

Igor Marušić, dipl. ing.
Elektromehanika d.o.o.
Miroslava Krleže 4, 51000 Rijeka, Hrvatska
Doc. dr. sc. **Tomislav Mrakovčić**, dipl. ing.
Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci
Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Hrvatska

Analiza čvrstoće poluovješnog kormila

Sažetak

Konstruktivske karakteristike kormila kao i kompletne brodske strukture definirane su pravilima klasifikacijskih društava. Budući da je kormilo od vitalne važnosti za sigurnu plovidbu i pouzdano upravljanje brodom, njegova je konstrukcija vrlo robusna i kruta.

Kako bi se ispitalo koji je dio konstrukcije kormila najviše opterećen i koliko je to opterećenje, u ovom je radu provedena analiza čvrstoće poluovješnog kormila broda pomoću računalne simulacije primjenom metode konačnih elemenata (MKE).

U ovu je analizu uključen i rog kormila kao dio strukture broda koji, također, preuzima dio opterećenja. Kontaktne površine u zglobovima lista i roga kormila te ležaja struka kormila opisane su kontaktnim elementima. Provedbom računalne simulacije dobivene su vrijednosti naprezanja i deformacija strukture kormila te kontaktni pritisci u ležajevima struka i štenca kormila.

Dobiveni rezultati ukazuju da su naprezanja strukture kormila niža od dopuštenih te da je ona dovoljno čvrsta da podnese znatno veće opterećenje od projektne, te se isti zaključak može primijeniti i na ležajeve kormila. Primjenom ovakvih analiza moguće je ukazati na dijelove kormila koji zahtijevaju veću pozornost pri projektiranju, ali i na dijelove kormila koje je moguće izvesti od limova manje debljine čime se postiže ušteda materijala i smanjuje ukupna masa kormila uz jednaku pouzdanost i funkcionalnost.

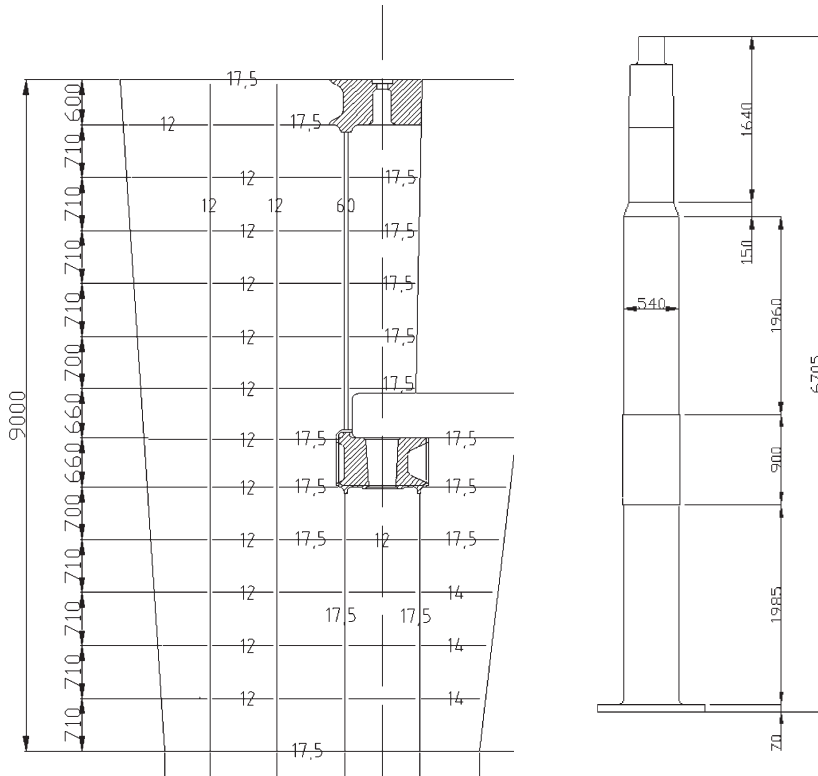
Ključne riječi: poluovješeno kormilo, opterećenje, čvrstoća, naprezanje

2. Uvod

2.1 Konstrukcija kormila

Konstrukciju kormila analiziranog u ovom radu čine vertikalno i horizontalno postavljena rebra koja su s vanjske strane zatvorena limenim opločanjem (plaštom). Horizontalna rebra čine limovi u obliku NACA 0020 profila [1]. Kako je kormilo dodatno oslonjeno na rog, NACA profil nastavlja se i na rogu. Na gornjem dijelu lista kormila pričvršćeno je vratilo koje prolazi kroz strukturu krme broda sve do kormilar-skog stroja smještenog u prostorijski kormilar-skog stroja [2].

