

Održavanje sustava zaštite oplakane površine brodova od obraštanja

Ilić, Ella

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:260950>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ella Ilić

Zagreb, 2024. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Neven Hadžić

Studentica:

Ella Ilić

Zagreb, 2024. godina

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Najviše zahvaljujem svojim roditeljima koji su bili tu uz mene i bodrili me kroz cijelo školovanje. Zahvaljujem i bratu koji je bio podrška, a nerijetko i strogi glas razuma. Također bih zahvalila cijeloj svojoj obitelji.

Veliku zahvalu dugujem mentoru izv. prof. dr. sc. Nevenu Hadžiću, na uloženom trudu i vremenu. Njegovi savjeti i planiranje uvelike su olakšali izradu i pisanje ovog diplomskog rada.

Moram zahvaliti brodogradilištu Iskra u Šibeniku što su mi pružili mogućnost odrađivanja prakse, te izrade diplomskog rada na jednom od projekata remonta. Najzaslužniji za to su Matko Klinac i Hrvoje Marinčić. Iako je mentor prakse službeno bio mag. ing. nav. arch. Marinčić koji svoje znanje nesebično dijeli, obojica su ulogu mentorstva ozbiljno shvatili, te predano odradili.

Puno hvala mag. ing. nav. arch. Jeri Gaćini vlasniku broda, koji mi je ustupio brod kako bih odradila mjerenja u naravi, te također ustupio sve zahtijevane podatke potrebne za proračun, Bez njega ovaj rad ne bi bio moguć.

Posebna zahvala ide mojem zaručniku, koji je bio emocionalna podrška, te svim prijateljima i kolegama koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Ella Ilić



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ella Ilić**

JMBAG: 0035210846

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Održavanje sustava zaštite oplakane površine brodova od obraštanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Maintenance of the ship wetted surface antifouling protection**

Opis zadatka:

Oplakana površina broda predstavlja područje neposrednog kontakta brodskog trupa i mora koje je podložno kolonizaciji morskih organizama različitih vrsta. U tom je smislu obraštaj oplakane površine izrazito nepoželjna prirodna pojava koja povećanjem otpora trenja negativno utječe na operativna svojstva broda. Stoga je u ovom diplomskom radu potrebno: a) prikazati povijesni razvoj postupaka održavanja oplakane površine brodova, b) prikazati biološke aspekte kolonizacije oplakane površine, c) obrazložiti učinke obraštanja u područjima poslovanja brodarskih poduzeća i utjecaja na okoliš, d) prikazati suvremene sustave zaštite od obraštanja, e) razviti matematički model planiranja održavanja oplakane površine broda te ga primijeniti u slučaju stvarnog broda. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

7. ožujka 2024.

9. svibnja 2024.

13. – 17. svibnja 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Izv.prof. dr. sc. Neven Hadžić

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. POVIJEST ZAŠTITE OD OBRAŠTAJA	2
2.1. Rani zapisi o oplakanoj površini broda.....	4
2.2. Bakrene obloge	5
2.3. Problem zaštite željeznih trupova	5
2.4. Antivegetativni (AV) premazi	6
2.5. Tributil kositar (TBT)	7
3. BIOLOŠKI I EKONOMSKI ASPEKTI OPLAKANE POVRŠINE.....	8
3.1. Organizmi kolonizatori	8
3.2. Biološki učinci obraštaja.....	12
3.2.1. Širenje invazivnih vrsta.....	12
3.2.2. Emisije štetnih plinova.....	15
3.3. Biološki učinci premaza.....	16
3.3.1. Zdravstveni rizici	16
3.3.2. Zakonodavni okvir	17
3.4. Ekonomski učinci obraštaja	18
3.4.1. Utjecaj na otpor broda.....	18
3.4.2. Povećani troškovi goriva.....	20
3.4.3. Povećani troškovi održavanja	20
3.4.4. Gubitak prihoda	22
4. SUVREMENI SUSTAVI ZAŠTITE OD OBRAŠTANJA.....	23
4.1. Protuobraštajni premazi	23
4.1.1. Pigmenti	23
4.1.2. Punila	24
4.1.3. Veziva	24
4.1.4. Otapala	25
4.1.5. Aditivi	25
4.2. Podjela premaza	25
4.2.1. Premazi s netopivom matricom.....	26
4.2.2. Premazi s topivom matricom (CDP).....	26
4.2.3. Samopolirajući premazi SCP	27
4.2.4. Hibridni SPC/CDP premazi protiv obraštaja	27
4.2.5. Neobraštajuća (Foul-release) tehnologija	27
4.3. Priprema površine	30
4.4. Aktivna zaštita ultrazvukom	33

4.5. Aktivna zaštita podvodnim robotom.....	34
5. MATEMATIČKI MODEL.....	36
5.1. Validacija matematičkog modela.....	39
5.1.1. Rezultati mjerenja u naravi – AHR_f	42
5.1.2. Utjecaj hrapavosti na prirast snage	46
5.1.3. Izbor najisplativijeg perioda dokovanja.....	53
6. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	57

