

Branko BELAMARIĆ

# Analiza modela za određivanje stanja oplakane površine broda

Stručni rad

U članku je analiziran model porasta otpora pomoću ITTC 1978 formule za izračunavanje dodatka na hrapavost  $\Delta C_F$ . Kao temelj za izračunavanje statusa oplakane površine broda služila su izvješća iz strojarskih dnevnika, dvaju *Panamax* brodova, bulкера *Pelješac* i tankera *Ist*, tijekom tridesetmesečnoga praćenja.

Opisan je fenomen deterioracije i obraštaja kao glavne sastavnice hrapavosti oplakane površine. Analiziran je njihov utjecaj pri procjeni odnosa brzine i snage broda u službi.

Razmatra se i preporučuje sniženje hrapavosti pjeskarenjem oplakane (čelične) površine uz aplikaciju novih antikoroziivnih i antivegetativnih premaza, za vrijeme službe broda.

**Ključne riječi:** hrapavost supstrata, otpor trenja, antivegetativni i antikoroziivni premazi, obraštaj

## Analysis of the Model for Determination of the Condition of Ships Wetted Surface

Professional paper

A friction resistance model based on ITTC 1978 formula, is analysed via hull roughness penalty predictor  $\Delta C_F$  through two Panamax vessels (Tanker *Ist*, and Bulkcarrier *Pelješac*) Engine Log Book, during 30 month monitoring period.

A wetted surface roughness main components, deterioration and fouling phenomena, are reviewed and used in the service speed to power relationship estimation calculations.

A sandblasting procedure and coating renewal (anticorrosive and antifouling) during service period, to minimize wetted (steel substratum) surface roughness, is analysed and recommended too.

**Key words:** hull roughness, friction resistance, anticorrosive and antifouling coatings, fouling

### Adresa autora (Author's address):

Radićeva 38, 10000 Zagreb; e-mail:  
branko.belamaric@fsb.hr

**Primljeno (Received):** 2009-01-28

**Prihvaćeno (Accepted):** 2009-04-22

**Otvoreno za raspravu (Open for discussion):** 2010-09-30

## Nomenklatura

### Opće značajke broda

$B$	širina broda, m
$DWT$	nosivost broda, ukupna, t
$L_{OA}$	duljina preko svega, m
$L_{PP}$	duljina između okomica, m
$MCR$	maksimalna trajna snaga ( <i>Maximum Continuous Rating</i> ), kW
$S$	oplakana površina broskog trupa, m <sup>2</sup>
$SCR$	trajna snaga u službi ( <i>Service Continuous Rating</i> ), kW
$SMCR$	odabrana maksimalna trajna snaga ( <i>Selected Max. Continuous Rating</i> ), kW
$T$	gaz broda, m
$V_S$	brzina u službi, čvorovi
$V_T$	brzina na pokusnoj plovidbi, čvorovi
$\Delta$	istisnina broda, t

### Hidrodinamika

$CEFF$	faktor antivegetativnoga premaza
$C_F$	koeficijent otpora trenja glatkih (ravnih) ploča

$C_S$	koeficijent hrapavosti broda u službi; $C_S = \Delta C_{FS} - \Delta C_{FT}$
$D$	promjer vijka, m
$HRF$	faktor obraštaja, $\mu\text{m}/\text{dan}$
$\Delta C_F$	dodatak na hrapavost ( <i>Hull Roughness Penalty Predictor</i> )
$\Delta C_{FT}$	dodatak na hrapavost za brod na pokusnoj plovidbi
$\Delta C_{FS}$	dodatak na hrapavost za brod u službi
$P$	uspon vijka, m
$PT$	vrijeme stajanja u luci, dani
$Z$	odnos akumuliranog vremena od aplikacije AV premaza prema udjelu vijeka trajanja AV premaza gustoća mora, $\text{kg}/\text{m}^3$
$\rho$	gustoća mora, $\text{kg}/\text{m}^3$
$\eta_D = P_E/P_D$	stupanj djelovanja propulzije ( <i>Quasi Propulsive Coefficient</i> )
$P_E$	snaga otpora, kW
$P_D = P_B \eta_S$	snaga predana vijku, kW
$P_B$	kočena snaga glavnoga stroja, iza odzivnog ležaja, odnosno prigona
$s$	stupanj djelovanja prijenosa (gubici trenja u ležajima os. voda i statvene cijevi)

### Hrapavost oplakane površine

$AHR_{\text{dokiranja}}$	hrapavost zbog dokiranja, $\mu\text{m}$
$AHR_{\text{obraštaja}}$	hrapavost zbog obraštaja, $\mu\text{m}$
$AHR_{\text{početna}}$	početna hrapavost (izvorna hrapavost limova), $\mu\text{m}$
$AHR_{\text{služba}}$	hrapavost u službi zbog deterioracije supstrata, $\mu\text{m}$
$AHR_{\text{ukupna}}$	prosječna hrapavost oplakane površine ( <i>Average Hull Roughness</i> ), $\mu\text{m}$

### Hrapavost vijka

$APR_{\text{dokiranja}}$	hrapavost zbog dokiranja, $\mu\text{m}$
$APR_{\text{obraštaja}}$	hrapavost zbog obraštaja, $\mu\text{m}$
$APR_{\text{početna}}$	početna hrapavost, $\mu\text{m}$
$APR_{\text{služba}}$	hrapavost u službi zbog deterioracije supstrata, $\mu\text{m}$
$APR_{\text{ukupna}}$	ukupna hrapavost površine vijka ( <i>Average Propeller Roughness</i> ), $\mu\text{m}$

### Pogon

$AFC$	godišnji trošak za gorivo ( <i>Annual Fuel Consumption</i> ), USD/god
$C_{\text{HO}}$	cijena teškoga goriva, $C_{\text{HO}} = 250$ USD/t (prosječna cijena 27/2/2009 - terminali Rotterdam, Genova, Philadelphia, Los Angeles, Singapore i Fujairah)
$DFC_{\text{služba}}$	dnevna potrošnja goriva u službi ( <i>Daily Fuel Consumption</i> ), t/dan
$ST$	vrijeme u plovidbi, dana godišnje
$SFC$	specifični potrošak goriva ( <i>Specific Fuel Consumption</i> ), g/kWh

### Brodsko gorivo

*Heavy Fuel Oil or Residual Oil* (HFO) 380 cst (ISO 8217; maks. 991,0 kg/m<sup>3</sup>)  
*Intermediate Fuel Oil* (IFO) 180 cst  
*Marine Diesel Oil* (MDO) (862 kg/m<sup>3</sup>)  
*Marine Gas Oil* (MGO)

### Premazi

AC	antikorozivni sustav premaza
AV	antivegetativni sustav premaza
DFT	debljina suhoga filma premaza, ( <i>Dry Film Thickness</i> ), $\mu\text{m}$

### Uvod

Veliki je broj čimbenika okoliša i deteriorativnih uvjeta u službi broda, koji utječu na sposobnost održanja brzine broda u određenom vremenskom razdoblju. Utjecaj hrapavosti oplakane površine iznimno je važan za poslovanje broda. Ispitivanjem utjecaja oplakane površine na brzinu i snagu dokazano je da se hrapavost brodova u službi godinama stalno povećava. Stoga se smanjuje brzina, odnosno zahtijeva veća snaga za održanje izvorne brzine.

Za razliku od točno definiranih propisa kod projektiranja i izgradnje broda pod nadzorom klasifikacijskih društava, do danas ne postoji unificirani, znanstveno zasnovani postupak održavanja brodova, namijenjen primjeni u brodarskim tvrtkama.

Fenomen oplakane površine broda interdisciplinarni je naravi. Stoga je za rješenje tog, izrazito složenog problema, nužno uključiti različite znanstvene grane, od brodske hidrodinamike i ekonomije poslovanja preko tehnologije rada u doku do fizikalne kemije i biologije mora, vezane za antivegetativne premaze i obraštaj.

Hrapavost oplakane površine broda postala je predmet temeljitijeg znanstvenog i stručnog pristupa tek u 60-im godinama 20. stoljeća. Do tog vremena udio cijene goriva u ukupnim troškovima poslovanja broda nije znatnije utjecao na zaradu broda. Naglim podizanjem cijena nafte, 1973. godine, korjenito je izmijenjen odnos prema udjelu cijene goriva u ukupnim operativnim troškovima poslovanja.

Procjenu utjecaja veličine hrapavosti na pogoršanu energetske bilancu broda u službi, s dostatnom pouzdanosću, moguće je postići kreiranjem jednostavnoga tehnokonomskog modela, koristeći dodatak na hrapavost  $\Delta C_F$ .

Ipak, optimalna poslovna strategija, kako je navedeno u Zaključku, postiže se primjenom ostalih modela metodom višeatributne sinteze optimiranja projekta.

## 1. Definiranje hrapavosti oplakane površine broda

Cilj održavanja površine trupa u eksploataciji jest održavati plovilo što je moguće bliže izvornom stanju za vijeka trajanja broda. Hrapavost brodske oplake, sa znanstvenog stajališta, interdisciplinarnog je značaja. Stoga i podjela hrapavosti, kao fenomena, nije egzaktna. Nerijetko se jedna vrsta hrapavosti pripisuje drugoj, a češće različiti tipovi imaju iste razorne učinke.

Fenomen hrapavosti oplakane površine broda (OPB) trajni je proces, neodvojiv od broda, od početka izgradnje do kraja eksploatacije. Svi operativni segmenti tijekom izgradnje, polazeći od strukturne hrapavosti samih limova, tipa tehnološkoga procesa, kakvoće i performansi AC i AV premaza, kvalificiranosti radne snage i kakvoće aplikacije, sudionici su kumulativnog učinka hrapavosti novogradnje.

U ovom se radu oplakana površina broda referira na čelični supstrat. Drugi građevni materijali (stakloplastika, aluminij, drvo) pokrivaju isto područje, ali nisu predmet ovog razmatranja.

Savršena površina čelične podloge ima sljedeće značajke:

- ne korodira,
- ne podliježe obraštaju,
- hidraulički je glatka,
- kompatibilna je s materijalima i metodama izgradnje trupa,
- strukturnog je identiteta kao i sam trup broda,
- ispunjava kriterije funkcije kao i cijene koštanja.

Dva su bitna čimbenika koji generiraju hrapavost:

- deterioracija oplakane površine kao trajni proces i
- biološki obraštaj kao privremeni proces.

Deterioracija čeličnog lima prirodni je, nepovratni tijek starenja materijala, stoga i zahtjevi za kakvoćom površine brodske trupa moraju biti unutar realnih tolerancija. Hrapavost zbog deterioracije, tijekom godina, ima stalni, uglavnom linearni porast.

Krhkost premaza oplakane površine najbolje ilustrira podatak da debljina od svega nekoliko desetinki milimetra treba istodobno ispuniti zahtjev za intaktnost OPB u visoko aeriranom, stalno kvašenom ambijentu kao i otpornost na abraziju zbog čitavog niza mehaničkih oštećenja.

Neovisno je li riječ o fizikalnim, mehaničkim uzrocima poput sudara, abrazije odbojnika, struganja lanaca, prolaza ledom, jedna jedina točka golog nezaštićenog lima na oplati broda generirat će najrazličitije tipove korozije odnosno progresivno razaranje supstrata.

Hrapavost zbog obraštanja kao fenomen privremene superpozicije do momenta uklanjanja, upravo zbog neujednačenosti (izrazita makrostruktura), najkompleksnija je varijabla OPB, pa je nju najteže kvalitativno i kvantitativno procijeniti. Dakle, biološka hrapavost, kao posljedica obraštaja, nije jednolična, mijenja se i oblikom i teksturom.

Procjena veličine hrapavosti zbog obraštaja temelji se na podacima o:

- djelotvornom vijeku trajanja AV premaza,
- brzini broda,
- duljini vremena boravka broda u luci,
- ekološkim uvjetima u luci,
- plovidbenim rutama.

## 2. Metodologija računanja hrapavosti

Određivanje otpora trenja trupa zahtijeva poznavanje raspodjele tangencijalnih naprezanja po oplakanoj površini trupa broda. Za praktične svrhe viskozni otpor trupa računa se na osnovi otpora trenja ekvivalentne ravne ploče  $C_F$  i faktora forme  $k$  i dodatka zbog hrapavosti  $\Delta C_F$ .