Na Sl. 1. prikazana je struktura analiziranog kormila s osnovnim dimenzijama i debljinama limova. Debljine limova rebara kreću se između 12 i 17,5 mm, a debljina plašta je 17,5 mm.



Slika 1. Izvedba i dimenzije analiziranoga lista i struka kormila

2.1.1 Dopuštena naprezanja strukture kormila

Dopuštena naprezanja strukture kormila propisana su pravilima klasifikacijskih zavoda. Prema [3], naprezanja na kormilu ne smiju, ni u kom slučaju, biti veća od sljedećih vrijednosti:

U području bez izreza:

- naprezanje na savijanje: $\sigma_b = 110 \text{ MPa}$,

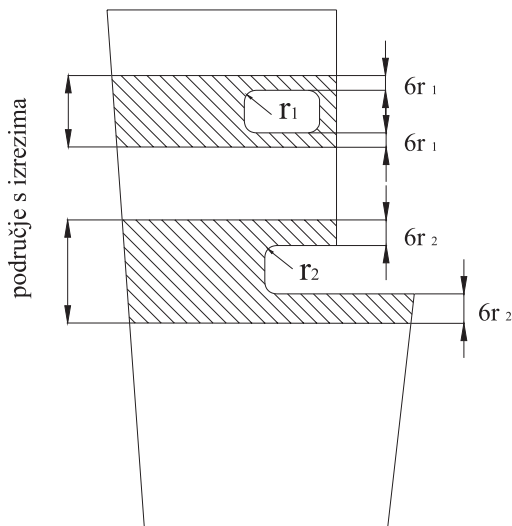
- smično naprezanje: $\tau = 50 \text{ MPa}$,

- ekvivalentno naprezanje: $\sigma_e = 120 \text{ MPa}$,

a koje se izračunava prema izrazu (1):

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \text{ MPa} \quad (1)$$

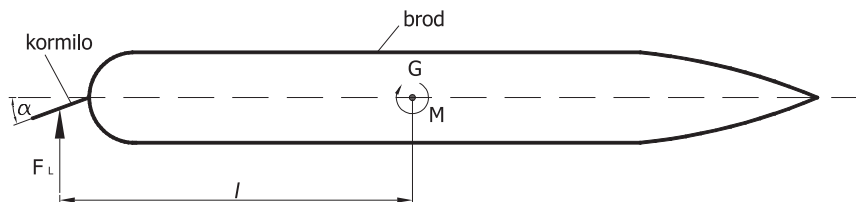
- U području s izrezima (Sl.2.):
 - naprezanje na savijanje: $\sigma_b = 75 \text{ MPa}$
 - smično naprezanje: $\tau = 50 \text{ MPa}$
 - ekvivalentno naprezanje: $\sigma_e = 100 \text{ MPa}$



