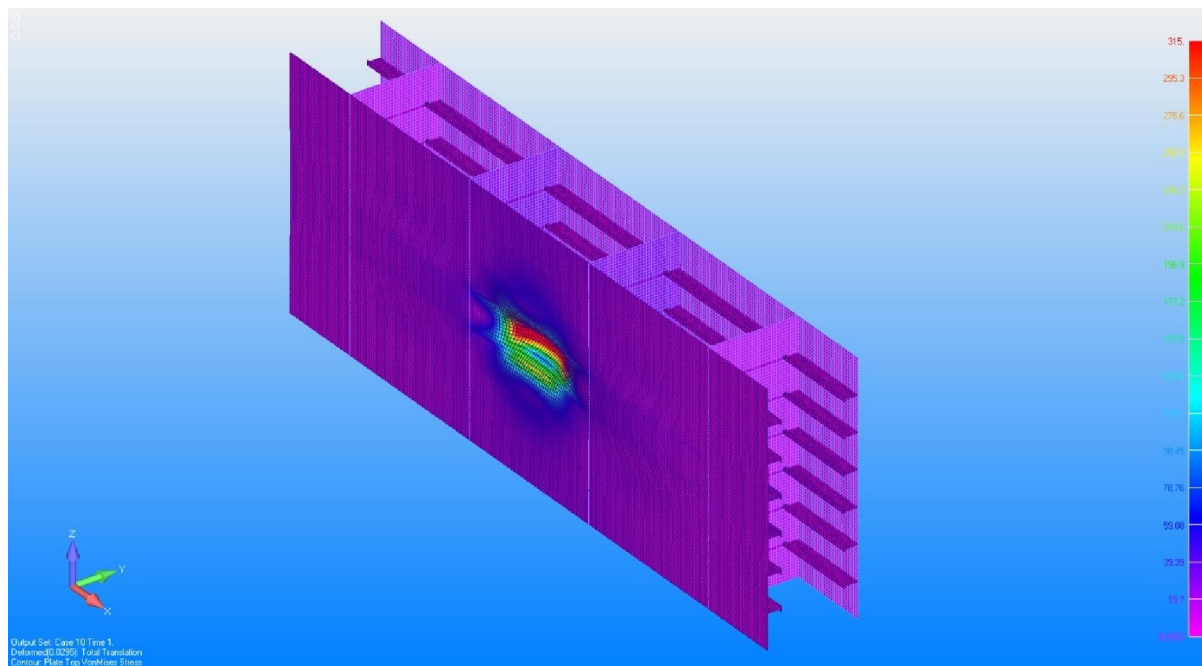


**Slika II.23 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1AS\_koljena" pri maksimalnom opterećenju**

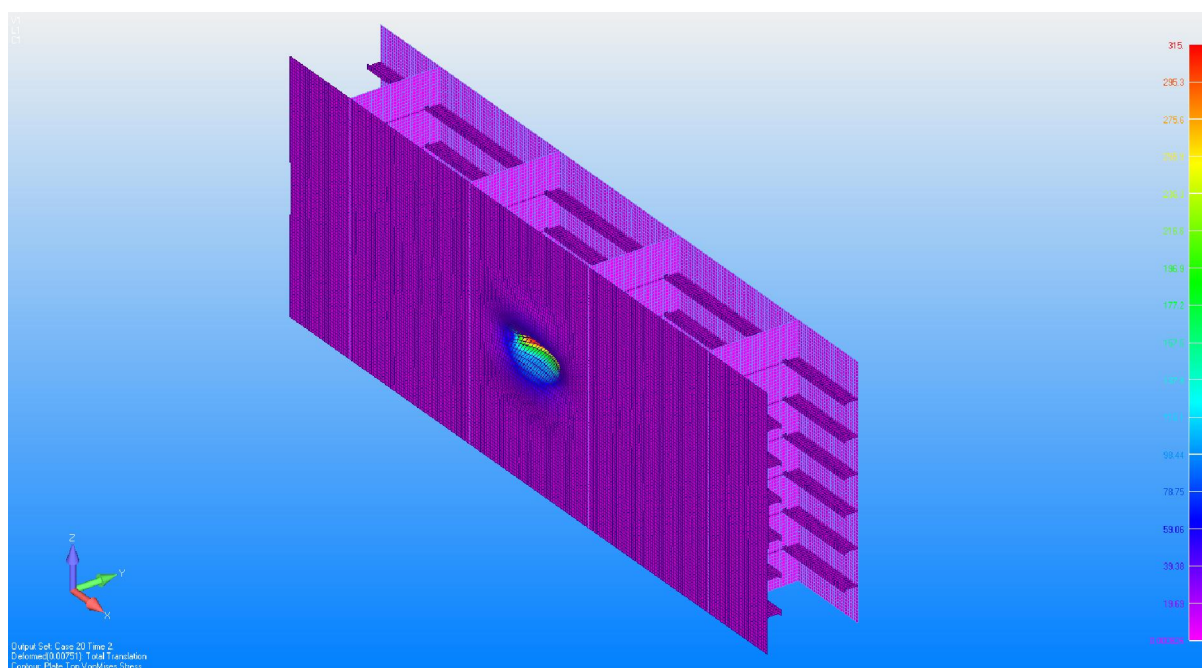