Koeficijent otpora trenja  $\Delta C_F$  kraće se zove dodatak na hrapavost (*Hull Roughness Penalty Predictor*).

Oplakana površina brodske trupa u eksploataciji nije glatka, što je posljedica deterioracije kao trajnog, nepovratnog procesa. Ovome se superponira obraštaj kao privremeni fenomen. Struktura hrapavosti prirodnih i tehničkih objekata, neovisno o tome je li riječ o optjecanju (raznovrsna vozila i plovila) ili protjecanju (cjevovodi) vrlo je različita. Da bi se mogli u praksi primjenjivati rezultati sustavnih ispitivanja koeficijenata otpora trenja, koji su dobiveni za cijevi umjetno ohrapavljene gusto nanesenim zrnima pijeska, određene su za sve važne "prirodne hrapavosti" njima ekvivalentne prosječne "umjetne" pješčane hrapavosti. Kod brodova ta hrapavost se naziva prosječna hrapavost trupa,  $AHR$ , i može se odrediti mjerenjem uz pridržavanje određene procedure.

Model porasta otpora pomoću ITTC-eve formule za izračunavanje dodatka na hrapavost uključuje sljedeće formule:

$$10^3 \Delta C_F = 1,05 (AHR/L_{pp})^{1/3} - 0,64 \quad (1)$$

(ITTC-1978, London)

$$10^3 \Delta C_F = 44 [(AHR/L)^{1/3} - 10 (R_n)^{-1/3}] + 0,125 \quad (2)$$

(ITTC-1990, Madrid)

Formulom ITTC-1990 izračunava se samo neoštećena površina standardnog antivegetativnog premaza ( $AHR < 225 \mu m$ ). To je bio razlog izbora ranije formule, ITTC-1978, kao osnove za izračun dodatka na hrapavost  $\Delta C_F$  brodova u eksploataciji, [1].

Tako je na osnovi formule ITTC-1978 kreiran računalni model porasta otpora. Taj model, iako pojednostavljen, daje dostatno točnu sliku za ocjenu porasta opće hrapavosti oplakane površine broda.

Vezano za značajke hrapavosti odabranog broda i određene plovne rute, opću hrapavost predstavlja zbroj četiriju parametara:

početna hrapavost, stalni prirast hrapavosti zbog deterioracije, prirast hrapavosti tijekom radova u doku i hrapavost od obraštaja.

Ovdje je nužno naglasiti aproksimativnu vrijednost za opću prosječnu hrapavost,  $AHR$ .

S jedne strane zbrajaju se dvije potpuno različite vrste hrapavosti, trajne (fizikalne) i privremene (biološke). S druge pak, formula uključuje srednju statističku vrijednost samo jednoga parametra tj. visine neravnina. Za dobivanje točnije slike realnoga profila površine supstrata trebalo bi mjeriti i topografiju površine, što u proračunu ovoga tehnokonomskog modela nije uzeto u obzir.

Učinak hrapavosti oplakane površine na povećani otpor trenja broda računa se putem koeficijenta hrapavosti broda u službi  $C_S$  kao razlike dodataka na hrapavost broda u službi i na pokusnoj plovidbi:

$$C_S = \Delta C_{FS} - \Delta C_{FT} \quad (3)$$

$$\Delta C_{FS} = [1,05 (AHR_U/L_{pp})^{1/3} - 0,64] \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta C_{FT} = [1,05 (AHR_P/L_{pp})^{1/3} - 0,64] \cdot 10^{-3}$$

Primjenom koeficijenta hrapavosti  $C_S$  moguće je odrediti i povećanje snage zbog hrapavosti oplakane površine trupa  $\Delta P_R$ :

$$\Delta P_R = 0,5 \cdot \eta_D^{-1} \cdot \rho \cdot S \cdot V_S^3 \cdot C_S \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

Drugi je način proračuna porasta snage primjena iskustvene aproksimacije  $P_2/P_1 = (V_2/V_1)^m$ , pri čemu se obično odabire eksponent 3 (kubna parabola).

Sam termin kubne parabole nije posve točan. Naime, eksponent krivulje snage u funkciji brzine mijenja se u rasponu od 2,8 do 6, ovisno o vrsti broda i području krivulje snage. Za velike i spore brodove za rasuti teret i tankere, poput brodova koji se razmatraju, eksponent se kreće oko 3.

Pretpostavlja se da se u uskom radnom području za promjenu brzine pri konstantnoj snazi mijenja samo koeficijent  $C$  u jednadžbi (5), a eksponent ostaje isti. Nova krivulja ima isti tijek, ali s odmakom od referentne krivulje.

Opći izraz za snagu:

$$P = C \cdot V^3 \quad (5)$$

Kočena snaga na pokusnoj plovidbi:

$$P_B = C_T \cdot V_T^3 \quad (6)$$

Trajna snaga u službi:

$$P_S = C_S \cdot V_S^3 \quad (7)$$

Maksimalna trajna snaga  $MCR$  jest snaga za koju je motor projektiran, a vezana je za nominalni srednji efektivni tlak  $MEP$  i nominalnu brzinu vrtnje koljenčaste osovine. Danas se uobičajeno brzina broda u službi specificira za trajnu snagu  $SCR$  koja iznosi 0,8-0,9  $MCR$ .

Krivulja službe  $S$  nalazi se iznad krivulje pokusne plovidbe  $T$ , za dogovoreni postotak (*Sea Margin*). To obično iznosi 15 posto, ali može biti i znatno više, ovisno o vrsti i veličini broda i području službe. Presjecište krivulje  $S$  i snage  $SCR$  definira brzinu u službi  $V_S$ . Svako dalje pogoršavanje stanja oplake (deterioracija, obraštaj) i/ili vremenskih uvjeta (more, vjetar) kreirat će nove

obitelji krivulje S, povećavajući postotak na službu. U skladu s tim i njihova sjecišta sa snagom SCR pomiču se ulijevo, rezultirajući sve manjim brzinama u službi.

K tome, starenjem opada snaga u službi. To se također vidi iz strojarskih dnevnika. To nepovoljno utječe na rad motora, poglavito na izgaranje, ispiranje i ispušnu emisiju, uz povišeni specifični potrošak goriva, [2], [3].

### 3. Računanje hrapavosti oplakane površine broskog trupa

Tri su selektivna područja mjerenja hrapavosti oplakane površine broda: mjerenja za vrijeme izgradnje i na primopredaji broda (1-3), mjerenja u službi (4-8), te mjerenja opće slike hrapavosti netom pred dokiranje, tj. s najvećim stupnjem obraštaja (9):

1. hrapavost limova nakon pjeskarenja, u pravilu na Sa 2½;
  2. hrapavost novogradnje, samo radionički premaz apliciran (cca 20 μm);
  3. hrapavost novogradnje nakon apliciranja AC i AV premaza (debljina nanesenih slojeva AC i AV sustava obično je u granicama: DFT = 250 – 500 μm);
  4. hrapavost u doku nakon pranja visokotlačnim pumpama;
  5. hrapavost u doku nakon pjeskarenja;
  6. hrapavost u doku nakon aplikacije AC i AV premaza (oplakana površina čišćena visokotlačnim pumpama);
  7. hrapavost u doku nakon aplikacije AC i AV premaza (OPB čišćena pjeskarenjem);
  8. hrapavost u vodi nakon čišćenja od obraštaja (podvodno brušenje četkama);
  9. hrapavost pred dokiranje: uključeni biološki obraštaj i deterioracija (korozija, oštećenja, pogriješke AC i AV premaza).
- Zacijelo najdelikatniji dio kod procjene povećanja porasta snage jest određivanje prosječne visine opće hrapavosti (AHR). Naime, sama formula dodatka na hrapavost  $\Delta C_F$  temeljena je na uvrštavanju jednog jedinog brojčanog iznosa s izostavljenom teksturom površine.

Glede najnovijih istraživanja biološke hrapavosti vezano za elastični, trajno gibajući, lelujavi sloj morske flore, metodologija mjerenja hrapavosti dodatno se komplicira uvođenjem parametara gustoće i elastičnosti, [4].

Dok se mjerenja hrapavosti OPB mogu provesti praktički za sva stanja (1-8), najvažnije mjerenje hrapavosti pred samo dokiranje (9) praktički je neizvedivo. Kad bi i mjerili obraštaj na netom izvučenom brodu, opazili bi vrlo brzu morfološku i volumnu promjenu obraštaja.

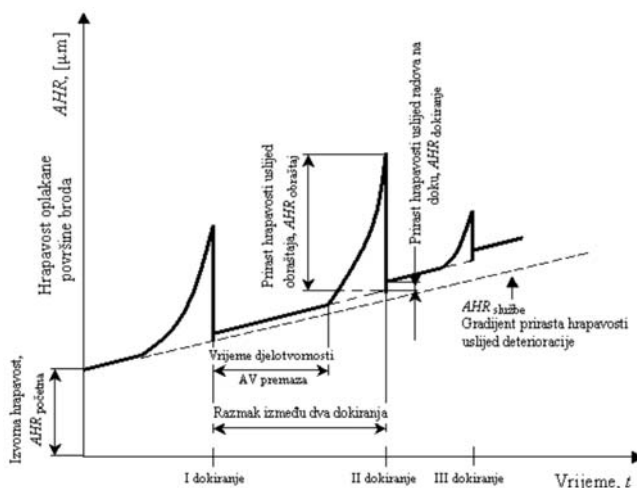
Podaci za AHR trupa i APR vijka, očišćenog od obraštaja, dobiju se izravnim mjerenjem (1-8). To je vrlo dugotrajan posao, rijetko se izvodi osim za znanstvene svrhe.

S dostatnom pouzdanošću mjerenja hrapavosti u praksi procjenjuju se praćenjem odabranih parametara putem simulacije kretanja broda na plovidbenoj ruti ili prema podacima iz broskog dnevnika, [5], [6].

Ukupna prosječna visina hrapavosti oplakane površine  $AHR_u$  sastoji se od četiri parametra:

- izvorne ili početne hrapavosti limova,
- hrapavosti u službi zbog deterioracije supstrata,
- hrapavosti tijekom dokiranja,
- hrapavosti od obraštaja.

$$AHR_{ukupna} = AHR_{početna} + AHR_{služba} + AHR_{dokiranja} + AHR_{obraštaj} \quad (8)$$



Slika 1 Shematski prikaz promjena hrapavosti broda u službi  
Figure 1 Schematic of ship roughness changes

**Izvorna ili početna hrapavost** supstrata ovisi o kakvoći limova i tehnici obradbe u brodogradilištu. Ispravno sačmarenje/pjeskarenje i nanošenje primera na podlogu prije obradbe, bitni je preduvjet očuvanja kakvoće podloge. U skladu s današnjim kriterijima limovi se pjeskare za kakvoću Sa 2½, prema normi ISO 8501-1:1988. Prosječna je AHR ( $AHR = k = MAA$ ) profila lima  $R_z / = 70 \mu\text{m}$  unutar raspona od 50 do 100 μm. Međutim u proračunu se danas operira s izvornom referentnom vrijednosti od 100 μm, koja je suma hrapavosti supstrata, AC i AV premaza, te hrapavosti zbog mogućih oštećenja pri primopredaji broda. Zanimljivo je da referentna hrapavost novogradnje pokazuje stalnu tendenciju pada. Tako je u 50-im godinama 20. stoljeća iznosila 200 μm, sredinom 70-ih 150 μm, u usporedbi s aktualnom izvornom hrapavosti od navedenih 100 μm. To se može pripisati pjeskarenju kao jedinog današnjoj obradbi, umjesto nekadašnjim metodama izlaganja atmosferilijama, obradbi fosfornom kiselinom i mehaničkom tretmanu.

Iako je izvorna hrapavost novogradnje odijeljena od hrapavosti deterioracijom, već u izvornoj hrapavosti dio je čimbenika započinjanja procesa deterioracije broda u službi.

**Hrapavost u službi** zbog deterioracije povećava se u rasponu od 18 μm do 55 μm/godišnje. Toleriranje prirasta hrapavosti, reda veličine 40-50 μm/godišnje jasno svjedoči o nebrizi i neodržavanju oplakane površine broda. U proračunu je odabran srednji prirast AHR od 2,8 μm/mjesečno. Na kraju životnog vijeka prosječnih trgovačkih brodova, ovisno o održavanju i režimu rada, srednje visine hrapavosti OPB kreću se od 700 do 1000 μm.