POPIS SLIKA

Slika 1.	Kronologija razvoja tehnologije zaštite od obraštanja, [1].....	3
Slika 2.	Engleski ratni brod, Malta, početak 19. st[2]	4
Slika 3.	Premazivanje oplakane površine broda katranom, Toulon, Francuska cca. 1750, [2]	5
Slika 4.	Primjer oblaganja trupa bakrenim pločama [3]	6
Slika 5.	Kronološki prikaz razvoja obraštaja oplakane površine[1]	8
Slika 6.	Faze razvoja obraštaja[4].....	9
Slika 7.	Prikaz ljuštore balanida nakon pranja broda (lijevo) i naseljenost površine oštećenog silikonskog premaza (desno)	10
Slika 8.	Prikaz lopara.....	10
Slika 9.	Prikaz crva cjevaša	11
Slika 10.	Dominacija mahovnjaka po oplakanoj površini	11
Slika 11.	Prikaz obraštaja unutar usisne košare.....	11
Slika 12.	Dagnje u području vodne linije	12
Slika 13.	Prikaz utjecaja bakra na okoliš, [10]	16
Slika 14.	Dinamički karakter razvoja hrapavosti prvog i drugog reda [2]	19
Slika 15.	Utvrđivanje visine hrapavosti, Rt_{50} [2].....	19
Slika 16.	Mehaničko oštećenje premaza.....	21
Slika 17.	Otpadanje zaštitnog premaza po boku broda i početak obraštanja izloženog dijela oplate dijela (lijevo) i oštećenje premaza na pramcu u području centralne linije broda (desno).....	22
Slika 18.	Usporedba radnog principa premaza s topivom i netopivom matricom [17].....	27
Slika 19.	Obrasli FR premaz (lijevo), plovidba brzinom 10 čv u trajanju od 1 minute (sredina), plovidba brzinom 20 čv u trajanju 1 min (desno)[16].....	28
Slika 20.	Priprema površine za lokalno obnavljanje silikonskog premaza	30
Slika 21.	Priprema površine za lokalno obnavljanje premaza s topivom matricom.....	31
Slika 22.	Lokalno nanesen temeljni premaz	31
Slika 23.	Lokalno nanesen međupremaz	32
Slika 24.	Usred procesa premazivanja završnog premaza.....	32
Slika 25.	Sastavni dijelovi ultrazvučnog sustava zaštite.....	34
Slika 26.	Podvodni robot za snimanje i čišćenje oplakane površine [19]	35
Slika 27.	Učinkovitost pemaza	38
Slika 28.	Aurum Sky na syncroliftu	40
Slika 29.	Fotografije obraštaja.....	42
Slika 30.	Pomično mjerilo s dijelovima.....	43
Slika 31.	Primjer načina mjerenja u naravi.....	43
Slika 32.	Srednja visina hrapavosti oplakane površine	47
Slika 33.	Motor Volvo Penta D13MH(R1-500)	49
Slika 34.	Graf ovisnosti potrošnje goriva o okretajima	49
Slika 35.	Graf ovisnosti snage o okretajima	50
Slika 36.	Usporedba povećanja snage	52
Slika 37.	Graf najisplativijeg perioda dokovanja broda	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Invazivne vrste i utjecaj na pogođena područja [7].....	13
Tablica 2. Tablica predviđanja promjena u ukupnom otporu (ΔR_t) i potrebne snage na osovini (ΔSP) srednje velikog broda s određenim zaštitnim premazom i stanjima obraštaja trupa (uz odgovarajuću prosječnu hrapavost premaza (R_{t50})) za brzinu od 15 čv [11].....	20
Tablica 3. Prikaz glavnih značajki pojedinih vrsta AF premaza [15]	29
Tablica 4. Opći podaci broda	40
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti hrapavosti	44
Tablica 6. Konstanti ulazni podaci	44
Tablica 7. Ulazni podaci stope rasta [2]	45
Tablica 8. Ulazni podaci vjerojatnosti nastanjivanja oplakane površine [2].....	45
Tablica 9. Izlazni podaci programa	46
Tablica 10. Vrijednosti pojedinih hrapavosti i konačna vrijednost.....	47
Tablica 11. Povećanje dodatka potrebne snage po mjesecima.....	48
Tablica 12. Tablica razvijene snage motora pri određenim okretajima	50
Tablica 13. Povećanje snage u naravi	51
Tablica 14. Konstantne vrijednosti u proračunu najisplativijeg perioda dokovanja	53
Tablica 15. Vrijednosti ukupnih troškova održavanja.....	54

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A		Ocjena tehnologije premaza
AHR	[μm]	Srednja hrapavost oplakane površine
AHR_D	[μm]	Srednja hrapavost uslijed dokovanja
AHR_F	[μm]	Srednja hrapavost obraštaja
AHR_{NB}	[μm]	Srednja hrapavost novogradnje
AHR_S	[μm]	Srednja hrapavost službe
B	[mjeseć]	Životni vijek premaza
B_{WL}	[m]	Širina broda na vodnoj liniji
C_B		Blok koeficijent
C_{AF}	[€/l]	Cijena sustava protiv obraštanja
C_{APP}	[€/m ²]	Cijena tehnologije premaza
C_{eff}		Učinkovitost premaza
C_F	[€/kg]	Cijena goriva
C_{ID}	[€]	Popratni troškovi dokovanja
C_M	[€]	Troškovi održavanja oplakane površine
\bar{C}_M		Normalizirani troškovi održavanja
\bar{C}_{Fuel}		Normalizirani troškovi goriva
\bar{C}_{Fuel}^N		Akumulirani troškovi goriva uslijed povećanja hrapavosti oplakane površine
C_{TOT}	[€]	Operativni troškovi broda
C_S		Koeficijent hrapavosti službe
h_i	[μm]	Povećanje visine i-te vrste obraštaja
I		Intenzitet održavanja
k		Koeficijent forme
k_S	[μm]	Srednja hrapavost oplakane površine
L_{WL}	[m]	Duljina vodne linije broda
M		Ukupan broj elemenata oplakane površine broda
MP		Ukupan broj mjernih točaka po površini
n_L		Zbroj slojeva premaza
N		Zbroj vremenskih koraka

p_i		Vjerojatnost prihvatanja i-te vrste obraštaja
r_i	[$\mu\text{m}/\text{mjesec}$]	Stopa rasta i-te vrste obraštaja
RM	[mjesec]	Relativni period održavanja
R_n		Reynoldsov broj
Rt_{50}	[μm]	Najveća razlika u visini hrapavosti na uzorku 50 mm
S	[m^2]	Oplakana površina broskog trupa
SFC	[g/kWh]	Specifična potrošnja goriva
SP		Ukupan broj vrsta obraštaja
t	[dan]	Vrijeme
t_P	[dan]	Vrijeme provedeno u luci
T	[m]	Gaz broda
TM	[mjesec]	Referentni period održavanja
v	[m/s]	Brzina broda u službi
Δ	[kg]	Istisnina broda
ΔC_F		Dodatak na hrapavost
ΔP	[kW]	Dodatak zahtijevane snage broda
Δt	[mjesec]	Vremenski korak
η		koeficijent iskoristivosti propulzije
η_{AF}	[m^2/l]	Specifična potrošnja boje
η_{AFC}		Učinkovitost premaza protiv obraštanja
η_{Sail}		Vrijeme provedeno u službi
ν	[m^2/s]	Kinematička viskoznost
ρ	[kg/m^3]	Gustoća mora
ISO		International Organization for Standardization
$ITTC$		International Towing Tank Convention
TBT		Tributyltin