**Slika II.24 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1AS\_koljena" nakon rasterećenja**

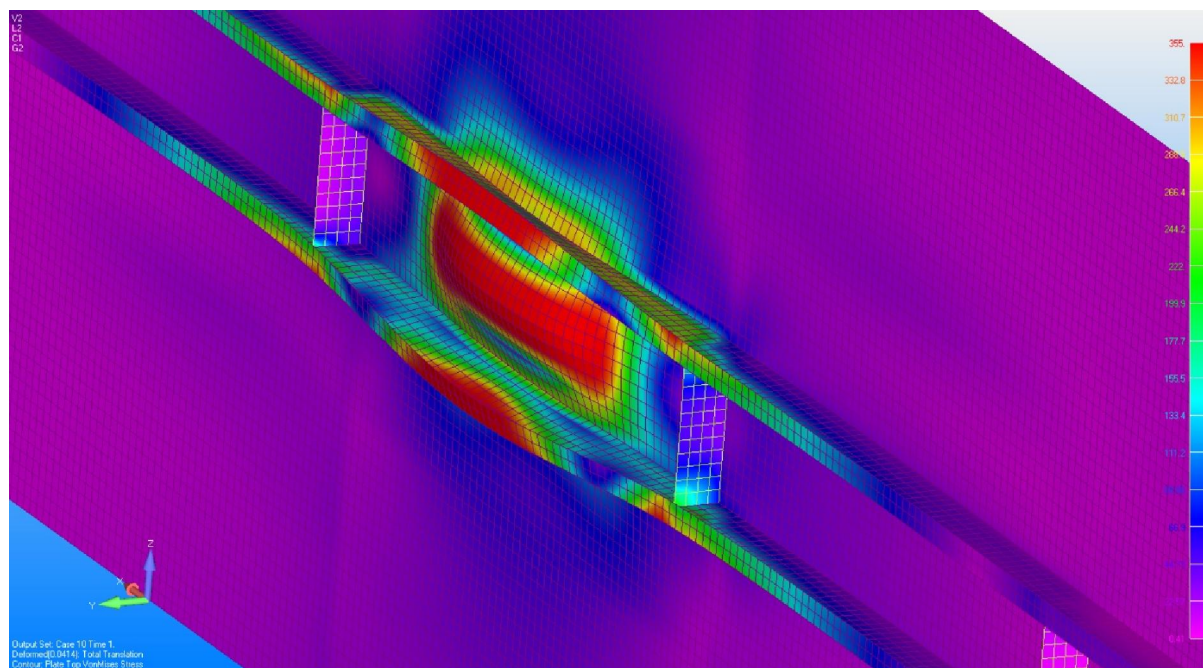
## II.2 Von Misesova naprezanja na deformiranim modelima koji su opterećeni površinskim opterećenjem