**Hrapavost pri dokiranju** pripada u područje deterioracije, no u proračunu se posebno tretira. Prema izvješćima, na oko 70 posto brodova zbog nepažljivog rada povećava se hrapavost pri dokiranju. Iskustveno se uzima da taj porast iznosi 14 μm po svakom dokiranju.

#### Procjena hrapavosti zbog obraštaja:

$$AHR_{obraštaj bokova} = HRF \cdot PT \cdot CEFF \quad (9)$$

$$AHR_{obraštaj dna} = k \cdot HRF \cdot PT \cdot CEFF \quad (10)$$

gdje je  $k \sim 0,75$  (pretpostavlja se smanjeni obraštaj na donjoj, tamnoj strani dna).

$CEFF$  - faktor djelotvornosti antivegetativnoga premaza;  
 $0 \leq CEFF \leq 1,0$

$$CEFF = 1,0 - [2,72/e^z - 0,24 (Z - 1,0)^{0,263}] \quad (11)$$

Za efektivno vrijeme AV premaza faktor ( $CEFF$ ) jednak je nuli. Nakon isteka vijeka trajanja AV premaza,  $CEFF$  eksponencijalno teži jedinici što znači da je efekt AV premaza izostao.

Tablica 1 Prirast faktora obraštaja,  $HRF$   
 Table 1 Hull Roughness Fouling Factor,  $HRF$

kvalitativna skala	opis	$HRF$ , [ $\mu\text{m}/\text{dan}$ ]
0,0	čisto	0,0
2,0	slabo vidljivi tragovi	$5,334 \cdot 10^{-4}$
4,0	vidljivi tragovi	$7,849 \cdot 10^{-3}$
6,0	lagani obraštaj	$3,828 \cdot 10^{-2}$
8,0	lagani do umjereni	0,1178
10,0	umjereni obraštaj	0,2822
12,0	umjereni do jaki	0,575
14,0	jaki obraštaj	1,052

### 3.1. Računanje hrapavosti broskog vijka

Hrapavost vijka ima iste sastavnice kao i hrapavost oplakane površine broda:

$$AHR_{\text{ukupna}} = AHR_{\text{početna}} + AHR_{\text{služba}} + AHR_{\text{dokiranja}} + AHR_{\text{obraštaj}} \quad (12)$$

Prema preporuci ITTC-1978 pretpostavlja se da  $APR_{\text{početna}}$  nije veća od  $30 \mu\text{m}$ .

$APR_{\text{službe}}$ , odnosno deterioracije, kreće se oko  $20 \mu\text{m}/\text{godišnje}$ .

Pretpostavka je da se finim brušenjem hrapavost vijka,  $APR_{\text{dokiranja}}$  smanjuje za  $10 \mu\text{m}/\text{dokiranje}$ .

$APR_{\text{obraštaja}}$  se iskustveno uzima kao linearni prirast (0-1/3 opće hrapavosti) između dva dokiranja.

### 4. Računalni prikaz promjena hrapavosti u službi

Temeljem funkcionalne veze između porasta hrapavosti u službi s odgovarajućim padom brzine, moguće je pomoću optimizatora računalnoga programa, a u okviru zadanog vremena, izračunati maksimalni broj putovanja kao i optimalni broj dokiranja.

Izvaci iz navedenoga programa za *Capesize* tanker (slika 2) i *Suezmax* tanker (slika 3) daju potpuniju sliku.

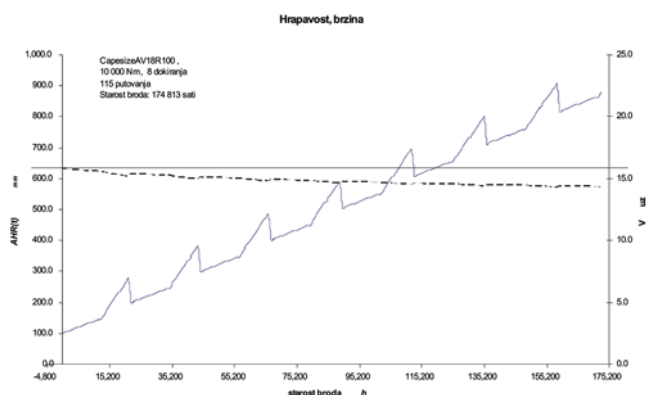
Na slici 2 prikazan je *Capesize* tanker (*Hyundai*, 2008), [7], [8].

300 000 DWT,  $S = 28 094 \text{ m}^2$ ,  $MCR = 29 350 \text{ kW}$ ,  $SCR = 25 950 \text{ kW}$ ,  $V_T = 15,85$  čvorova

Duljina rute: 10 000 Nm, Bliski istok-Sjev. Europa (ME-NEU).

Prikazana je promjena hrapavosti tijekom ukupne službe broda od 20 godina (175 200 sati). Računalni optimizator predvidio je 115 putovanja s vremenom trajanja 174 813 sati.

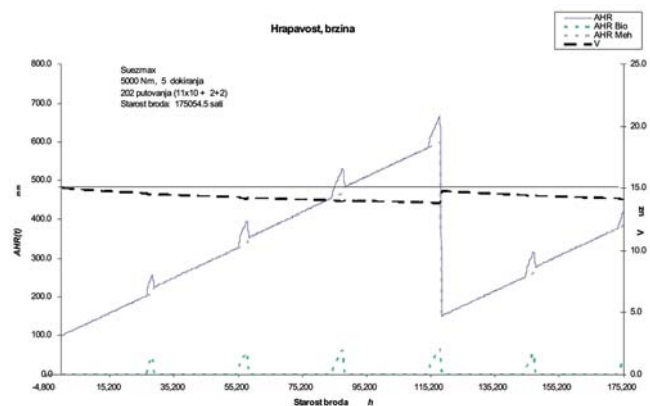
Ukupno je 8 dokiranja, tj. sedam potpunih, dok osmo dokiranje nije obavljeno, jer je predviđen rashod broda. Efektivno



Slika 2 Prikaz promjena hrapavosti *Capesize* tankera u službi (izvadak iz programa)

Figure 2 *Capesize* Tanker roughness changes simulation (excerpt)

trajanje sustava AV zaštite iznosi 18 mjeseci. U ovom primjeru računalnoga program optimizatoru nije dana mogućnost izbora pjeskarenja oplata i apliciranja novih AC i AV premaza. Posljedica toga je trajni pad brzine broda tijekom čitavog eksploatacijskog razdoblja.



Slika 3 Prikaz promjena hrapavosti *Suezmax* tankera *Alan* u službi (izvadak iz programa)

Figure 3 *Suezmax* Tanker *Alan* roughness changes simulation (excerpt)

Na slici 3 prikazan je *Suezmax* tanker *Alan*, [8], [9].

148 900 DWT,  $S = 18 988 \text{ m}^2$ ,  $MCR = 16 410 \text{ kW}$ ,  $SCR = 14 270 \text{ kW}$ ,  $V_T = 15,05$  čvorova.

Duljina rute: 5 000 Nm, Bliski istok-Mediteran (ME-MED).

Prikazana je promjena hrapavosti tijekom ukupne službe broda od 20 godina (175 200 sati). Računalni optimizator se brojem putovanja približuje optimumu: 202 putovanja, s vremenom trajanja 175 054,5 sati.

Ukupno je 6 dokiranja, tj. pet potpunih, dok šesto dokiranje nije obavljeno, jer je predviđeno da brod ide u rashod. Efektivno trajanje sustava AV zaštite iznosi 24 mjeseca. Prigodom četvrtog dokiranja optimizator je predvidio pjeskarenje oplata i apliciranje novih AC i AV premaza.

## 5. Validacija čimbenika hrapavosti na primjeru dvaju brodova

Iz podataka strojarskih dnevnika dvaju brodova, bulkera *Pelješac* i tankera *Ist*, izračunavanjem porasta snage putem dodatka na hrapavost  $\Delta C_p$ , provedena je validacija nabrojanih čimbenika hrapavosti.

### 5.1 Tanker *Ist*

$$L_{oa} = 210,48 \text{ m}$$

$$L_{pp} = 203,00 \text{ m}$$

$$B = 48,00 \text{ m}$$

$$H = 18,00 \text{ m}$$

$$T = 12,645 \text{ m (pokusna plovidba)}$$

$$S = 12\,650 \text{ m}^2$$

$$\Delta = 96\,100 \text{ t (pokusna plovidba)}$$

Glavni stroj: *MAN-B&W 4L80MC*, snage  $MCR = 10\,300$  kW pri  $79 \text{ min}^{-1}$

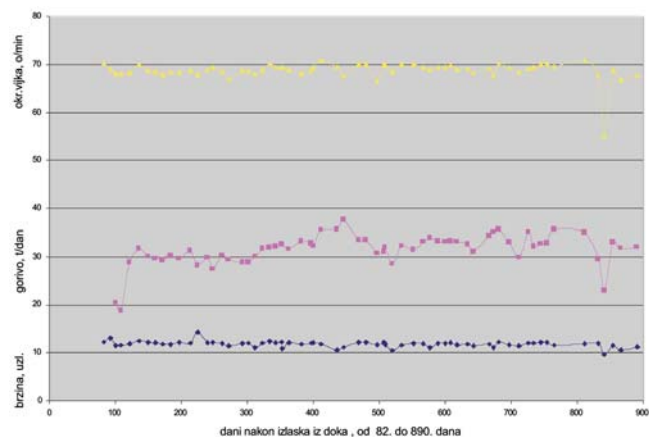
Četverokrlni vijak:  $D = 8,00 \text{ m}$ ,  $P = 6,423 \text{ m}$

Brzina na pokusnoj plovidbi  $V_T = 14,58$  čvorova pri  $SCR = 8460$  kW i  $75,5 \text{ min}^{-1}$

Početak službe: 03/1986. nakon "nultog" dokiranja

Prethodna dokiranja: I (05/88), II (01/91), III (01/94), IV (01/97), V (02/99), šesto dokiranje: 13.-21.10.2001. (Livorno), sedmo dokiranje: 12.-18.06.2004 (Livorno). Napomena: praćenje od 3/1/2002. do 19/4/2004. godine.

pri  $75,5 \text{ min}^{-1}$ ). Prema dnevniku brod je proveo u plovidbi 214 dana godišnje (58,6%), pri srednjoj duljini relacije od 957 Nm i dnevnom potrošku od 30 t goriva.



Slika 4 MT *Ist*, praćenje brzine, potroška goriva i broja okretaja vijka, prema izvodu iz strojarskog dnevnika, od 82-og do 890-og dana nakon dokiranja

Figure 4 MT *Ist*; Engine Log Book Monitoring from 82nd until 890th day after docking: Average Speed, Daily Fuel Consumption, Propeller rpm

Tablica 2 MT *Ist*, izvadak iz strojarskog dnevnika

Table 2 MT *Ist*, Engine Log Book (excerpt)

Vrijeme	Luka	Prev. milje	Vrijeme, h			Brzina	Gorivo	Gorivo	Okretaji
			Plovidba	Zastoj	Luka				
28/01-29/01	Sines – Leixoes	210	17,50		291,00	12,00	25,60	35,10	71,00
10/02-16/02	Leixoes – Es Sider	1797	137,00		24,00	13,12	186,70	32,70	70,70
17/02-19/02	Es Sider – Bizerte	603	50,00		52,00	12,06	61,60	29,60	67,77
21/02-24/02	Bizerte – Es Sider	608	61,50	5,00	33,50	9,89	67,20	26,20	58,70
25/02-28/02	Es Sider – Bizerte	616	63,50		142,00	9,70	61,20	23,10	55,25
06/03-08/03	Bizerte – Ras Lanuf	533	43,50		287,00	12,25	59,80	33,00	68,30
09/03-13/03	Ras Lanuf – Tarragona	1055	91,00		74,00	11,59	125,60	33,10	68,88
16/03-20/03	Tarragona – Ras Lanuf	1062	83,00		24,00	12,80	104,40	30,20	68,60
21/03-25/03	Ras Lanuf – Tarragona	1057	99,00			10,68	131,50	31,88	66,98

Vrijeme praćenja strojarskog dnevnika: 03/01/2002 - 19/04/2004. godine, tj. 2,5 mjeseci nakon VI. dokiranja (10/2001) do VII. dokiranja (6/2004), [2].

U razdoblju praćenja od dvije godine i 3 mjeseca brod je, sa 16 godina starosti, već bio u graničnoj dobi za raspemu (sredinom 2005. godine je i rashodovan).