SAŽETAK

Operativna svojstva broda određuju isplativost broda, a brodovlasniku je u cilju postići najveću zaradu uz najmanje troškove. Svaka površina uronjena u vodu obrast će. Tako će se na oplakanu površinu broda nastaniti morski organizmi. Uz operativne troškove i ekonomsku problematiku ove teme, sagledan je i aspekt biološkog utjecaja obraštaja. Vodeće svjetske organizacije za zaštitu okoliša svakim danom postrožuju regulative vezane uz razvoj stakleničkih plinova brodova. Posljedično, cilj je izbjeći moguće poreze na količine emisija. U ovom diplomskom radu istražena je literatura vezana uz obraštanje oplakane površine broda, te faktore koji utječu na hidrodinamiku broda. Također obrađene su metode zaštite oplakane površine broda od obraštanja te njihov utjecaj na okoliš. U eksperimentalnom dijelu validiran je matematički model računanja najisplativijeg perioda dokovanja. Model je validiran na temelju dokovanja MB Aurum Sky, u brodogradilištu Iskra, u Šibeniku. Metoda dobivanja povećanja potrebne snage, uspoređena je sa stvarnim podacima povećanja snage. Na kraju su uspoređeni troškovi u službi za dobivanje najisplativijeg perioda dokovanja.

Ključne riječi: brod, obraštanje, sustav protiv obraštanja, antivegetativni premazi, otpor broda, snaga pogonskog stroja, dokovanje, najisplativiji period dokovanja

SUMMARY

The operational characteristics of a ship determine its profitability. The shipowner's goal is to achieve the highest profit while minimizing expenses. Fouling occurs on every submerged surface, with marine organisms settling on the ship's hull. In addition to the operational costs and economic considerations, this thesis also addresses the biological impact of fouling. Leading environmental protection organizations worldwide are increasingly tightening regulations concerning greenhouse gas emissions from ships. Consequently, the aim is to avoid possible taxes on emissions amounts. This thesis analyzes the literature addressing fouling on the submerged surfaces of ships and the factors influencing ship hydrodynamics. Also methods for protecting the painted surfaces of ship hulls from fouling are discussed including their environmental impact. The experimental part validates a mathematical model for calculating the most profitable docking period based on the docking of the MV Aurum Sky at the Iskra shipyard in Šibenik. The method for obtaining the required power increase is compared with the actual power increase data. Finally, the evaluated maintenance costs were compared with operational ones to obtain the most profitable docking period.

Key words: ship, fouling, antifouling system, antifouling coatings, ship resistance, power, docking, most profitable docking period

1. UVOD

Efikasnost i isplativost pomorskih operacija od presudne su važnosti za brodarske kompanije koje se suočavaju s povećanim zahtjevima tržišta i rastućim pritiscima konkurenata. Jedan od ključnih faktora koji utječu na operativna svojstva broda jest hrapavost oplakane površine broda. Hrapavost oplakane površine povećava otpor trenja, a s tim u vezi povećava se potrošnja goriva potrebna za razvijanje iste efektivne snage. Hrapavost brodskog trupa ovisi prvenstveno o tehnologiji brodogradnje. Sama površinska obrada konstrukcijskih elemenata imat će za posljedicu određenu razinu hrapavosti. Premaz novogradnje još je jedan čimbenik koji pridonosi hrapavosti. Uz navedeno, svakim dokovanjem i s vremenom provedenim u službi, hrapavost se povećava. Obraštaj oplakane površine u ovom radu promatramo kao hrapavost, uzrokovanu prvenstveno rastom morskih organizama poput algi, školjki i drugih vrsta. Kumulativno, udio hrapavosti od obraštaja utječe na povećanje otpora trenja do 90 %. Osim što smanjuje hidrodinamička svojstva plovila, povećava operativne troškove broda.

Danas je u komercijalnoj upotrebi najrasprostranjenija zaštita premazima, iako su prisutne i novorazvijene metode zaštite od obraštanja, koje su također obrađene u ovom radu. U eksperimentalnom dijelu rada validiran je ranije razvijen matematički model računanja najisplativijeg perioda dokovanja.