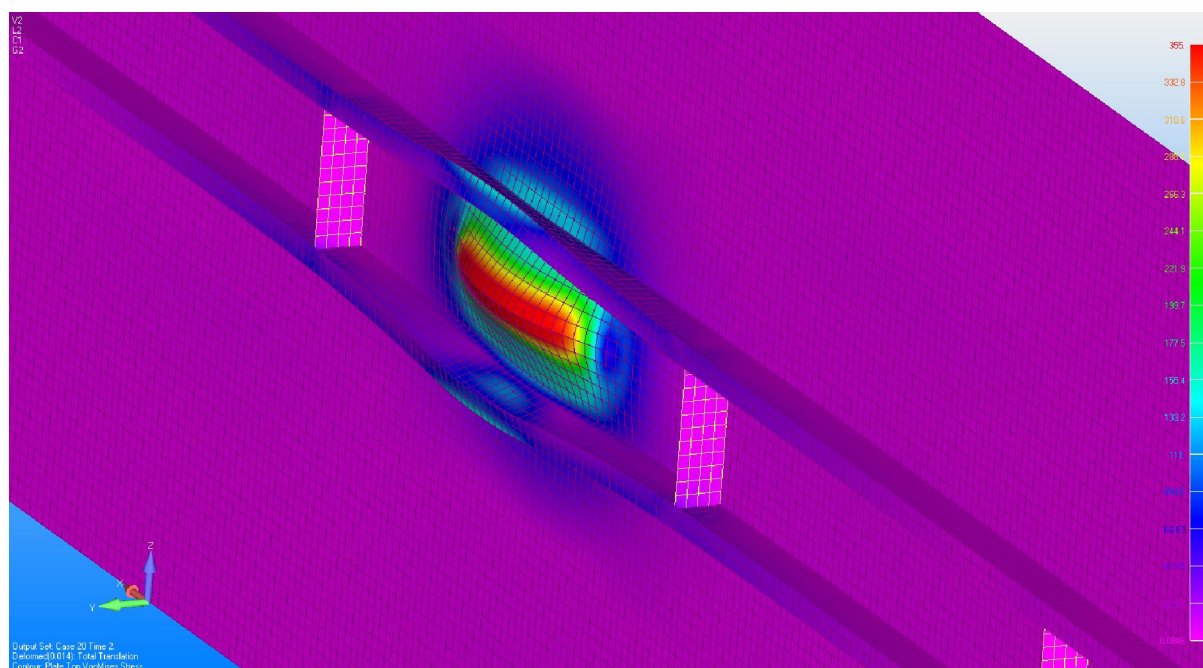
Slika II.25 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1C" pri maksimalnom opterećenju



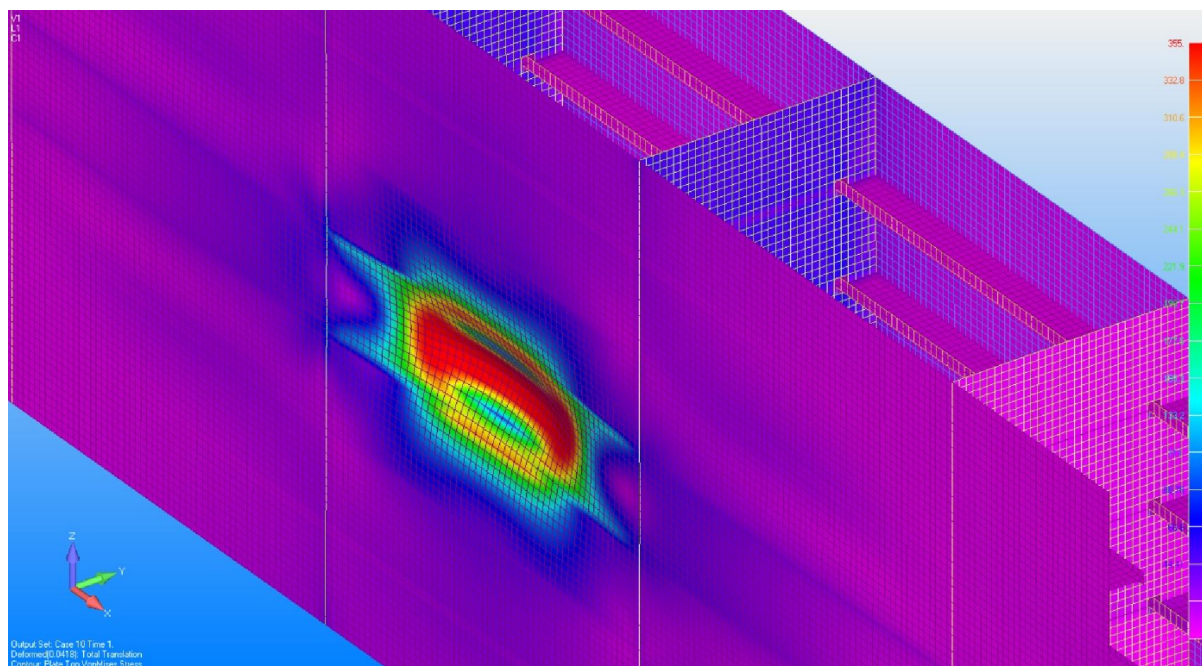
Slika II.26 Von Misesova naprezanja na deformiranom modelu "1C" nakon rasterećenja