Na dijagramu, slika 4, prikazani su brzina broda, broj okretaja vijka i dnevni potrošak goriva u vremenu od 808 dana. Nije zabilježen pad brzine, koji bi inače proizišao zbog povećavanja hrapavosti u službi, pa se može zaključiti da je odgovarajuće kompenziran samopolirajućim AV premazom. Ta brzina u službi iznosi oko 12 čvorova, uz približno  $67 \text{ min}^{-1}$  vijka, tj. oko 2,6 čvorova manje od brzine na pokusnoj plovidbi ( $V_T \sim 14,6$  čvorova

### 5.1.1. Računanje hrapavosti oplakane površine

$$AHR_{\text{ukupna}} = AHR_{\text{početna}} + AHR_{\text{služba}} + AHR_{\text{dokiranja}} + AHR_{\text{obraštaj}}$$

$$\text{Početna hrapavost } AHR_p = 100 \mu\text{m (pretpostavljeno)}$$

Hrapavost zbog službe  $AHR_s$  (deterioracija, korozija, premazi, mehanička oštećenja)

$$AHR_{SA} = AHR_p = 100 \mu\text{m (pretpostavljeno)}$$

$$AHR_{SB} = 18 \text{ mj. nakon V. dokiranja:}$$

$$173 \text{ mjeseca} \cdot 2,80 \mu\text{m/mj.} = 484 \mu\text{m}$$

$$AHR_{SC} = \text{neposredno pred VI. dokiranje:}$$

$$187 \cdot 2,80 = 524 \mu\text{m}$$

$AHR_{SD} = 18$  mj. nakon VI. dokiranja:  
 $205$  mjeseci  $\cdot 2,80 = 574 \mu\text{m}$

$AHR_{SE} = 19/06/04$  neposredno pred VII. dokiranje:  
 $219 \cdot 2,80 = 613 \mu\text{m}$

Hrapavost zbog dokiranja  $AHR_D$

A:  $AHR_{DA} = 0 \mu\text{m}$   
 B:  $AHR_{DB} = 5 \cdot 14,00 = 70 \mu\text{m}$   
 C:  $AHR_{DC} = 5 \cdot 14,00 = 70 \mu\text{m}$   
 D:  $AHR_{DD} = 6 \cdot 14,00 = 84 \mu\text{m}$   
 E:  $AHR_{DE} = 6 \cdot 14,00 = 84 \mu\text{m}$

Procjena hrapavosti zbog obraštaja  $AHR_O$

MT Ist stalno plovi u Mediteranu pa je, prema tab.1, odabran faktor obraštaja  $HRF = 0,575$ . Godišnje vrijeme provedeno u luci (PT) iznosi 151 dan, odnosno 41,3 posto ukupnog vremena.

Za vrijeme V. i VI. dokiranja apliciran je AV premaz tvrtke SIGMA: Sigmaplane HB, SPC, Red. U izvješću za oba dokiranja spominje se obraštaj, očito je učinak biocida izostao.

SIGMA jamči da je AV sustav djelotvoran u vremenu od 36 mjeseci, pod uvjetom brzine veće od 13 čvorova, i godišnjoj plovidbi broda od 80 posto (> 290 dana u plovidbi). U potonjem slučaju brzina je bila ispod 13 čvorova, a u plovidbi je brod proveo samo 58,6 posto vremena, [10].

Prigodom VII. dokiranja primijenjen je novi sustav premaza, SIGMA AV Ecofleet/Red-Brown.

Procjena visine hrapavosti zbog obraštaja  $AHR_O$

V. – VI. dokiranje, razmak: 33,3 mjeseca

$PT_{33,3} = 151 \cdot 33,3/12 = 419$  dana

$CEFF_{33,3} = 1,0 - [2,72/e^Z - 0,24(Z - 1,0)^{0,263}] = 0,80277$  ( $Z = 33,3/18$ )

$AHR_{\text{obraštaj bokova}} = HRF \cdot PT \cdot CEFF =$   
 $= 0,575 \cdot 419 \cdot 0,80276 = 193,4 \mu\text{m}$

$AHR_{\text{obraštaj dna}} = 0,75 \cdot AHR_{\text{obraštaj bokova}} = 145,0 \mu\text{m}$

Ukupna visina hrapavosti obraštaja pred VI. dokiranje,  $AHR_{OIII} = 338,4 \mu\text{m}$

VI. – VII. dokiranje, razmak: 32,3 mjeseca

$PT_{32,3} = 151 \cdot 32,3/12 = 406,4$  dana

$CEFF_{32,3} = 1,0 - [2,72/e^Z - 0,24(Z - 1,0)^{0,263}] = 0,77427$  ( $Z = 32,3/18$ )

$AHR_{\text{obraštaj bokova}} = HRF \cdot PT \cdot CEFF =$   
 $= 0,575 \cdot 406,4 \cdot 0,77427 = 180,9 \mu\text{m}$

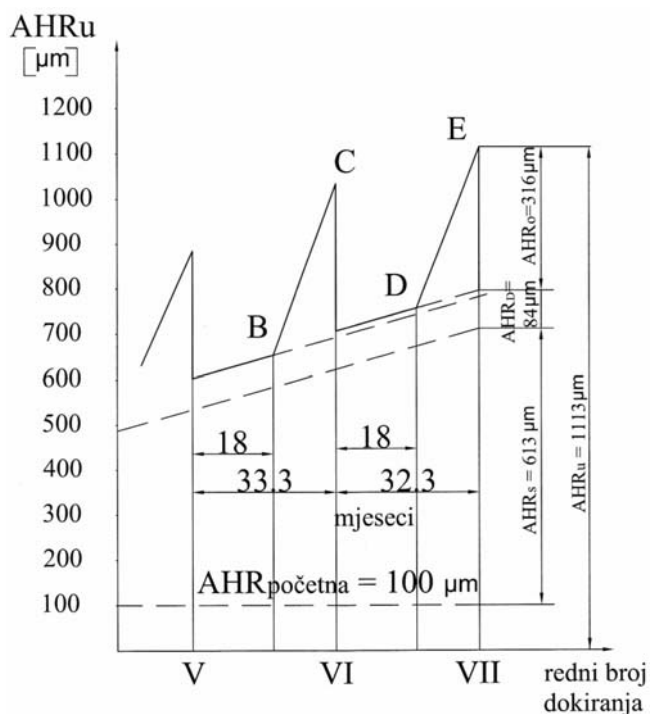
$AHR_{\text{obraštaj dna}} = 0,75 \cdot AHR_{\text{obraštaj bokova}} = 135,6 \mu\text{m}$

Ukupni obraštaj pred VII. dokiranje:  $AHR_{OV} = 316,5 \mu\text{m}$

U ovom slučaju, u formulu je uvršten realniji vijek trajanja AV premaza od 18 mjeseci.

Tablica 3 MT Ist - Prosječna hrapavost oplakane površine  $AHR_U$ ,  $\mu\text{m}$   
 Table 3 MT Ist - Average wetted hull roughness  $AHR_U$ ,  $\mu\text{m}$

Vrste hrapavosti	Vrijeme praćenja (prema slici 5)				
	A	B	C	D	E
Početna hrapavost $AHR_p$	100	100	100	100	100
Deterioracija (služba) $AHR_s$	0	484	524	574	613
Hrapavost zbog dokiranja $AHR_D$	0	70	70	84	84
Hrapavost zbog obraštaja $AHR_O$	0	0	338	0	316
Ukupna hrapavost $AHR_U$	100	654	1032	758	1113



Slika 5 MT Ist - Porast ukupne hrapavosti ( $AHR_U$ ) između V., VI. i VII. dokiranja. Obraštaj bi počeo 18 mjeseci nakon dokiranja.

Figure 5 MT Ist - Roughness changes between Docking Nos V, VI and VII. Fouling should start 18 months after drydocking

### 5.1.2. Proračun povećanja snage zbog hrapavosti oplakane površine trupa

U idućem je prikazu proračunat otpor trenja putem dodatka na hrapavost  $\Delta C_{FT}$  za opisanih pet praćenja (A-E) prema sl. 5 i u skladu s njihovim procijenjenim hrapavostima  $AHR_U$ .

Vrijeme praćenja:

- A Početno stanje, nakon primopredaje,  $AHR_U = 100 \mu\text{m}$ ,
- B 18 mjeseci nakon V. dokiranja = 173 mjeseca od primopredaje,  $AHR_U = 654 \mu\text{m}$ ,
- C Neposredno pred VI. dokiranje = 187 mjeseci od primopredaje,  $AHR_U = 1032 \mu\text{m}$ ,
- D 18 mj. nakon VI. dokiranja = 205 mjeseci starosti,  $AHR_U = 758 \mu\text{m}$ ,
- E 19/06/04, neposredno pred VII. dokiranje = 219 mjeseci,  $AHR_U = 1113 \mu\text{m}$ .

Dodatak na hrapavost za brod na pokusnoj plovidbi  $\Delta C_{FT}$  iznosi:

$$\Delta C_{FT} = [1,05 (AHR_p/L_{pp})^{1/3} - 0,64] \cdot 10^{-3} = 0,18926 \cdot 10^{-3}$$

gdje je  $AHR_p = 100 \mu\text{m}$  (pretpostavljeno za današnje novogradnje);  $L_{pp} = 203,00$  m.

Učinak hrapavosti oplakane površine na povećani otpor trenja računa se putem koeficijenta hrapavosti u službi  $C_s$ , kao razlika dodataka na hrapavost broda u službi i na pokusnoj plovidbi:

$$C_s = \Delta C_{FS} - \Delta C_{FT}$$

$$\Delta C_{FS} = [1,05(AHR_U/L_{pp})^{1/3} - 0,64] \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta C_{FS} = \Delta C_{FSB} = [1,05(654/203)^{1/3} - 0,64] \cdot 10^{-3} = 0,91077 \cdot 10^{-3}$$

$$C_{SB} = \Delta C_{FSB} - \Delta C_{FT} = (0,91077 - 0,18926) \cdot 10^{-3} = 0,72151 \cdot 10^{-3}$$

Primjenom koeficijenta hrapavosti  $C_s$  moguće je odrediti i povećanje snage zbog hrapavosti oplakane površine trupa  $\Delta P_{RB}$ :

$$\Delta P_{RB} = 0,5 \cdot \eta_D^{-1} \cdot \rho \cdot S \cdot V_S^3 \cdot C_{SB} \cdot 10^{-3}, \text{ kW}$$

$\rho$  - 1025 kg/m<sup>3</sup>

$\eta_D$  - ~ 0,7

$S$  - 12 650 m<sup>2</sup>

$V_S$  - 12,0; 13,0; 14,0; 15,0 čvorova; prosječne brzine u službi za puni gaz, m/s

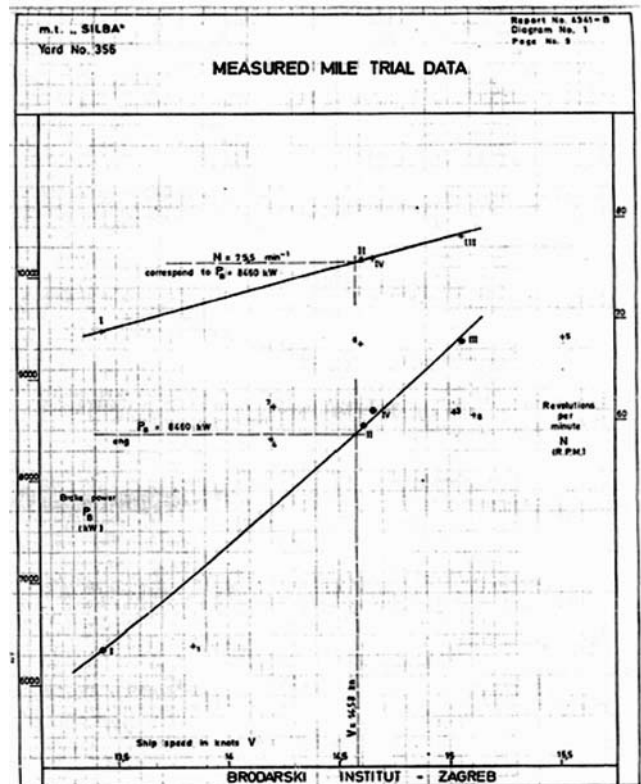
Povećanje snage zbog hrapavosti  $\Delta P_{RB}$ , pri  $V = 12,0$  čvorova:

$$\Delta P_{RB} = 1571 \text{ kW}$$

Tablica 4 **MT Ist - Povećanje snage zbog hrapavosti, prema dnevniku, u odnosu na uvjete pokusne plovidbe**  
Table 4 **MT Ist - Increase in effective power due to roughness (Engine Log Book), compared with Measured Mile Trial Data**