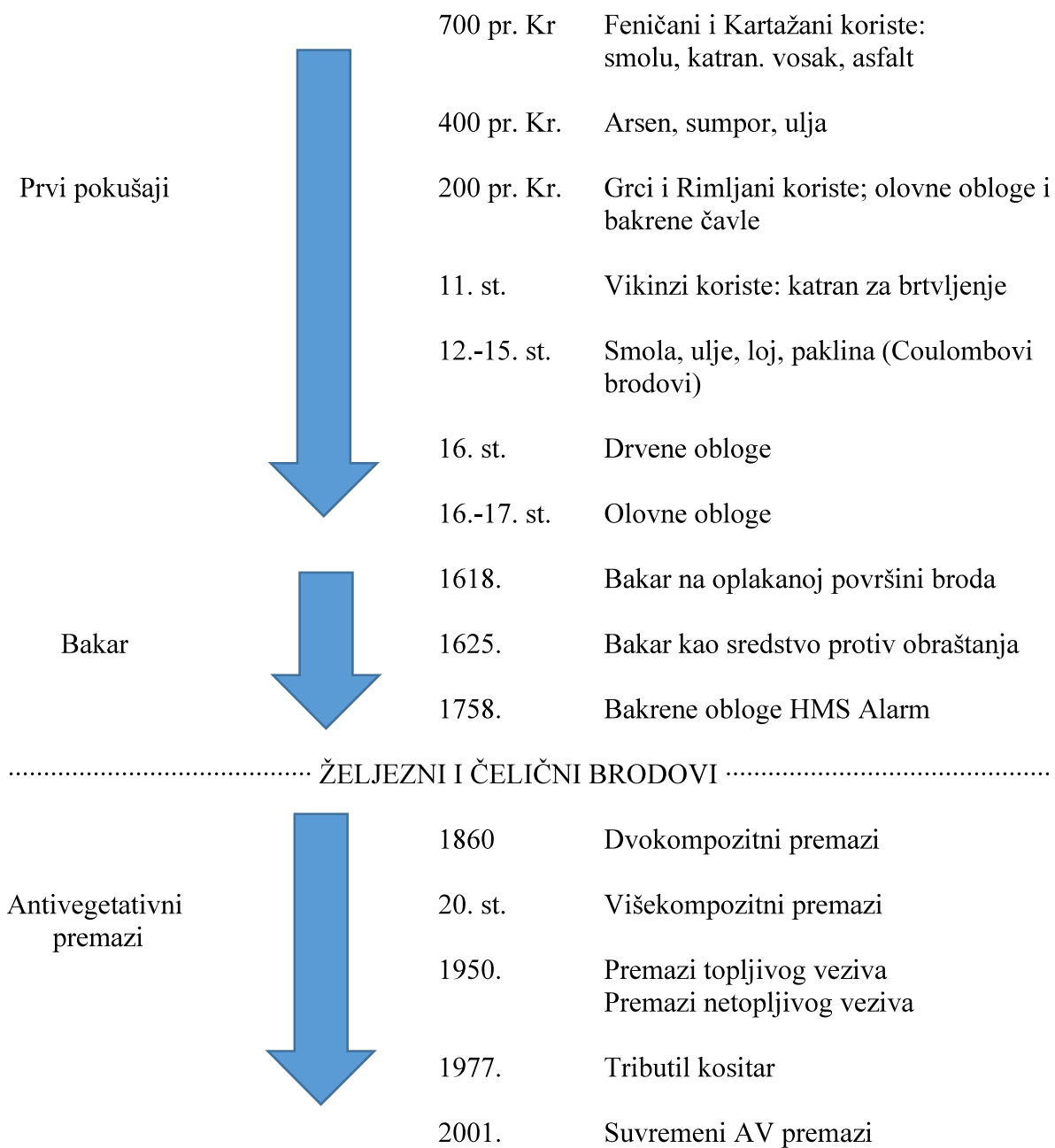
2. POVIJEST ZAŠTITE OD OBRAŠTAJA

Premda je sustavno znanstveno proučavanje obraštaja brodova tek nedavno značajnije napredovalo, sam problem postoji tisućama godina o čemu svjedoče i pisani tragovi o različitim tretmanima dna brodova još iz 5. stoljeća pr. Kr. Međutim, borba moreplovaca za sprječavanje obraštanja počelo je zasigurno još i ranije, s brodovima o kojima nam je danas malo poznato.

Povijesni razvoj sustava protiv obraštaja možemo podijeliti na tri dijela:

- Korištenje premaza poput voska, katrana, asfalta, ulja, te oblaganje trupa olovnim oblogama
- Upotreba bakrenih obloga koja je zbog galvanske korozije napuštena s uvođenjem željeza i čelika kao osnovnog materijala broskog trupa.
- Razvoj protuobraštajnih premaza koji omogućuju zaštitu željezne i čelične oplata od obraštaja, a nanose se preko antikorozivnih premaza.

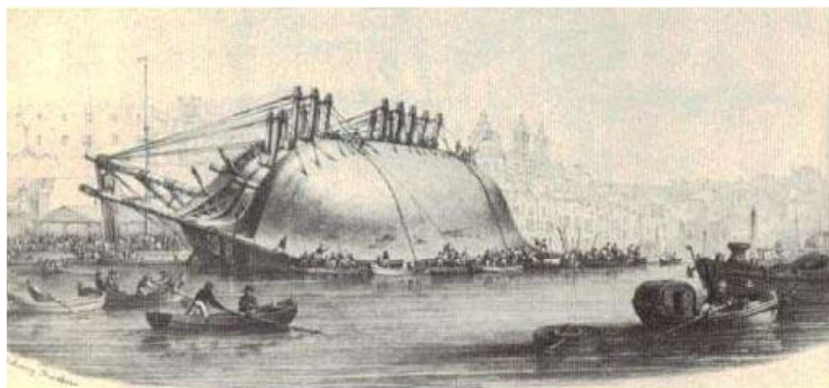
Kronološki slijed razvoja tehnologije zaštite od obraštaja prikazan je slikom 1.



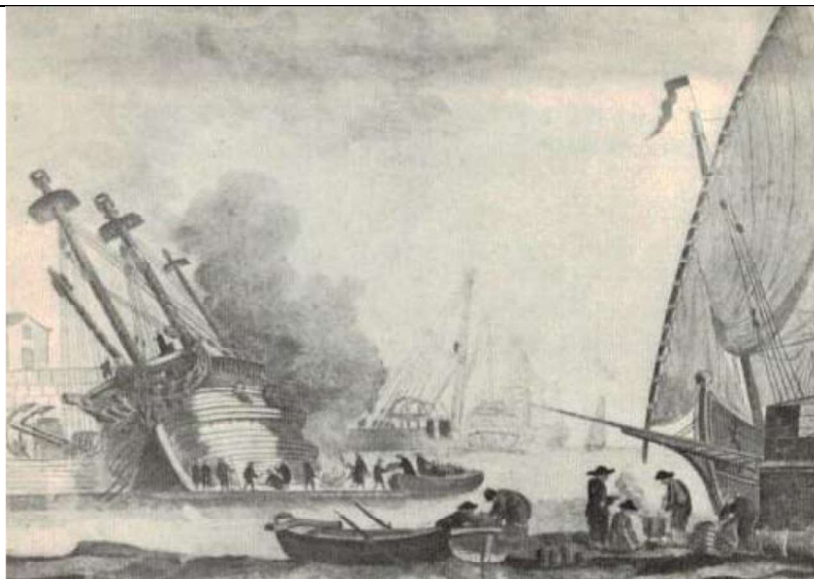
Slika 1. Kronologija razvoja tehnologije zaštite od obraštanja, [1]