Slika 2. Područja s izrezima na listu kormila

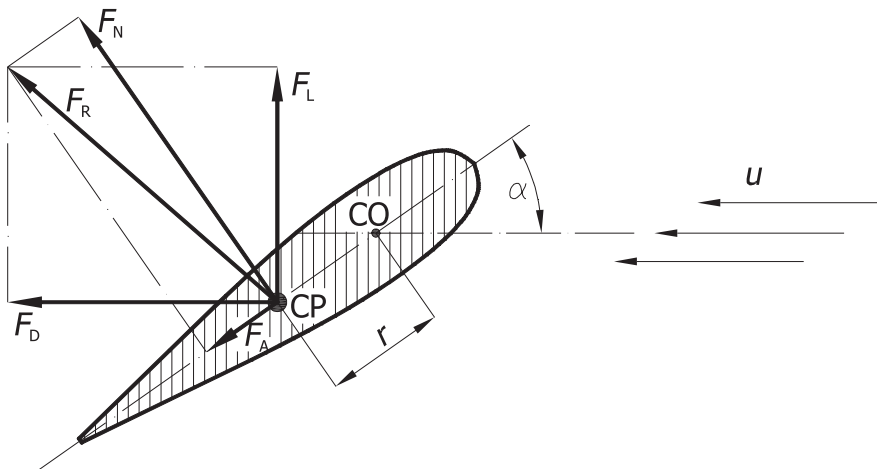
2.2 Opterećenje kormila

Pri analizi opterećenja kormila broda, karakteristična su dva položaja kormila: položaj kada kormilo nema otklona i kormilo se nalazi u simetriji broda (kut $\alpha = 0^\circ$) te otklonjeni položaj kormila u kojemu je kormilo otklonjeno u lijevu ili desnu stranu ($\alpha \neq 0^\circ$), ovisno o željenom smjeru plovidbe.



Slika 3. Djelovanje kormila pri upravljanju brodom

U otklonjenom se položaju na listu kormila stvara sila uzgona F_L , koja uzrokuje nastajanje momenta M oko težišta broda G te brod počinje skretati (Sl. 3.).



Slika 4. Sile na profilu kormila

Pri strujanju vode oko profila kormila nekom brzinom u , na profil kormila djeluju dvije sile: sila uzgona F_L koja djeluje uvijek okomito na smjer strujanja fluida, i sila otpora F_D koja djeluje u smjeru strujanja vode te usporava gibanje broda pri skretanju. Hvatište tih sila je u centru djelovanja hidrodinamičkog tlaka vode CP, koji se pomiče po simetrali profila, ovisno o kutu upada vode α . Upravo sila uzgona predstavlja svrhu postojanja kormila. Sila uzgona zajedno sa silom otpora tvori resultantnu silu F_R . Ona se može rastaviti na normalnu komponentu F_N i aksijalnu komponentu F_A . Normalna komponenta F_N djeluje okomito na profil kormila, dok aksijalna komponenta F_A djeluje u smjeru simetrale profila kormila.

Da bi se poboljšala upravljivost broda, potrebno je povećati moment oko njegovog težišta, a to se može postići na neki od sljedećih načina:

- postavljanjem kormila što je više moguće prema krmu kako bi se povećao krak l
- povećanjem površina lista kormila, pri čemu kormilo ne smije prelaziti konturu krme broda
- smještajem kormila direktno iza brodskog vijka

Sila na list kormila može se odrediti prema sljedećem izrazu [3]:

$$C_R = 132 \cdot k_R \cdot k_c \cdot k_l \cdot A_p \cdot v^2, N \quad (2)$$

gdje je:

- A_p - projicirana površina kormila, m²;
- v - brzina plovidbe, čv
- k_R - faktor omjera površina koji se određuje prema izrazu (3);

$$k_R = \frac{\left(\frac{b^2}{A_t} + 2 \right)}{3} \quad (3)$$

pri čemu su:

- A_t - zbroj površine lista kormila i roga kormila u nastavku profila kormila, m²;
- b - srednja visina kormila, m;
- k_c - koeficijent ovisan o tipu kormila i profilu kormila, prema tablici u nastavku:

Tablica 1. Vrijednosti koeficijenta k_c u ovisnosti o profilu kormila i smjeru plovidbe

| Profil kormila | k_c - vožnja pramcem | k_c - vožnja krmom |
|-------------------|------------------------|----------------------|
| NACA-00 serija | 1,1 | 1,4 |
| Göttingen profili | 1,1 | 1,4 |
| Plošni profili | 1,1 | 1,4 |
| Plitki profili | 1,35 | 1,4 |

- k_l - koeficijent ovisan o položaju kormila, pri čemu je:
 $k_l = 0,80$ za kormilo izvan mlaza brodskog vijka;
 $k_l = 1,15$ za kormilo iza sapnice brodskog vijka,
 $k_l = 1,00$ za kormila u mlazu brodskog vijka.