Vrijeme praćenja		B	C	D	E
$AHR_U, \mu\text{m}$		654	1032	758	1,113
$C_s \cdot 10^{-3}$		0,72151	0,97618	0,79971	1,02223
$V$	$PT$	$\Delta P_{RB}$	$\Delta P_{RC}$	$\Delta P_{RD}$	$\Delta P_{RE}$
čvorovi	kW	kW			
12	4450	1571	2126	1742	2226
13	5700	1998	2704	2215	2831
14	7350	2498	3379	2768	3539
15	9300	3069	4152	3402	4348

Snaga u službi može se približno izračunati i na osnovu potroška goriva. Prema dnevniku prosječni dnevni potrošak goriva iznosio je oko 30 t. Uz pretpostavljeni specifični potrošak oko 180 g/kWh (*MAN B&W* motor 4L80 MC, godina proizvodnje 1985, nakon 18 godina službe), dolazi se do kočene snage:  $P_B = 30/0,18 \cdot 24 \cdot 10^{-3} \sim 6900$  kW. Pretpostavivši srednju snagu u službi, iz gornje tablice,  $P_S = 6200$  kW; razlika od 700 kW bi se mogla pripisati utjecaju vjetra i mora. Ipak, ti ključni podaci manjkaju iz dnevnika, pa se točno kvantificiranje spomenutih utjecaja ne može napraviti. Naravno, u proračunu nije uzet u obzir otpor vjetra i valova.



Slika 6 **MT Ist - Krivulja pokusne plovidbe [11]**

Figure 6 **MT Ist - Measured Mile Trial Data [11]**

### 5.1.3. Validacija ITTC-1978 formule za izračunavanje dodatka na hrapavost

Za točnije vrednovanje ITTC-1978 formule treba odrediti stvarne koeficijente i eksponente funkcija krivulja pokusne plovidbe  $T$ , službe  $S$  i, u kasnijem razdoblju eksploatacije, krivulju apsorpcije snage u ovisnosti o broju okretaja vijka. U proračun treba pridodati i otpor vjetra i valova.

Krivulja trajne snage u službi  $S$  izvedena je iz krivulje pokusne plovidbe  $T$  i dodatka na službu u iznosu od 15 posto. Dodatak varira ovisno o pogledima vlasnika, te vrsti i veličini broda, a kreće se između 10 i 25 posto. Ukupni otpor broda raste od samoga početka eksploatacije do kraja (najčešće se uzima oko 2 posto godišnje), dok će brzina i broj okretaja vijka padati. Pritom obraštenost trupa, valovi, vjetar, morske struje, popravljive deformacije trupa itd. predstavljaju prigodno, promjenljivo povećanje otpora. Također se može konstatirati da s godinama opada učin glavnoga stroja. Kao dokaz za spomenuto kontinuirano opadanje performansi brodskoga trupa uzima se i činjenica da se nakon svakog novog dokiranja može zabilježiti izvjestan pad brzine pri istoj snazi, tj. brod se ne vraća u stanje ekvivalentno onom nakon prvog dokiranja uoči primopredaje.

Ima brodovlasnika koji stoga, računajući da će prvi radni vijek vijka trajati kakvih pet godina i potom biti zamijenjen pričuvnim, potonjeg unaprijed dimenzioniraju lakšim. Također se mogu čuti mišljenja da se brodski vijak treba tretirati kao potrošnu robu i promijeniti kroz eksploatacijsko razdoblje od dvadesetak godina nekoliko propelera. Pritom bi trebalo svaki novi vijak projektirati apsorpcijski lakšim da bi se spriječio pad okretaja zbog stalnoga povećavanja otpora.



Prema podacima iz strojarskog dnevnika, vezano za potrošak goriva i procijenjenu snagu od 6900 kW, izvedena je usporedba krivulja apsorpcije snage na temelju povećane hrapavosti u odnosu na krivulju pokusne plovidbe. Na osnovi prosječne srednje brzine od 12 čvorova analiziran je vremenski interval između V. i VII. dokiranja.

Odabrana su dva događaja, prema slici 5, tj. C (neposredno pred VI. dokiranje) pri hrapavosti  $AHR_{UC} = 1032 \mu\text{m}$ , i E (neposredno pred VII. dokiranje), pri hrapavosti  $AHR_{UE} = 1113 \mu\text{m}$ .

Valja naglasiti da su to izračunati iznosi srednje prosječne hrapavosti  $AHR_U$ , dakle mjerenja nisu očitana na samom brodu za vrijeme dokiranja.

Krivuljama povećane snage zbog hrapavosti ( $\Delta P_{RC}$  i  $\Delta P_{RE}$ ), v. tablica 4, dodano je i povećanje snage zbog utjecaja valova i vjetra i predstavljeno krivuljama  $\Delta P_{SC}$  i  $\Delta P_{SE}$ , dano i u tablici 5, [5].

Konačne, aktualne krivulje apsorpcije snage vijka,  $P_{SC}$  i  $P_{SE}$ , u razdoblju praćenja pri kraju eksploatacijskog razdoblja broda, tj. neposredno pred VI. i VII. dokiranje, izvedene su zbrajanjem ordinata izvorne krivulje pokusne plovidbe  $T$  i spomenutih krivulja  $\Delta P_{SC}$  i  $\Delta P_{SE}$ , prema tablici 5.

Na osnovi navedenih proračuna moguće je napraviti validaciju ITTC-1978 formule za hrapavost:

Elementi proračuna za tanker *Ist*

$$T = 12,645 \text{ m}$$

$$MCR = 10\,300 \text{ kW}$$

$$SCR = 8460 \text{ kW}$$

$$V_T = 14,58 \text{ čvorova}$$

$$P_S = 6900 \text{ kW, procijenjena trajna snaga u službi, temeljem potroška goriva}$$

$$V_S = \sim 12,0 \text{ čvorova}$$

Svakako da se i sadašnji postotak dodatka na hrapavost u odnosu na izvorni znatno razlikuje, kako je i artikulirano u prethodnom tekstu.

Prvotno određeni

$$\text{postotak} = (P_S - T)/T = (5117 - 4450)/4\,450 = 15\%$$

Sadašnji stvarni

$$\text{postotak} = (P_{SC} - T)/T = (7107 - 4450)/4\,450 = 60\%$$

$$\text{odnosno: } (P_{SE} - T)/T = (7232 - 4450)/4\,450 = 62,5\%$$

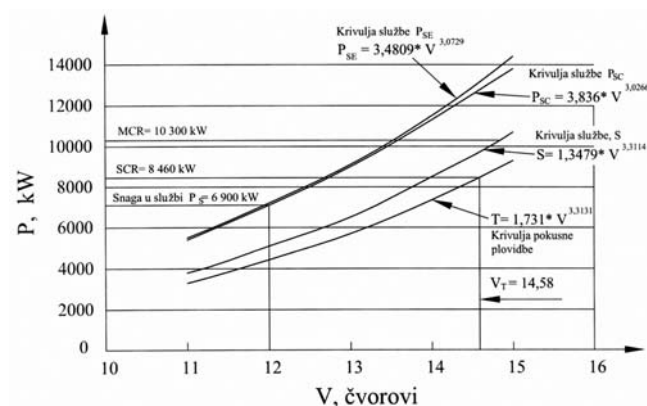
Tablica 5 **MT Ist - Usporedba krivulja pokusne plovidbe i službe u odnosu na kasnija povećanja snage zbog hrapavosti, pred VI. i VII. dokiranje broda**

Table 5 **MT Ist - Trial and service power comparison vs power increment due to roughness, before Docking Nos VI and VII**

			Vrijeme praćenja pred šesto (C) i sedmo (E) dokiranje								
			C		E		C		E		
$AHR_U, \mu\text{m}$			1 032	1 113	1 032	1 113	1 032	1 113			
Brzina	Krivulja pokusne plovidbe (očitano)	Krivulja službe	Povećanje snage zbog hrapavosti		Ukupno povećanje snage zbog hrapavosti, valova i vjetra		Ukupna snaga pred šesto dok.		Ukupna snaga pred sedmo dok.		
$V$	$T$	$S=1,15 T$	$\Delta P_{RC}$	$\Delta P_{RE}$	$\Delta P_{SC}$	$\Delta P_{SE}$	$P_{SC}$	$P_{SE}$			
čvorovi	kW										
11	3310	3806	1638	1 715	2121	2 221	5431	5531			
12	4450	5117	2 126	2 226	2657	2 782	7107	7232			
13	5700	6555	2 704	2 831	3285	3 440	8985	9140			
14	7350	8452	3 379	3 539	4021	4 211	11 371	11 561			
15	9300	10 695	4 152	4 348	4558	5 087	13 858	14 387			

Slika 7 **MT Ist - Usporedba krivulja pokusne plovidbe i službe u odnosu na kasnija povećanja snage zbog hrapavosti, pred VI. dokiranje ( $AHR=1032 \mu\text{m}$ ) i VII. dokiranje broda ( $AHR = 1113 \mu\text{m}$ )**

Figure 7 **MT Ist - Trial and service power comparison vs power increment due to roughness, before Docking No VI ( $AHR = 1032 \mu\text{m}$ ) and Docking No VII ( $AHR = 1113 \mu\text{m}$ )**



Validacija ispravnosti ITTC-1978 formule dodatka za hrapavost, u odnosu na sadašnju brzinu od 12 čvorova i procijenjenu snagu u službi ( $P_S = 6900 \text{ kW}$ ):

$$AHR_{UC} = 1032 \mu\text{m, pred VI. dokiranje: } (P_{SC} - P_S)/P_S = (7\,107 - 6900)/6900 = +3\%$$

$$AHR_{UE} = 1113 \mu\text{m, pred VII. dokiranje: } (P_{SE} - P_S)/P_S = (7\,232 - 6900)/6900 = +4,8\%$$

Prema slici 7, najveće brzine koje bi se pri  $SCR = 8460 \text{ kW}$  mogle postići, iznose:

$$\text{za snagu u službi } P_{SC} \text{ pri } AHR = 1032 \mu\text{m, } V_{\text{maxC}} = (8\,460 / 3,836)^{1/3,0266} = 12,72 \text{ čvora za snagu u službi } P_{SE} \text{ pri } AHR = 1113 \mu\text{m, } V_{\text{maxE}} = (8\,460 / 3,4809)^{1/3,0729} = 12,64 \text{ čvora}$$

#### 5.1.4. Računanje hrapavosti brodskog vijka

Prikaz hrapavosti vijka, prema 3.1, dan je u tablici 6.