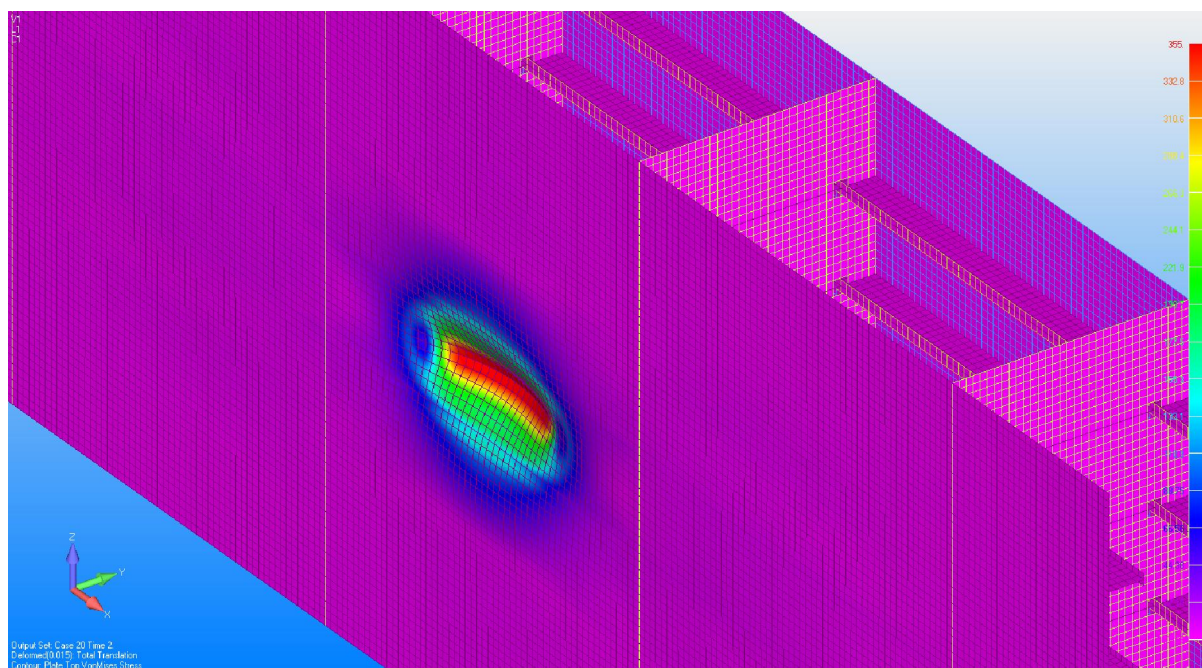
**Slika II.27 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1B" pri maksimalnom opterećenju**



**Slika II.28 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1B" nakon rasterećenja**



**Slika II.29 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1A" pri maksimalnom opterećenju**



**Slika II.30 Von Misesova naprežanja na deformiranom modelu "1A" nakon rasterećenja**