2.1. Rani zapisi o oplakanoj površini broda

Razvoj pomorstva i brodogradnje započeo je prije više od 10000 godina, no u najranijim zapisima ne postoje podaci o održavanju drvene oplata broda niti o mjerama sprečavanja njegove pojave. Prvi zapisi iz 4. stoljeća pr. Kr. spominju usporavanje brodova koji su inače postizali punu brzinu. Također, poznato je da su Feničani koristili katran, vosak, prirodni asfalt (paklinu) i bakrenu oplatu na dnu svojih brodova. Ipak, točan razlog tome nije poznat, no moguće je pretpostaviti da se time nastojalo spriječiti razvoj obraštaja uz postizanje vodonepropusnosti, očvršćivanje konstrukcije bakrenim oblogama ili zaštitu drva od brodotočaca. Također, iz istog se doba spominje korištenje mješavine arsena i sumpora s uljem. Grci su u 3. stoljeću pr. Kr., koristili olovne obloge na trupovima. Ako su pak koristili katran ili vosak, on bi se nanosio vruć preko drvene oplata, a olovne ploče bi se za trup pričvrstile bakrenim ili pozlaćenim čavlima, često preko tkanine ili papira. Tijekom 15. st. oplakana površina broda premazivana je mješavinom masti i smole, no usprkos tome obraštaj se mehanički uklanjao svakih nekoliko mjeseci. Slični zahvati na oplakanoj površini broda zadržali su se stoljećima, pa su tako danas dostupni i slikovni prikazi čišćenja oplakane površine brodova i njeno premazivanje katranom poput onih iz 18. i 19. stoljeća prikazanih Slikom 2 i Slikom 3. Ipak, važno je istaknuti intenzivniju upotrebu bakrenih ploča nakon otkrivanja protuobraštajnih svojstava bakra.



Slika 2. Engleski ratni brod, Malta, početak 19. st [2]



Slika 3. Premazivanje oplakane površine broda katranom, Toulon, Francuska cca. 1750 [2]

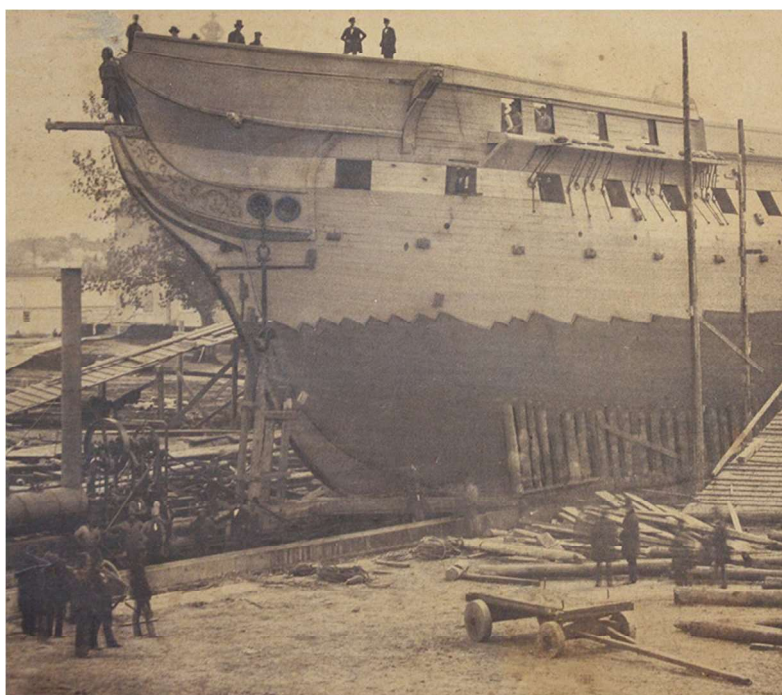
2.2. Bakrene obloge

Dostupni povijesni zapisi svjedoče i o upotrebi bakrenih obloga kao zaštite od obraštaja još tijekom antičkog doba. Međutim, intenzivnija upotreba ovog sustava zaštite uslijedila je tek u 18. st., odnosno nakon njegove primjene na engleskom brodu HMS Alarm s ciljem zaštite drvene oplata od brodotočaca. Povratkom iz Indije, na brodu je oplata bila relativno čista, s iznimkom kormila na koje su zbog potreba pokusa stavljeni željezni čavli. Izvještaj je sadržavao tri zaključka: bakar je zaštita od brodotočaca i obraštaja koja nije oštetila oplatu. To revolucionarno otkriće potaklo je daljnje pokuse koji su do 1780. godine bakar doveli do uporabe u cijeloj Britanskoj mornarici. Iako je bakar bio djelotvoran protiv obraštaja, kao uzročnik korozije na željeznim brodovima umalo je natjerao Britance da prekinu njegovu uporabu. Umjesto toga, počeli su istraživati legure bakra i reakcije s drugim metalima. Rezultati pokusa reakcije s cinkom, doveli su do zaključka da količina cinka veličine graška štiti od korozije čak 50 kvadratnih inča željeza. Problem se pojavio, kada je prisutnost cinka potakla razvoj obraštaja. Prelaskom na potpuno željezne trupove, zaštita od obraštaja s pomoću bakrenih ploča ipak je eliminirana iz upotrebe.

2.3. Problem zaštite željeznih trupova

Razne su predrasude stvorene o korištenju željeza u konstrukciji oplata brodova, no oskudica drva i pojava parnih strojeva već je diktirala promjenu. Drveni brodovi bili su ograničeni čvrstoćom i veličinom, te je popravak drvenog broda stajao više nego novogradnja.