Tablica 6 **MT Ist - Ukupna prosječna hrapavost vijaka,  $APR_U$ ,  $\mu\text{m}$**   
 Table 6 **MT Ist - Average propeller roughness,  $APR_U$ ,  $\mu\text{m}$**

Vrste hrapavosti	Vrijeme praćenja (prema slici 5)				
	A	B	C	D	E
Početna hrapavost $APR_p$	30	30	30	30	30
Deterioracija (služba) $APR_s$	0	311	319	349	386
Hrapavost zbog dokiranja $APR_D$	0	-50	-50	-60	-60
Hrapavost zbog obraštaja $APR_o$	10	104	0	116	15
Ukupna hrapavost $APR_U$	40	395	299	435	371

Jedan od načina računanja gubitka snage zbog hrapavosti vijaka, [12]:

$$\Delta P/P \cdot 100\% = 1,107 \cdot (APR)^{1/3} - 1,479 \quad (APR > 8 \mu\text{m}) \quad (13)$$

Tablica 7 **MT Ist - Pad stupnja djelovanja vijaka zbog hrapavosti (strojarski dnevnik)**

Table 7 **MT Ist - Decrease in propulsion efficiency due to propeller roughness (Engine Log Book)**

	Vrijeme praćenja (prema slici 5)				
	A	B	C	D	E
Ukupna hrapavost $APR_U$	40	395	299	435	371
$\Delta P/P \cdot 100\%$	2,3	6,6	5,9	6,9	6,4

### 5.1.5. Apsorpcija snage

Maksimalna trajna snaga iznosi:  $MCR = 10\,300 \text{ kW}$  pri  $79 \text{ min}^{-1}$ , uz odgovarajući moment  $T_{MCR} = 9,55 \cdot (P/N) = 9,555 \cdot (10\,300/79) = 1246 \text{ kNm}$ . Snaga  $SCR = 8460 \text{ kW}$  apsorbirana je pri  $75,5 \text{ min}^{-1}$ , uz postignutu brzinu od  $V_T = 14,58 \text{ čvorova}$ . Dok snaga od  $8460 \text{ kW}$  iznosi 82 posto  $MCR$ , moment  $T_{SCR}$  doseže 86 posto momenta  $T_{MCR}$ , tj.  $T_{SCR}/T_{MCR} = 1071/1246 = 0,86$ , što upućuje na preteški vijak. I doista, na pokusnoj plovidbi pri nominalnom broju okretaja od  $79 \text{ min}^{-1}$ , vijak apsorbira  $9690 \text{ kW}$ , tj. 94 posto

$MCR$ . Ispravno bi bilo da u uvjetima pokusne plovidbe vijak apsorbira snagu  $SCR$  ili, budući da je ona nešto niže odmjerenja, snagu koja se kreće oko 85 posto  $MCR$ , nipošto ne više od 90 posto  $MCR$ . Dakle može se zaključiti da je vijak projektiran preteškim, što će se nepovoljno odraziti na rad motora u službi.

Brzine nakrcanog broda u službi kretale su se od 11,6 do 12,6 čvorova, tipično oko 12 čvorova, pri srednjem broju okretaja od  $69 \text{ min}^{-1}$ , dnevnom potrošku goriva oko 30 t i snazi oko 6900 kW, uz specifični potrošak goriva oko 180 g/kWh. I dok se prividni slip  $s_A$  na pokusnoj plovidbi kretao oko 7 posto, u službi je prelazio 16 posto, što je uglavnom posljedica porasta hrapavosti podvodnog dijela broda. Jako sniženom brzinom vrtnje vijaka – čak za  $10 \text{ min}^{-1}$  manje od nominalnih - zacijelo se nastojalo izbjeći preveliki pad omjera snage i brzine vrtnje  $P/N$ , inače bi se realni broj kretao oko  $76 \text{ min}^{-1}$ . Spomenuti omjer  $P/N$  pri  $MCR$  iznosi 130, pri  $SCR$  na pokusnoj plovidbi 112, a u službi se spustio na  $P/N = 6900/69 = 100 \text{ kW/min}$ . Napokon preniska snaga u službi, iznoseći svega 67 posto  $MCR$ , nepovoljno utječe na rad motora, poglavito na izgaranje, ispiranje i ispušnu emisiju, uz povišeni specifični potrošak goriva.

## 5.2. Brod Pelješac

Značajke broda

$L_{oa}$	= 232,80 m
$L_{pp}$	= 220,00 m
$B$	= 32,20 m
$H$	= 18,60 m
$T$	= 13,49 m
$DW$	= 71 229 t
$\Delta$	= 85 172 t, pri ljetnom gazu $T = 13,849 \text{ m}$
$S$	= 5500 m <sup>2</sup> (dno) + 6950 m <sup>2</sup> (bokovi i pojas gaza) = 12 450 m <sup>2</sup>
Glavni stroj:	3.maj-Sulzer, 4RLA90, snage $MCR = 10\,000 \text{ kW}$ pri $90 \text{ min}^{-1}$ ,

$SCR = 8\,500 \text{ kW}$  pri  $85 \text{ min}^{-1}$

Četverokrilni vijak,  $D = 7,10 \text{ m}$ ,  $P = 5,27 \text{ m}$

Ulazak u službu: 02/1984 (nakon 'nultog' dokiranja).

Napomena: praćenje od 11/01/2002 - 21/08/2004. godine.

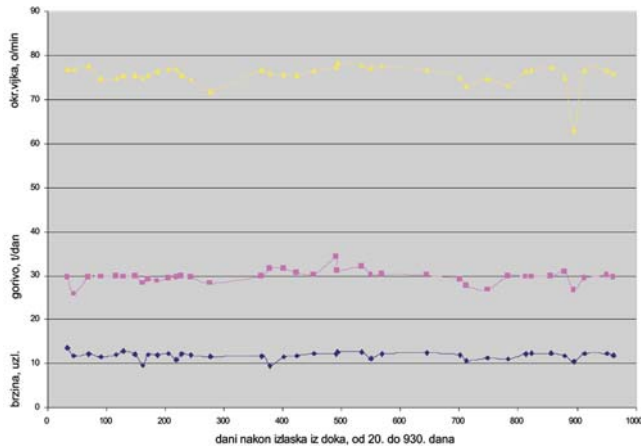
Tablica 8 **MB Pelješac, Izvadak iz strojarskog dnevnika**

Table 8 **MB Pelješac, Engine Log Book (excerpt)**

Balast = B, Natovaren = L aden = L									
	Luka		Prev. milje	Vrijeme		Brzina	Gorivo	G/dan	Okretaji
				Plovidba	Luka				
2002 g.			Nm	h	h				
11/01-23/01	Santander – Trombetas	B	3767	285,15	231	13,20	357,7	30,06	79,32
02/02-05/02	Trombetas – Trinidad	L	1127	82,45	9	13,65	103,0	29,8	77,10
05/02-13/02	Trinidad – Port Alfred	L	2254	190,00	430	11,86	205,3	26,0	76,94
03/03-03/03	Port Alfred – 7-Islands	B	140	12,35	47	12,35	16,7	31,8	77,80
05/03-10/03	7-Islands – Sparrows Point	L	1382	112,30	187	12,28	140,2	29,8	77,76
18/03-22/03	Sparrows Point – 7-Islands	B	1334	110,5	105	12,03	137,3	29,73	76,20
26/03-31/03	7-Islands – Sparrows Point	L	1360	117	245	11,62	146,0	29,9	74,82
09/04-15/04	Sparrows Point – Maracaibo	B	1644	129,30	78	12,69	161,3	29,89	76,60
19/04-27/04	Maracaibo – Belledune	L	2496	206	8	12,1	257,2	29,96	75,00

U razdoblju praćenja broskog dnevnika za vrijeme od dvije godine i 7 mjeseci brod je, od njegove navršene 17. godine do 20,5 godina, bio već u dobi za rashod. Brzina je pala za 2,3 čvora u odnosu na početnu od 14,5 čvorova tako da je sadašnja oko 12,2 čvora pri tipičnoj brzini vrtnje vijka od  $76 \text{ min}^{-1}$ . Prosječni dnevni potrošak goriva iznosi 29 t, [3]

Na dijagramu, sl. 8, prikazani su brzina broda, broj okretaja vijka, te dnevni potrošak goriva u vremenu od 930 dana. Nije opažen pad brzine, odnosno može se zaključiti da on postoji, ali se veličinski kompenzira poliranjem AV premaza, pa se i brzine nisu mijenjale.



Slika 8 MB Pelješac - Praćenje brzine, potroška goriva i okretaja vijka prema izvodu iz strojarskog dnevnika (od 20-og do 930-og dana nakon dokiranja)

Figure 8 MB Pelješac - Engine Log Book Monitoring: Average Speed, Daily Fuel Consumption, Propeller (rpm); (from 20th until 930th day after docking)

Kako se vidi iz slike 8, nema zamjetnijih padova brzine, odnosno porasta potroška goriva. Razlog je u činjenici što kod starih brodova, s velikom hrapavošću  $AHR$ , dalje povećavanje hrapavosti nema više velikog utjecaja na brzinu i snagu. Ipak, i manji pad brzine, koji se neminovno događa, kompenziran je učinkom poliranja AV premaza.

Obavljeno je ukupno 8 dokiranja kako slijedi:

I (10/86), II (03/89), III (05/91), IV (06/93), V (07/95),

VI (01/03/98, Cadiz), VII (08/11/00, Pirej), VIII (04/12/02, Istanbul).

AV sustav zaštite koji je apliciran između VII. i VIII. dokiranja, Hempel 7199B COMBIC TBT Free AV premaz, koristio se i kod VIII. dokiranja. Djelotvornost premaza od 30 mjeseci uvjetovana je minimalnom brzinom od 13 čvorova i aktivnošću broda od 80 posto (> 290 dana u plovidbi). Iz dnevnika je vidljivo da oba uvjeta nisu ispunjena. Prigodom sva tri dokiranja primijećene su mjestimične nakupine algi na pojasu gaza i početak naseljavanja balanida na ravnoj plohi dna broda, [13].

Vrijeme praćenja

- A Početno stanje nakon primopredaje,  $AHR_{početna} = 100 \mu\text{m}$ ,  
 B Pred VII. dokiranje = 199 mjeseci,  $AHR_U = 1108 \mu\text{m}$ ,  
 C 18 mjeseci nakon izlaska iz doka = 217 mjeseci,  $AHR_U = 806 \mu\text{m}$ ,  
 D Neposredno pred VIII. dokiranje = 224 mjeseca,  $AHR_U = 1025 \mu\text{m}$ ,

E 21/08/04, posljednji dan praćenja dnevnika = 246 mjeseci;  $AHR_U = 916 \mu\text{m}$ .

Proračun ukupne hrapavosti  $AHR_U$

$$AHR_{ukupna} = AHR_{početna} + AHR_{služba} + AHR_{dokiranja} + AHR_{obraštaj}$$

Tablica 9 MB Pelješac, Prosječna hrapavost oplakane površine  $AHR_U, \mu\text{m}$

Table 9 MB Pelješac, Average wetted hull roughness  $AHR_U, \mu\text{m}$

Vrste hrapavosti	Vrijeme praćenja				
	A	B	C	D	E
Početna hrapavost $AHR_p$	100	100	100	100	100
Deterioracija(služba) $AHR_s$	0	557	608	627	689
Hrapavost zbog dokiranja $AHR_d$	0	84	98	98	112
Hrapavost zbog obraštaja $AHR_o$	0	367	0	200	15
Ukupna hrapavost $AHR_U$	100	1108	806	1025	916

Kako su oba broda praktički iste veličine, snage u službi i starosti, lako se može pokazati da će i otpori zbog hrapavosti MB Pelješca biti približno jednaki kao kod MT Ista:

- MB Pelješac, stanje C (18 mjeseci nakon izlaska sa sedmog dokiranja, tj. pred početak obraštaja i 217 mjeseci starosti broda) pri prosječnoj hrapavosti čistog broda  $AHR_U = 806 \mu\text{m}$ .
- MT Ist, stanje D (18 mjeseci nakon izlaska sa šestog dokiranja, tj. pred početak obraštaja i 205 mjeseci starosti broda) pri prosječnoj hrapavosti čistog broda  $AHR_U = 758 \mu\text{m}$ .

### 5.2.1. Proračun porasta snage primjenom iskustvene aproksimacije

U prethodnom primjeru (MT Ist) prikazan je proračun porasta snage zbog hrapavosti primjenom ITTC 1978 formule, te povećanje snage zbog utjecaja valova i vjetrova. Aktualne krivulje apsorpcije snage vijka,  $P_{sc}$  i  $P_{se}$ , izvedene su zbrajanjem ordinata izvorne krivulje pokusne plovidbe  $T$  i spomenutih krivulja  $\Delta P_{sc}$  i  $\Delta P_{se}$ .

Primjenom iskustvene aproksimacije  $P_2/P_1 = (V_2/V_1)^3$ , također je moguće s dostatnom točnošću odrediti porast snage nakon određenog vremena.

MB Pelješac:

Elementi proračuna pri gasu  $T = 13,849 \text{ m}$ :

$MCR = 10\,000 \text{ kW}$

$SCR = 8500 \text{ kW}$

$V_T$  pri  $8500 \text{ kW} = 14,5 \text{ čvorova}$

$P_B = P_T = C_T \cdot V_T^3, \text{ kW}$

$P_T = C_T \cdot 14,5^3 = C_T \cdot 3048,62$ ;  $C_T = 8500 / 3048,62 = 2,788$

$P_T = 2,788 \cdot V_T^3, \text{ kW}$

$P_S = 7000 \text{ kW}$

$V_S = 12,2 \text{ čvora}$

$P_S = C_S \cdot 12,2^3 = C_S \cdot 1815,8$ ;  $C_S = 7000 / 1815,8 = 3,855$

$P_S = 3,855 \cdot V_S^3, \text{ kW}$

Nakon 18 godina službe, pri prosječnoj snazi u službi od  $7000 \text{ kW}$ , brod razvija prosječnu brzinu od  $12,2 \text{ čvora}$ . Za istu brzinu, pri uvjetima pokusne plovidbe potrebna je snaga od svega  $5060 \text{ kW}$ .