Tlak na list kormila izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$p = \frac{C_R}{A}, Pa \quad (4)$$

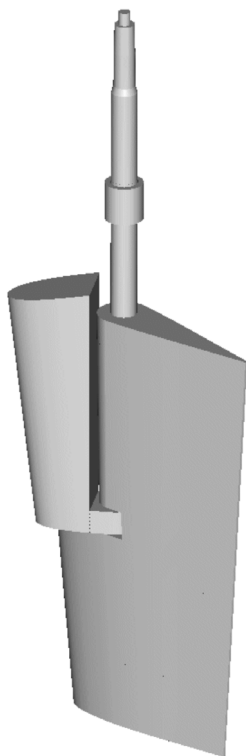
gdje je:

- C_R - sila koja djeluje na list kormila,
- A - ukupna površina lista kormila

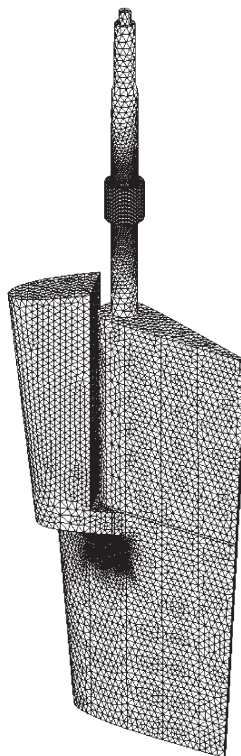
3. Analiza čvrstoće kormila

3.1 Model i rubni uvjeti

Analiza čvrstoće kormila provedena je za izvedbu kormila prikazanog na Sl.1. primjenom metode konačnih elemenata. Na osnovi tehničke dokumentacije, pribavljene ljubaznošću osoblja Ureda opreme Brodogradilišta "3. maj" - Rijeka, izrađen je detaljni CAD model lista i roga kormila te struka kormila (Sl. 6). Taj je model korišten kao podloga za generiranje mreže konačnih elemenata i postavljanje rubnih uvjeta.



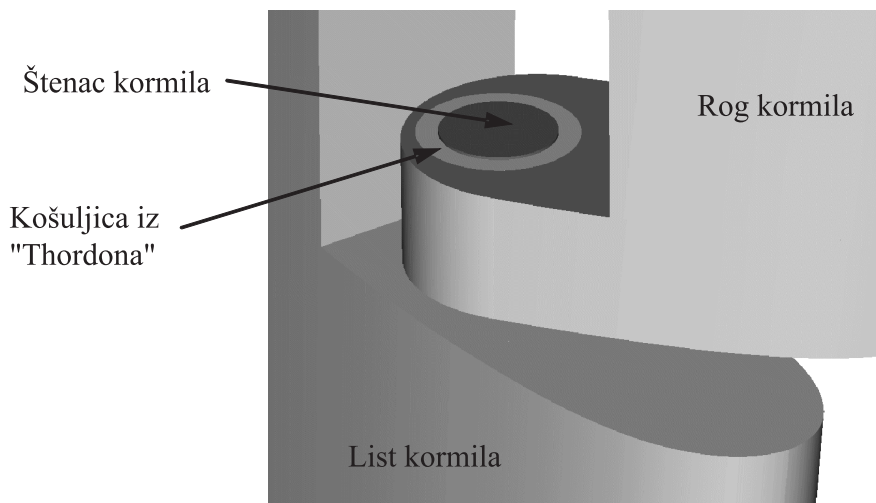
Slika 5. CAD model lista, roga i struka kormila



Slika 6. Mreža konačnih elemenata

Svojevrsni problem pri postavljanju rubnih uvjeta na modelu predstavljaju ležajevi struka i štenca kormila, odnosno površine koje su u kontaktu, ali nisu međusobno čvrsto povezane. Za opis kontakta spomenutih dijelova modela korišteni su kontaktni elementi koji omogućuju prijenos opterećenja s lista kormila na ležaj struka kormila i rog kormila [4].

Ovdje treba napomenuti da su ležajevi struka i roga kormila izvedeni na način da su između metalnih dijelova, koji se međusobno zakreću, ubačene košuljice od posebne vrste elastomera pod trgovačkim nazivom “Thordon”, a koji se sve češće koristi u raznim ležajevima na plovnim objektima. Pri analizi su u obzir uzeta odgovarajuća fizikalna svojstva materijala od kojih je izrađeno kormilo i košuljice ležajeva [5] te su prikazana u Tab. 2.