Također, vibracije uzrokovane parnim strojem drveni brod jednostavno nije mogao podnijeti. Zanemariivši predrasude, postojala su dva izuzetno velika problema željezne oplata. Korozija i obraštanje. U narednom periodu brodovi su toliko korodirali i obraštali, da je potreba za promjenom bila nužna. Tada se pojavljuje uporaba cinkovih pločica koje su u kontaktu sa željeznom oplatom korodirale i efikasno štatile oplatu. Mana takvog načina zaštite je prebrza potrošnja cinka. Daljnji razvoj uključivao je oblaganje trupa metalima i nemetalima, od kojih mnogi nisu prošli ni pokusnu fazu. Sredinom 19. stoljeća željezni trup se fizički odvaja od bakrenih ploča tikovinom. Time je riješen problem nastajanja galvanskog članka i obraštaja oplata, jer se bakar postupno otapao djelujući toksično na organizme obraštaja. Slika 4 pokazuje oblaganje trupa bakrenim pločama. Ova je metoda bila preskupa za opću uporabu zbog visoke cijene tikovine, stoga je korištena isključivo u ratnoj brodogradnji i za rijetke trgovačke brodove. Također, otpadanje bakrenih ploča i njihovo brzo trošenje bila je još jedna mana.



Slika 4. Primjer oblaganja trupa bakrenim pločama [3]

2.4. Antivegetativni (AV) premazi

Prvi zapisi o premazima kao zaštiti od obraštaja datiraju kao patenti iz 1625. godine. Prvi premazi sastojali su se od željeznog praha, cementa, a postoji mogućnost da su sadržavali i bakrene legure. Kemičar W.J. Hay zamislio je premazivanje trupa u dva sloja. Prvi sloj bi spriječio koroziju, dok bi drugi spriječio obraštanje. To je potaknulo istraživanje i razvoj

kvalitetnih brodskih premaza. Do 1871. godine zabilježeno je preko 200 patenata. Začetnikom tehnologije brodskih premaza smatra se John Rahtjen koji je 1860. patentirao dvije kompozicije premaza. Umjesto katrana korišten je šelak (prirodna plastomerna smola). Ti brzosušeći kompoziti efikasno su štitili brod od obraštanja. Početkom 20. st. čak 85 % Britanske flote štitio je Rahtjenov premaz. Giuseppe Moravia u isto vrijeme patentira sličan izum, kojeg kasnije otkupljuju Amerikanci [2]. Do 1960-ih vijek aktivnog djelovanja premaza produljuje se s 2-3 mjeseca na 9-12 mjeseci. Razvojem boja u 20. stoljeću nastaju premazi na bazi organokositrenih spojeva (TBT). Dočekani su kao rješenje problema. Pružali su potpunu zaštitu od obraštaja i do 5 godina, a nanositi ih je bilo jednostavno. Međutim, već 80-ih godina 20. stoljeća otkriveno je da uz ubijanje organizama koji obraštaju brod, truju i široki spektar ostalih morskih organizama.

2.5. Tributil kositar (TBT)

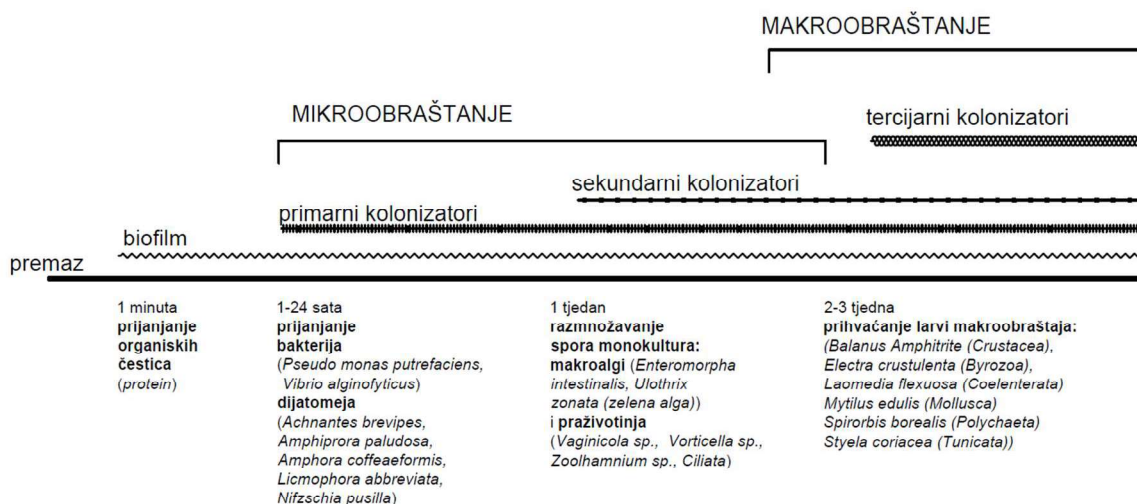
Tributil kositar grupa je spojeva slabo topivih u vodi. Nakon što otpadnu s brodske oplata, talože se u sedimentu te imaju dug životni vijek. Morski organizmi ih lako apsorbiraju, te im to omogućava ulazak u hranidbeni lanac. Preko bakterija i zooplanktona, dospijevaju čak u organizme riba i sisavaca. Nakon što je dokazano da TBT utječe na rast i razvoj, te umanjuje reprodukciju i mogućnost preživljavanja mnogih morskih organizama, uslijedile su brojne restrikcije. Zabrane su krenule 1980. kao inicijativa pojedinih država koje su ograničile uporabu TBT premaza za brodove kraće od 25 metara. Europska unija 2003. zabranu širi na sve brodove koji plovo pod zastavama zemalja članica. Konačno, na globalnoj razini Međunarodna pomorska organizacija (IMO) donosi međunarodni sporazum o potpunoj zabrani TBT premaza. To je potaklo razmišljanje o štetnom utjecaju premaza na okoliš i ljude. Zbog toga, napravljeni su veliki pomaci u razvoju ekološki prihvatljivih vodorazrjedivih premaza. Pred korisnicima je razdoblje prilagodbe kako bi se regulative za smanjenjem emisije hlapljivih organskih spojeva u okoliš smanjile.