$(P_S = 8500 \cdot (12,2/14,5)^3 = 5060 \text{ kW}$  ili  $P_S = 2,788 \cdot 12,2^3 = 5060 \text{ kW}$ )

Smanjenje brzine:  $V_T - V_S = 14,5 - 12,2 = 2,3$  čvorova

Primjenom trajne snage u službi (SCR) za brod starosti 18 godina, najveća brzina iznositi će:

$V_{SCR} = (8500/3,855)^{1/3} = 13$  čvorova

Razlika brzine:  $V_{SCR} - V_S = 13,0 - 12,2 = 0,8$  čvorova

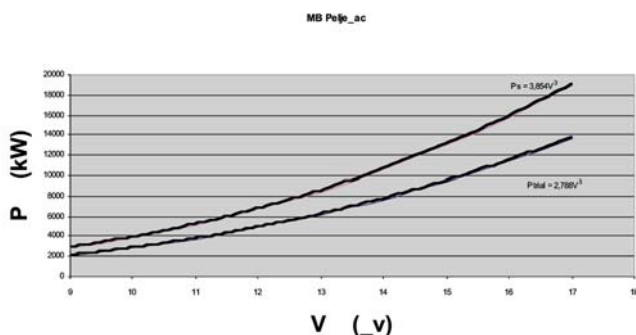
Dakle, za povećanje brzine od svega 0,8 čvorova, tj. 6,5 posto od postojeće brzine, treba utrošiti 21,4 posto više snage:

$(P_{SCR} - P_S) / P_S = (8500 - 7000) / 7000 = 21,4 \%$

Prvotnu brzinu moguće je postići snagom:

$P = 3,855 \cdot 14,5^3 = 11\,750 \text{ kW}$

Očito je da ovaj iznos daleko prelazi i maksimalnu trajnu snagu ( $MCR=10\,000 \text{ kW}$ ).



Slika 9 MB Pelješac: Usporedba krivulje snage na pokusnoj plovidbi,  $P_T = 2,788 \cdot V_T^3$  i sadašnje krivulje službe, nakon 18 godina,  $P_S = 3,855 \cdot V_S^3$

Figure 9 MB Pelješac: Trial data curve,  $T = P_T = 2,788 \cdot V_T^3$ , compared with current service data curve,  $P_S = 3,855 \cdot V_S^3$  (18 years aged vessel)

## 6. Moguće izravne uštede

U nastavku ovog rada preporučuju se moguća rješenja za smanjenje AHR oplakane površine. Smisao je takvih zahvata vraćanje odnosno približavanje izvornom stanju supstrata. Takva radikalna rješenja (pjeskarenje, primjena novog AC i AV premaznog sustava i obrada vijka) predlažu se jednom ili dva puta tijekom službe broda. Poželjno je, da prvi takav zahvat bude proveden između pete i desete godine eksploatacije. Već i kratka računica pokazuje opravdanost takve odluke.

Značajke najnovije generacije VLCC tankera 300 000 DWT, [7]:

$L_{OA} = 331 \text{ m}$ ,  $S = 28\,094 \text{ m}^2$ ,  $V_T = 15,85$  čvorova,  $MCR = 29\,350 \text{ kW}$ ,  $SCR = 24\,950 \text{ kW}$

Dnevni potrošak HFO =  $24\,950 \cdot 170 \cdot 10^{-6} \cdot 24 \sim 102 \text{ t/dan}$

Godišnji trošak goriva AFC:  $300 \text{ dana} \cdot 102 \cdot 250 \text{ USD/t} = 7,65 \text{ mil USD}$

Pri razlici ukupne prosječne hrapavosti od samo  $150 \mu\text{m}$ , iznosa akumuliranog nakon 4-5 godina službe:

$AHR_{RAZLIKE} = AHR_{4-5 \text{ godina}} (250 \mu\text{m}) - AHR_{početni, novi brod} (100 \mu\text{m}) = 150 \mu\text{m}$

Brodovlasnik je pred izborom:

-ili respektirati smanjenje brzine, snaga se ne mijenja (tankeri, brodovi za rasuti teret)

$AHR \ 25 \mu\text{m} \sim 1 \%$  brzine  $\cdot 150 \mu\text{m} / 25 = 6 \%$

$V_S = 15,85 \cdot 0,95 = 14,9$  čvorova

Godišnje manje prijeđenih milja:  $300 \cdot 24 \cdot 0,95 = 6840 \text{ Nm}$ ,

odnosno izgubljenih dana:  $6840 / (24 \cdot 14,9) = 19,1$  dan, ili -povećati snagu da bi očuvao početnu brzinu (putnički, kontejnerski brodovi)

$AHR = 10 \mu\text{m} \sim 1 \%$  goriva  $\cdot 150 \mu\text{m} / 10 = 15 \%$

Godišnji trošak goriva (za gornji VLCC), AFC  $\sim 1,14$  mil USD

Održavanje designirane brzine u službi u pravilu uvjetuje povećavanje snage, odnosno posezanje za njezinom pričuvom. Praktički to znači povremeno približavanje, ili doseganje maksimalne trajne snage MCR. U praksi se to osobito događa kod putničkih i kontejnerskih brodova, gdje se strogo respektira red plovidbe, da bi se izbjeglo plaćanje oštete za moguće kašnjenje. Zadržavanje iste snage, uglavnom SCR, npr. tankeri i brodovi za rasuti teret, podrazumijeva pad brzine u službi.

Stalni razvoj AV premaza povećao je upravo dramatično granice djelatnosti. Od ne tako davne godine 1955., kada profesori Šilović i Fancev pišu u Izvještaju Brodarskog instituta da je potrošak goriva zbog obraštaja narastao više od 50 posto unutar samo tri mjeseca od dokiranja za sva četiri putnička broda tipa Osijek, današnji AV i FRC premazi jamče djelatnost i do 5 godina, [14].

Ipak, realni vijek trajanja današnjih AV premaza u pravilu je niže djelatnosti od deklarirane, i iznosi najviše 36 mjeseci. Uz to, nužne uvjete proizvođača premaza - najčešće 80 posto vremena u plovidbi, tj. blizu 300 dana u plovidbi godišnje(!), i brzine iznad 13 čvorova - nije lako postići.

Odabir AV premaza svodi se danas na dvije osnovne skupine:

- samopolirajuće premaze s neškodljivim biocidima i
- najnovije silikonske premaze i premaze na temelju mikrovlakana.

Dva su pristupa održanju oplakane površine broda:

a) stalni popravci AC premaza (touch up) pri svakom dokiranju uz aplikaciju standardnih AV premaza,

b) pjeskarenje svih, vremenom akumuliranih AC i AV slojeva premaza do gologa supstrata, i primjena novoga sustava AC i AV premaza.

Slika 10 MT Ist, VII. dokiranje; Izgled oplakane površine pred čišćenje VT pumpama

Figure 10 MT Ist, Docking No VII; Wetted surface condition before high pressure washing





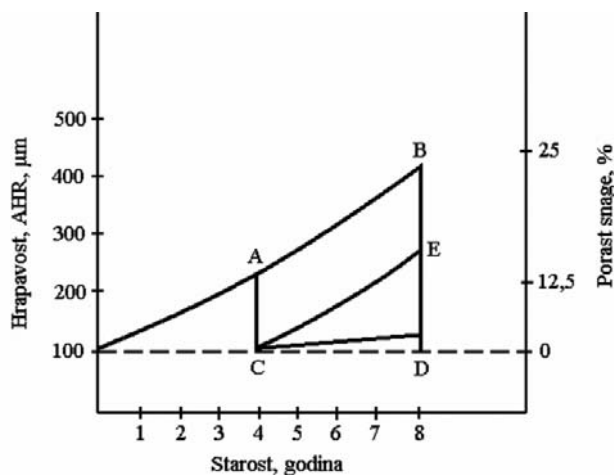
Slika 11 MT Ist, VII. dokiranje; Djelomično pjeskarenje OPB (Sa 2) i popravak AC premaza  
Figure 11 MT Ist, Docking No VII; Spot sand blasting (Sa 2) and AC touch up coating renewal

Postupkom pjeskarenja zamjetno se snizuje opća hrapavost podloge. Ipak, izvornu od  $100 \mu\text{m}$  nije moguće postići. Realno se dosižu vrijednosti od  $125 \mu\text{m}$ , u slučaju primjene u četvrtoj godini starosti broda, odnosno  $175 \mu\text{m}$ , nakon osme godine.

Većina brodara u pravilu ne prakticira pjeskarenje i primjenu novih AC i AV sustava premaza, vodeći se strategijom najmanjih ulaganja. Naime najjači brodari prodaju brodove unutar prve polovine vijeka broda. Brodovlasnici koji kupuju takve brodove na polovini životnog vijeka, a pogotovu oni koji iz treće ruke kupuju brod, neće prići takvom zahvatu. To je ipak najpreporučljivije tvrtkama koje namjeravaju zadržati brod za cijelo vrijeme eksploatacije.

Na slici 12 vidljiv je porast snage pri održanju brzine, tj. povećani potrošak goriva. Točke A i B predstavljaju stanje oplata nakon četvrte, odnosno osme godine. Točka C daje stanje površine nakon pjeskarenja. Točka E pokazuje stanje nakon četiri godine pri standardnim (Long Life) AV premazima, a točka D stanje pri SPC AV premazima. Prikazani postoci (12,5 posto i 25 posto) su približni, na osnovi praćenja većeg broja brodova, [15].

Slika 12 Porast hrapavosti i odgovarajuće povećanje snage, pri održanju iste brzine  
Figure 12 Development of hull roughness and corresponding increase in power at constant speed



Proizlazi da bi najmanje jednom za života broda trebalo temeljito ispjeskariti oplatu i primijeniti novi sustav AC i AV premaza. U pravilu je to radionički premaz (shop primer):  $20 \mu\text{m} + 3 \times 80 \mu\text{m}$  DFT AC +  $2 \times 125 \mu\text{m}$  DFT AV, alternativno:  $20 \mu\text{m} + 2 \times 125 \mu\text{m}$  AC +  $2 \times 125 \mu\text{m}$  DFT AV.

Debljina DFT = 20, 80  $\mu\text{m}$  ili 125  $\mu\text{m}$  uvijek se odnosi na visinu (debljinu) suhoga filma premaza.

Dobro održavanje vijka pak, uključuje poliranje površine čak i u međudokiranjima, tj. u lukama za vrijeme pretovara. Važnost toga pokazuje usporedba stupnja djelovanja vijka pri nižim i višim hrapavostima. U nižim područjima hrapavosti (oko  $30 \mu\text{m}$ ), što je ujedno i standard APR-a za novi vijak, stupanj djelovanja pada za  $\sim 0,2\%/1 \mu\text{m}$  povećanja hrapavosti, [5]. Porastom hrapavosti za, primjerice, daljih  $27 \mu\text{m}$  (novi APR =  $57 \mu\text{m}$ ) smanjio bi se stupanj djelovanja za 5,4 posto.

Zanimljivo je da kod visoke obraštenosti vijka, od 650 do  $1300 \mu\text{m}$ , hrapavost zamjetno manje utječe na stupanj djelovanja vijka, tj.  $\sim 0,015\%/1 \mu\text{m}$  povećanja hrapavosti. Tako zbog razlike od  $650 \mu\text{m}$ , stupanj djelovanja past će za  $0,015 \cdot 650 = 9,75$  posto. Dakle, usporede li se stupnjevi pada djelovanja pri nižim i višim iznosima hrapavosti APR, znatno je veći učinak kod nižih hrapavosti, i više od 13 puta ( $0,2/0,015 = 13,33$ ). Stoga je važno, od samoga početka službe, održavati vijak čistim i glatkim.

## 6.1. Moguće intervencije u praksi

### Uštede za MT Ist

Obradom površine prema programima proizvođača premaza [10], [13] i [17], te savjetu konzultanta, [16]: pjeskarenje (Sa 2 ½) + Primer  $20 \mu\text{m} + 3 \times 80 \mu\text{m}$  AC +  $2 \times 125 \mu\text{m}$  AV, osjetno se smanjuje opća hrapavost OPB.