Slika 7. Detalj ležaja lista i roga kormila

Tablica 2. Fizikalna svojstva materijala kormila i ležajeva

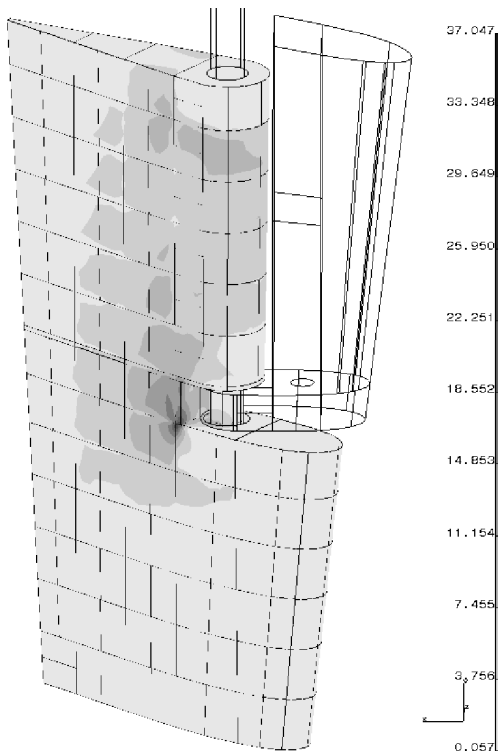
| Materijal | Primjena | Spec. masa, kg/m ³ | Modul elastičnosti, Pa | Modul smička, Pa | Poissonov koef. |
|---------------------|----------|-------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| Brodograđevni čelik | Kormilo | 7820 | $2,07 \cdot 10^{11}$ | $8,02 \cdot 10^{10}$ | 0,29 |
| Thordon | Ležajevi | 1000 | $4,4 \cdot 10^8$ | $1,51 \cdot 10^8$ | 0,45 |

Pri plovidbi kormilo je izloženo opterećenju koje nastaje djelovanjem hidrodinamičkog tlaka morske vode na list kormila koji se mijenja ovisno o kutu otklona od simetrale broda i ovisno o brzini broda. Taj se tlak može grubo procijeniti iz kvocijenta izračunate sile na list kormila i površine lista kormila, no njegova raspodjela nije jednolika po površini lista kormila. Zato je u ovom radu korištena nejednolika raspodjela hidrodinamičkog tlaka vode uz uvjet da se maksimalni intenzitet tlaka nalazi u blizini osi rotacije kormila, a sama raspodjela odgovara plohi koja je definirana polinomom drugog reda. Pritom je raspodjela hidrodinamičkog tlaka vode na list kormila u okomitom smjeru uzeta jednolikom što predstavlja stanovito pojednostavljenje simulacijskog modela.

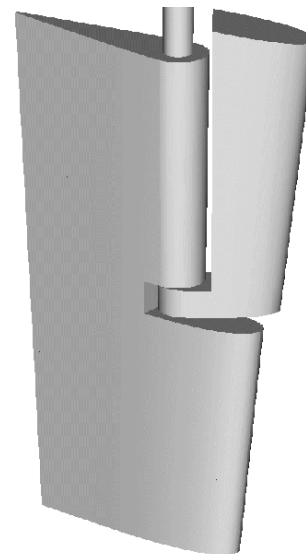
3.2 Rezultati analize

Numerička simulacija i analiza opterećenja kormila provedena je pri najvećem projektom otklonu, odnosno pri otklonu od 35° od centralne linije broda i pri maksimalnoj brzini plovidbe koja iznosi 16 čv.