3. BIOLOŠKI I EKONOMSKI ASPEKTI OPLAKANE POVRŠINE

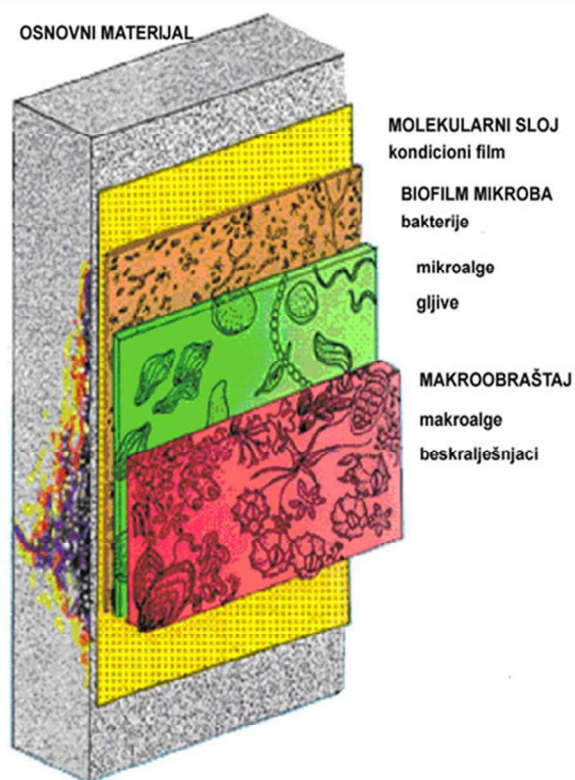
3.1. Organizmi kolonizatori

Zajednica koja nastanjuje oplakanu površinu trupa broda sastoji se od jednostaničnih i višestaničnih organizama. Tisuće bakterija i dijatomeja koje koloniziraju površinu oplata tvore biofilm, tanki sloj raznih tekstura i hrapavosti. Ta sluz ne ovisi o brzini broda, a razvija se neovisno o vrsti antivegetativnog premaza. Kao i sljedeće navedene, ove kolonizatore svrstavamo u mikroobraštaj.

Drugi najbrži kolonizatori su mikroalge. Nesporno razmnožavanje sporama omogućava da se unutar nekoliko sati nastane na površinu i koloniziraju je unutar nekoliko dana, kronološki slijed razvoja mikro i makro obraštaja prikazan je na Slici 5. i 6. Zelene i smeđe makroalge su najraširenije. Zelene alge dominiraju unutar područja gaza, gdje dopire više svjetlosti, dok smeđe alge nastanjuju trup u područjima s manje osvjetljenja. Obje vrste lako se prilagođavaju životnim uvjetima oplakane površine, no za opstanak trebaju sunčevu svjetlost, stoga se ne nalaze na dnu trgovačkih brodova punije forme. Kod mehaničkog uklanjanja algi u moru, korijen ostaje ukopan u površinu, a odstranjene spore ponovno se love za površinu. Zato se njihovo mehaničko uklanjanje ne preporučuje.



Slika 5. Kronološki prikaz razvoja obraštaja oplakane površine [1]



Slika 6. Faze razvoja obraštaja [4]

Fauna morskog obraštaja uglavnom se sastoji od člankonožaca, kolutićavaca, lovkaša i mekušaca, Slike 7 - 12. Za razliku od algi, oni se za površinu prihvaćaju pri brzinama broda do 4 čvora, te im je za nastanjivanje potrebno nekoliko tjedana. Balanidi i školjke ne nastanjuju površinu kao odrasle jedinice, nego u obliku larvi koje plutaju morem kao dio planktona. U razvojnem stadiju ciprida oni nalaze trajno stanište. Onoga trena kada dotakne površinu, počinje metamorfoza. Ticalima ispušta ljepljivu tekućinu koja polimerizira u kontaktu s površinom i postaje njegovo trajno stanište. Ljepljivi supstrat otporan je na visoke temperature, kiseline, baze i otapala, tako da se uklanja visokotlačnim vodenim mlazom. Za život im nije potrebna sunčeva svjetlost, zato ih je moguće pronaći na dubljim dijelovima oplata.



Slika 7. Prikaz ljušture balanida nakon pranja broda (lijevo) i naseljenost površine oštećenog silikonskog premaza (desno)

Još jedna vrsta člankonožaca koja nastanjuje oplakanu površinu je lopar ili gušćji vrat, najčešće se nastanjuje na dnu trupa. Kolutićavci koji nastanjuju razne morske površine uključujući brodsku oplatu, propelere, kormilo, usisne kutije i osovine, nose naziv crvi cjevaši. Najzastupljeniji u Jadranskom moru je vrsta *Pomatoceros triqueter*. Uz balanide najzastupljenija vrsta obraštaja broskog trupa je Bryozoa, mahovnjaci iz reda lovkaša. Na kraju, područje vodne linije nastanjeno je dagnjama, najzastupljenijim predstavnicima mekušaca, dok balanidi, kolutićavci i lovkaši podjednako nastanjuju sve dijelove oplakane površine[5],[6].