U kraćem primjeru opisane su uštede koje su se mogle postići da se takvom zahvatu prišlo za vrijeme III. dokiranja, tj. nepunih 8 godina službe.

Pad brzine nakon 219 mjeseci službe:

$$V_T - V_S = 14,58 - 12,0 = 2,58 \text{ čvorova, tj. } \Delta V = 2,58/219 = 11,78 \cdot 10^{-3} \text{ čvorova/mjesečno (pretpostavljen je linearni pad brzine).}$$

$$\text{Pad brzine pred III. dokiranje: } \Delta V = 94 \text{ mjeseca} \cdot 11,78 \cdot 10^{-3} = 1,1 \text{ čvor.}$$

$$\text{Slijedi: } V_{S,III} = V_T - \Delta V = 14,58 - 1,1 = 13,48 \text{ čvorova.}$$

Računanje hrapavosti

$$\begin{aligned} AHR_{\text{službe}} &= 96 \cdot 2,8 &= 269 \mu\text{m} \\ AHR_{\text{dokiranje}} &= 2 \cdot 14 &= 28 \mu\text{m} \\ AHR_{\text{ukupno}} &&= 297 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Izvorna hrapavost od oko  $100 \mu\text{m}$ , nakon pjeskarenja ne može se uspostaviti, ali je realno očekivati nakon osam godina, oko  $175 \mu\text{m}$ :

$$\begin{aligned} \Delta C_{FS1} &= [1,05 (175/203)^{1/3} - 0,64] \cdot 10^{-3} = 0,35931 \cdot 10^{-3} \\ \Delta C_{FS2} &= \{1,05 [(100+297)/203]^{1/3} - 0,64\} \cdot 10^{-3} = 0,67306 \cdot 10^{-3} \\ C_S &= \Delta C_{FS2} - \Delta C_{FS1} = 0,31375 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Gubitak snage zbog hrapavosti:

$$\Delta P_R = 0,5 \cdot \eta_D^{-1} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_S \cdot 10^{-3}, \text{ kW}$$

$$\Delta P_R = 0,5 \cdot 0,7^{-1} \cdot 1,025 \cdot 12\,650 \cdot (13,48 \cdot 0,5144)^3 \cdot 0,31375 \cdot 10^{-3} = 969 \text{ kW}$$

Ušteda snage nakon obrade vijka pri hrapavosti  $APR$  170  $\mu\text{m}$ :

$$APR = 30 + (94/12) \cdot 20 - 2 \cdot 10 = 167 \mu\text{m}$$

$$\Delta P/P \cdot 100\% = 1,107 \cdot (APR)^{1/3} - 1,479 = 4,6 \%$$

Dnevni potrošak goriva:

$$DFC_{\text{novi brod}} = SFC \cdot SCR \cdot 24 = 178 \cdot 8460 \cdot 24 \cdot 10^{-6} = 36,1 \text{ t/d} \quad (14)$$

$$DFC_{\text{služba}} = SFC \cdot P_s \cdot 24 = 180 \cdot 6900 \cdot 24 \cdot 10^{-6} = 30 \text{ t/d}$$

Godišnji trošak:

$$AFC = DFC \cdot ST \cdot C_{HO} \quad (15)$$

$$AFC_{\text{novi brod}} = 36,1 \cdot 213 \cdot 250 = 1\,922\,325 \text{ USD}$$

$$AFC_{\text{služba}} = 30 \cdot 213 \cdot 250 = 1\,597\,500 \text{ USD}$$

Iznos od 11,4 posto (969 kW/8460 kW) je smanjenje troška goriva za prvu godinu službe, nakon tretmana oplakane površine. Računajući da sustav premaza sigurno djeluje bar 4 godine, uz godišnje smanjenje od približno 7 posto (neminovni popravci oštećenja AC/AV premaza), iduće tri godine postoci ušteda na gorivu bili bi: 10,6 posto, 9,8 posto i 9,1 posto. U literaturi se navodi taj postotak uz trajanje od 6 godina, [6].

Trošak obrade površine  $AHR=400 \mu\text{m}$  (300+100) na 175  $\mu\text{m}$ :

Pjeskarenje Sa 2 1/2 + Primer 20  $\mu\text{m}$  + 3 x 80  $\mu\text{m}$  AC + 2 x 125  $\mu\text{m}$  AV =

$$= 18,60 \text{ USD/m}^2 \cdot 12\,650 \text{ m}^2 = 235\,290 \text{ USD}$$

$$\text{Trošak obrade vijka } 3700 + 3 \text{ (god.)} \cdot 1500 = 8\,200 \text{ USD}$$

$$\text{Ukupno} = 243\,490 \text{ USD}$$

Ušteda na gorivu:

$$\text{I. godina: } 11,4\% \cdot 1\,597\,500 \text{ USD} = 182\,115 \text{ USD}$$

$$\text{II. godina: } 10,6\% = 169\,335 \text{ USD}$$

$$\text{III. godina: } 9,8\% = 156\,555 \text{ USD}$$

$$\text{IV. godina: } 9,1\% = 145\,372 \text{ USD}$$

$$\text{Ukupna ušteda nakon četiri godine: } 653\,377 \text{ USD}$$

$$\text{Ušteda na gorivu (vijak) } 4,6 \text{ posto: } 73\,485 \text{ USD}$$

$$\text{Ukupno} = 726\,862 \text{ USD}$$

$$\text{Razlika: } +483\,372 \text{ USD}$$

Očito je da će se trošak obrade oplakane površine broda i vijka već početkom druge godine potpuno isplatiti.

Uštede za MB *Pelješac*, na kojemu se moglo primijeniti slično rješenje obradbe površine za vrijeme IV. dokiranja, tj. nakon 9,4 godine službe (113 mjeseci starosti), jednako tako pokazuju opravdanost zahvata.

Trošak obrade oplakane površine i trošak obrade

vijka; ukupno  $\approx 240\,000 \text{ USD}$

Ukupna ušteda nakon četiri godine

(oplakana površina + vijak)  $\approx 685\,000 \text{ USD}$

Razlika: +445 000 USD

## 7. Zaključak

Ukupno poslovanje broda sofisticiran je posao. Odgovornost i snošenje operativnih troškova u većini slučajeva podijeljeni su na više subjekata. Brod treba definirati kao pokretinu koja ostvaruje dobit. Za razliku od projektanta stacionarne građevine, projektant

broda mora predvidjeti parametre službe kao varijable funkcije dinamike održavanja i vremena eksploatacije, [18].

Analizirani su podaci iz strojarskih dnevnika za dva broda, bulkera *Pelješac* i tankera *Ist*, tijekom trogodišnjega praćenja, koji su poslužili kao temelj za izračunavanje stanja oplakane površine. Iz raspoloživih podataka nameće se zaključak da su brodovlasnici kreirali strategiju održavanja s jedinim ciljem minimiziranja troškova, uz graničnu dobit. Održavanje oplakane površine brodova, kroz svih dvadeset godina eksploatacije, svodilo se isključivo na sanaciju starih i primjenu novih antivegetativnih premaza. Međutim, nužno pjeskarenje oplake zbog progresivne deterioracije i uklanjanja nagomilanih naslaga premaza, nikad nije provedeno.

Brodogradnja se danas suočava istodobno s novopostavljenim ekološkim normama, zahtjevima za tehničkom dotjeranošću, te visokom ekonomičnosti poslovanja. Međutim ne raspoložemo s odgovarajućim normama o mjeri utjecaja na ekologiju unutar čitavog eksploatacijskog razdoblja broda, koje bi projektantu služile kao referentni kriterij. Budući da nema magične tehnologije, realno je težište na osjetljivoj ravnoteži između ciljanih učinaka. Buduća istraživanja svakako će biti usmjerena na uspostavljanje instrumentarija koji će bilježiti iscrpne ekološke, i sve druge podatke referentnih plovila.

Kako se dalji rad nije mogao osloniti samo na jedan model porasta otpora (ITTC 1978 formule za izračunavanje dodatka na hrapavost), za izradbu pouzdanijega tehnokonomskog modela poslovanja broda, s naglaskom na održavanje, bilo je potrebno kreirati niz matematičkih modela:

- ekonomski model analize prihoda i rashoda poslovanja,
- ekološki model izlučivanja biocida iz antivegetativnih premaza,
- model obradbe supstrata, tj. oplakane površine vezane za radove u doku.

Tako je metodom višeatributne sinteze optimiranja projekta, uz primjenu projektanoga postupka i opisanih matematičkih modela, kreiran model za optimizaciju ciljeva poslovanja:

- ekonomskoga kriterija, tj. zaradi (dobiti) brodovlasnika,
- ekološkoga kriterija: dinamici izlučivanja biocida iz AV premaza (stupanj zagađenja),
- društvene koristi: maksimalnog broja putovanja (dostupnost).

Računalni program održavanja broda s poslovno-tehnološko-tehničkog stajališta, razvijen putem višeatributne optimizacijske sinteze, omogućava brodaru da prema svojim preferencijama, s dostatnom točnošću, metodom procjene važnosti pojedinih projektnih ciljeva odabere ispravnu poslovnu strategiju, [8].

## Literatura

- [1] TOWNSIN, R.L.: "Workshop-Calculating the Cost of Marine Surface Roughness on Ship Performance"; 32nd WEGEMT School on Marine Coatings; University of Plymouth, 10-14 July 2000. pp.119.-127.
- [2] *Tankerska Plovidba*, Zadar: Strojarski dnevnik za tanker *Ist*
- [3] *Atlantska Plovidba*, Dubrovnik: Strojarski dnevnik i Plan radova u doku za *bulk carrier Pelješac*
- [4] SUBRAMANIAN, C. S. et al: "Noncontact Measurements of Marine Biofouling"; Marine Technology, Vol.41-No.2. April 2004., pp.67.-73.

- [5] KREŠIĆ, M. and HASKELL, B.: "Effects of Propeller Design-Point Definition on the Performance of a Propeller/Diesel Engine System with Regard to In-Service Roughness and Weather Conditions, SNAME Transactions, Vol.91, 1983.; pp.195.-224.
- [6] BODE, H.G.: "Ausenhautrauhigkeit und selbstpolierende Antifouling-Farben-Eine Kosten- Nutzen-Analyse" Hansa, 1982-Nr.3; pp159-164.
- [7] Brodogradilište *Hyundai*, Izvod iz tehničkog opisa za *Capsize* tanker, 2008.
- [8] BELAMARIĆ, B.: "Utjecaj hrapavljenja oplakane površine na eksploatacijska svojstva broda", disertacija, FSB-Zagreb, ožujak 2008.
- [9] Brodogradilište *Split*; podaci za *Suezmax* tanker *Alan*, Split 2007.
- [10] SIGMA Coating Manuals; Sigma Coatings USA; Harvey, LA 700058; 2003; pp.18.-26.; 52.- 56.; 101.-108.
- [11] *BI- Uljanik*: Izvješće s pokusne plovidbe, Zagreb, 1986.
- [12] SVENSEN, T.E. and MEDHURST, J.S.: "A Simplified Method for the Assessment of Propeller Roughness Penalties", Marine Technology, Vol.21. No.1, Jan.1984; pp.41.-48.
- [13] HEMPEL: Cjenik 2008.
- [14] ŠILOVIĆ, S., FANCEV, M.: "Obalni putnički brodovi tipa *Osjek*: pokusne plovidbe i analiza rezultata" BI, Zagreb, 1958. str. 1.-19. i prilozi.
- [15] NAESS, E.: "Reduction of Drag Resistance caused by Surface Roughness and Marine Fouling"; Norwegian Maritime Research; No. 4/80; pp. 12.-16.
- [16] JONES, D.: "Afloat Maintenance, the Control of Marine Fouling and the Care of Coatings Underwater"; WEGEMT School, Univ. of Plymouth, UK; Plymouth, 2000 pp. 207.- 220.
- [17] MARTIN, R.J.: "Antifouling Paints Arch Antifouling Agents"; Emerging Markets Meeting; London, 15/10/2006.
- [18] Podaci prema izvješćima brokerskih kuća: A. Zachariassen, Fairplay Daily News, Shipping Weekly, SSG Newsletter (Scandinavian Shipping Gazette), Compass.