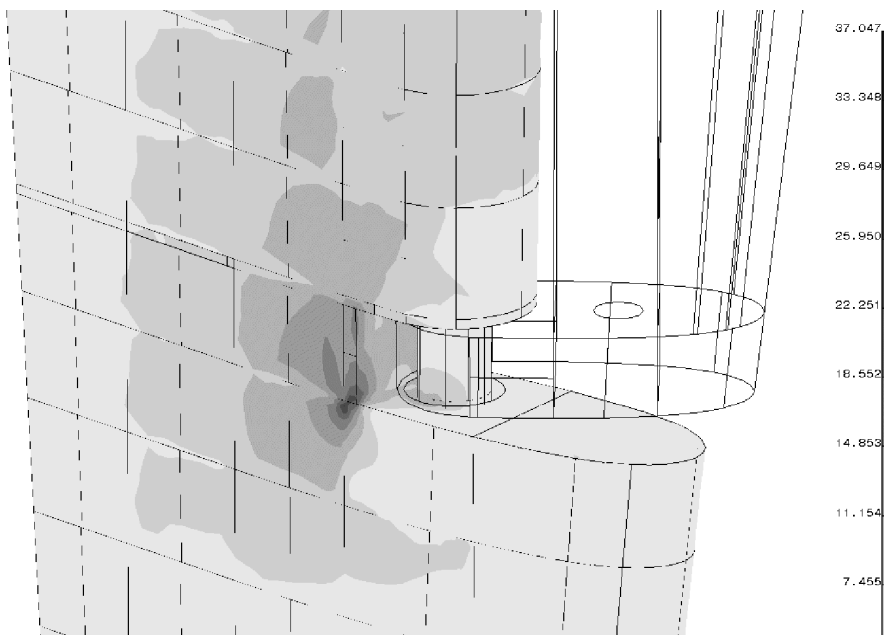
Na Sl. 8. prikazana je raspodjela ekvivalentnog naprezanja na listu kormila izraženih u MPa. Zbog lakše orijentacije i bolje preglednosti, na Sl. 9. je prikazan detalj CAD modela lista kormila u istom položaju. Iz dobivenih se rezultata može zaključiti da najveće ekvivalentno naprezanje ne prelazi 30% najvećeg dopuštenog naprezanja. Zbog izvedbe i ovješnja ove izvedbe kormila, pojavljuje se koncentracija naprezanja u području oko ležaja roga kormila, te je taj detalj prikazan na Sl. 10.



Slika 8. Ekvivalentno naprezanje lista kormila

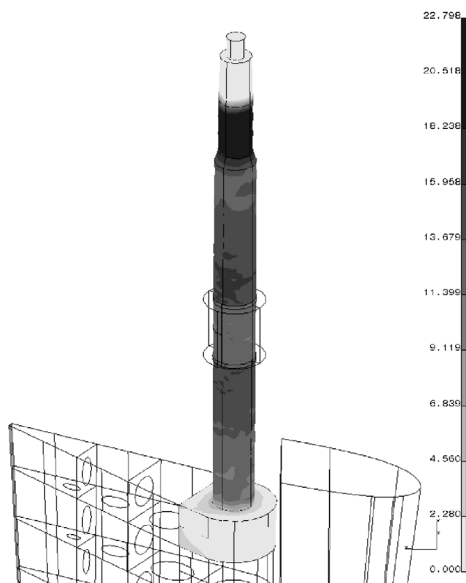


Slika 9. Detalj CAD modela lista kormila

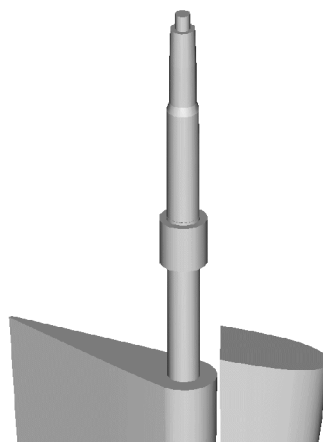


Slika 10. Koncentracija ekvivalentnog naprezanja u području oko roga kormila

U analiziranim uvjetima, struk kormila izložen je istodobnom djelovanju momenta torzije i momentu savijanja. Najveća ekvivalentna naprezanja također su znatno ispod dopuštenih vrijednosti, a njihova je raspodjela prikazana na Sl. 11. Područje u kojemu se javljaju najveća naprezanja nalazi se odmah ispod dijela vratila koje je stegnuto u rotoru kormilarskog stroja, što odgovara realnoj situaciji jer je taj dio vratila izložen najvećem momentu torzije.



Slika 11. Ekvivalentno naprežanje struka kormila



Slika 12. Detalj CAD modela struka kormila

Naprežanja, odnosno raspodjele kontaktnih pritisaka u ležajevima struka i roga kormila, izražene u MPa, prikazane su na Sl. 13. i Sl. 15. Raspodjela kontaktnih pritisaka u ležaju struka kormila prilično je ujednačena, dok su točkaste koncentracije naprežanja posljedica kvalitete mreže konačnih elemenata i numeričke metode za rješavanje sustava jednadžbi.

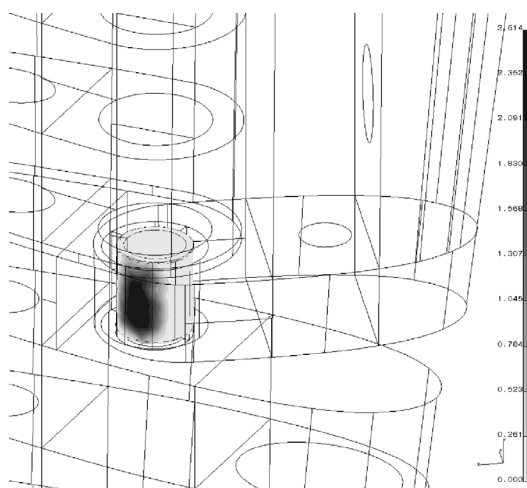
Raspodjela kontaktnih pritisaka u ležaju roga kormila odgovara opterećenju kormila koje je otklonjeno od simetrale broda te se pojavljuje koncentracija kontaktnog pritiska na jednoj strani ležaja (Sl. 15.). Najveća vrijednost kontaktnog pritiska u ležaju je ispod dopuštene granice te se može zaključiti da je ležaj pravilno dimenzioniran.



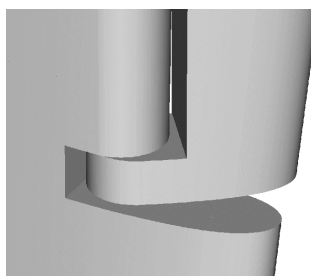
Slika 13. Kontaktni pritisci u ležaju struka kormila



Slika 14. Detalj CAD modela ležaja struka kormila



Slika 15. Kontaktni pritisci u ležaju roga kormila



Slika 16. Detalj CAD modela ležaja roga kormila

4. Zaključak

Metoda konačnih elemenata, uz neizbježnu primjenu računala, pokazala se kao pogodna za analizu čvrstoće kormila broda. Kako se radi analizi relativno velike konstrukcije u cijelosti, pri čemu su u obzir uzeti i detalji kontaktnih površina u ležajevima struka i roga kormila, može se zaključiti da su dobiveni rezultati više nego zadovoljavajući.

Na osnovi rezultata dobivenih analizom naprezanja poluovješenog kormila, može se izvesti zaključak da su naprezanja u svim dijelovima sklopa kormila znatno ispod dopuštenih vrijednosti. U analiziranom slučaju, mjesto najveće koncentracije naprezanja pojavljuje se u području oko ležaja roga kormila gdje je i inače struktura lista kormila najčvršća.

Rezultati numeričke simulacije pokazuju da su kontaktni pritisci u ležajevima struka i roga kormila također niži od dopuštenih vrijednosti, što znači da su ležajevi pravilno dimenzionirani.

Nakon provedene analize čvrstoće poluovješenog kormila broda, općenito se može zaključiti da je struktura kormila izrazito kruta te njezina čvrstoća niti pod maksimalnim opterećenjem ne dolazi u pitanje. Jedan dio limova strukture kormila je predimezioniran u smislu njihove debljine, no ostaje otvoreno pitanje sigurnosti u teškim uvjetima plovidbe za koje je vrlo teško predvidjeti opterećenja na dijelove strukture kormila.

S ciljem ostvarenja još kvalitetnijih i preciznijih rezultata analize naprezanja poluovješenog kormila, predstavljeni simulacijski model može se poboljšati s nekoliko aspekata. Jedno od poboljšanja odnosi se na kvalitetnije podatke o opterećenju lista kormila i precizniju raspodjelu hidrodinamičkog tlaka na list kormila. Drugo se, pak, poboljšanje može usmjeriti na proširenje modela kormila na ostale dijelove brodske strukture na krmi. Time bi se prijenos opterećenja na list kormila i okolnu brodsku strukturu mogao još preciznije istražiti čime bi se, u konačnici, pridonijelo mogućnosti konstrukcije lakših, i jeftinijih kormila uz osiguranje svih zahtjeva pouzdanosti i funkcionalnosti propisanih od klasifikacijskih zavoda.

5. Literatura

- [1] H. Abbott, I., E. von Doenhoff, A.: *Theory of wing sections*, Dover publications Inc., New York, 1959.
- [2] Ž., Kalman: *Konstrukcija kormila broda*, Digitalni udžbenik iz konstrukcije broda, FSB, Zagreb
- [3] American Bureau of Shipping: *Rules for Building and Classing, Steel Vessels, Part 3: Hull Construction and Equipment*, 2003.
- [4] H., Mukundan: *Finite Element Analysis of a Rudder*, Indian Institute of Technology, Madras, 2002.
- [5] <http://www.thordonbearings.com>

Igor Marušić, Tomislav Mrakovčić

Analysis of the Semi-Spade Rudder

Abstract

Features of rudder design as well as the whole ship design are subject to the requirements provided for by classification societies. Rudder being of vital importance for safe navigation and secure ship operation, its structure must be most robust and rigid.

With a view to finding out what part of the rudder structure is most exposed to stress and what the stress is, the study deals with an analysis of the semi-spade rudder strength which has been carried out by means of computer simulation using the final elements method.

The analysis also involved the rudder horn as a structural part of the ship which takes on a part of the stress itself. Contact surfaces within the rudder blade and rudder horn joint as well as within the rudder stock bearing are described by contact elements. By computer simulation, stress values were obtained as well as the rudder structure deformation and contact pressures within the rudder stock and rudder pintle bearings.

The results obtained show that the rudder structure stress rates are below the permissible level and also that its structure is strong enough to carry even a higher stress than the maximum designed; the same may be concluded in respect of rudder bearings as well. Implementation of such analyses may point to those parts of the rudder the design of which require extra attention as well as to those which can be made of thinner sheet metal, thus contributing to saving in material and reduction in the rudder total mass while ensuring unchanged reliability and functionality.

Key words: semi-spade rudder, stress, strength, strain

Analisi di resistenza del timone semisospeso

Sommario

Le caratteristiche strutturali del timone così come di tutta la struttura della nave sono regolate dalle norme del registro navale. Essendo il timone d'importanza vitale per il governo della nave e la sicurezza della navigazione la sua struttura deve essere compatta e robusta.

Per scoprire quali elementi strutturali del timone vengono sottoposti al massimo carico e stabilirne l'entità, si è analizzata la resistenza del timone semisospeso tramite simulazione computerizzata con l'applicazione del metodo di elementi finiti (MEF). L'indagine è stata estesa pure alla brandella del timone, quale struttura della nave sottoposta a carico parziale, alle superfici di contatto del giunto della pala e della brandella e del supporto dell'asta del timone.

Grazie alla simulazione con il computer è stato possibile rilevare i valori di sollecitazione e deformazione della struttura del timone e della pressione di contatto sui supporti dell'asta ed agugliotti del timone.

I risultati ottenuti dimostrano come le sollecitazioni della struttura del timone sono ben al di sotto del livello di tolleranza e come la sua struttura sia robusta e in grado di sopportare sollecitazioni di maggiore entità di quelle previste dal progetto. Ciò vale anche per i supporti del timone.

In conclusione, tali analisi permettono di individuare quali settori del timone esigono maggiore attenzione, sia in fase di progettazione che di costruzione. Servono, ad esempio, ad indicare i segmenti del timone che richiedono lamiere di minor spessore. Ciò favorisce il risparmio di materiale e la riduzione di massa (peso) mantenendo tuttavia intatto il funzionamento e l'affidabilità del timone.

Parole chiave: timone semisospeso, carico, resistenza, sollecitazione