Slika 8. Prikaz lopara



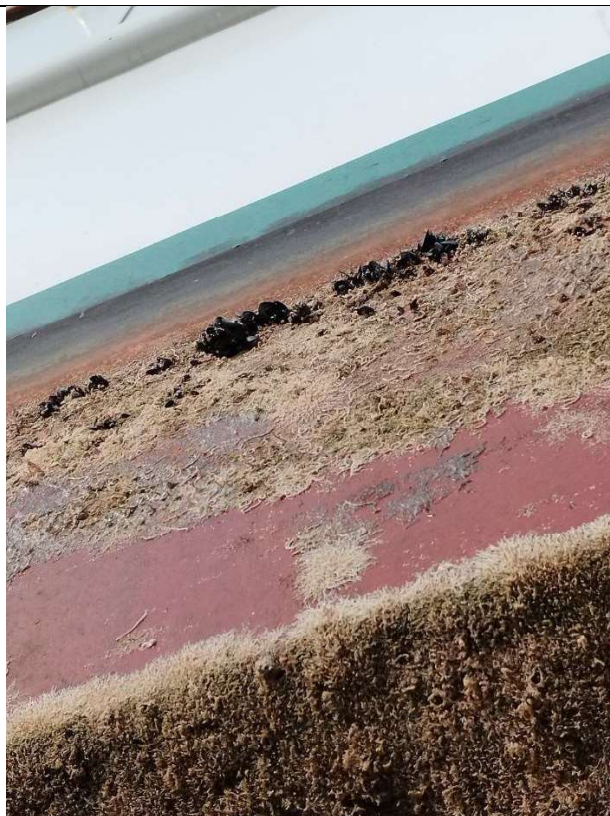
Slika 9. Prikaz crva cjevaša



Slika 10. Dominacija mahovnjaka po oplakanoj površini



Slika 11. Prikaz obraštaja unutar usisnih košara



Slika 12. Dagnje u području vodne linije





3.2. Biološki učinci obraštaja

3.2.1. Širenje invazivnih vrsta

Pomorski promet je vitalan za globalnu ekonomiju, njime se odvija 90 % svjetske trgovine. No, ova vitalna aktivnost nosi i značajne rizike za morski okoliš. Jedan od najozbiljnijih problema je obraštaj brodova, koji se odnosi na nakupljanje različitih organizama na podvodnom dijelu trupa broda. Obraštaj brodova najčešće uključuje invazivne vrste, koje se lako šire u nove ekosustave kada brod pristane u novoj luci. Ove vrste nemaju prirodnih neprijatelja u novom okruženju, što im daje značajnu prednost u natjecanju s autohtonim vrstama. Invazivne vrste mogu istisnuti autohtone vrste iz njihovih staništa, poremetiti ravnotežu u hranidbenom lancu i ugroziti vitalne ekosustave poput koraljnih grebena i morskih trava. Mekušci s brodske oplata mogu istisnuti autohtone školjke zbog hrane i nastaniti njihovo područje, a agresivne alge mogu ugušiti razvoj domaćih koralja i morskih biljaka. Često su prijenosnici virusa i bolesti. To dovodi do degradacije staništa i gubitka biološke raznolikosti. Također mogu negativno utjecati na imovinu, resurse i ljudsko zdravlje. Prema IMO-u postoje strogo zaštićena područja, te se ulaz u ista strogo regulira. Prije ulaska nastali obraštaj mora se mehanički ukloniti. Mjere idu do potpune zabrane uplova brodova iz određenih matičnih luka.

Ova regulativa postoji i na nacionalnoj razini, a najbolji primjer je Australia. Da bismo zaštitili naše oceane i njihove vitalne ekosustave, moramo se ozbiljno suočiti s problemom obraštaja brodova. Istraživanje i razvoj novih, ekološki prihvatljivih tehnologija su ključni. Tablica 1 sadrži invazivne vrste, s kojeg područja se proširila na koje, i koji utjecaj to ima na autohtone vrste.

Tablica 1. Invazivne vrste i utjecaj na pogođena područja [7]

IME	PRIRODNO STANIŠTE	NOVO STANIŠTE	UTJECAJ
<p><i>Charybdis japonica</i></p> 	Sjeverozapadno područje Tihog oceana (Kina, Japan, Korejski poluotok) do istočnoazijskih mora (Tajland, Malezija)	Novi Zeland	Može biti prijenosnik virusa „White Spot Syndrome“ koji utječe na marikulturu rakova. Kao predator utječe na bioraznolikost, te remeti hranidbeni lanac.
<p><i>Didemnum vexillum</i></p> 	Sjeverozapadni Tihog ocean	Sjeverozapadni i sjeveroistočni Atlantski ocean, sjeverozapadni Tihog ocean, Novi Zeland	Ova je vrsta invazivna zbog svog spolnog i nespolnog načina razmnožavanja. Vrlo brzo se prihvaća i kolonizira površinu. Dominacijom nad staništem guši i istiskuje autohtone vrste.
<p><i>Asterias amurensis</i></p> 	Sjeverozapadni Tihog ocean	Sjeveroistočni Tihog ocean, južna Australija	Ovo je vrsta proždrljivih mesojeda koja brzo uspostavlja dominaciju na novo nastanjenom području. Poznata je kao štetočina, zbog uništavanja autohtonih vrsta kao što je ugrožena riba <i>Brachionichthys hirsutus</i> . Zvijezda se uglavnom hrani ribljim jajima. Uz to, predator je za dagnje, jakobove kapice i školjke, čime utječe na akvakulturu mekušaca.
<p><i>Perna viridis</i></p> 	Perzijski zaljev do Filipina, istočnoazijskih mora do istoka Kine	Karibi, južni Atlantski ocean i jug Tihog oceana	Ova školjka opstaje pri velikom rasponu slanosti i temperature. Naseljava površine uronjenih konstrukcija, brodova i infrastrukture. Time utječe na bioraznolikost postojećih zajednica i mijenja poredak hranidbenog lanca.

<p><i>Mytilopsis sallei</i></p> 	<p>Sjeverozapadni Atlantski ocean. Karibi i Južni Atlantski ocean</p>	<p>Indija, istočnoazijska mora (Malezija, Singapur), jug i sjeverozapad Tihog oceana (Japan, Kina)</p>	<p>Vrlo brzo dostiže stadij odrasle jedinke. Podnosi velike razlike u temperaturi i salinitetu. Ova vrsta lako kolonizira novo područje i smanjuje bioraznolikost uspostavljajući dominaciju. Uronjene konstrukcije obrasle ovom školjkom korodiraju i ubrzo se javljaju tehnički problemi i gubitak učinkovitosti strukture.</p>
<p><i>Sabella spallanzanii</i></p> 	<p>sjeveroistočni Atlantski ocean, Sredozemno more</p>	<p>Jugozapad Atlantskog oceana, južna Australija, Novi Zeland, sjeverozapad Tihog oceana</p>	<p>Ova je vrsta vrlo plodna i sposobna je formirati guste populacije poput tepiha, na morskom dnu. Vrsta može opstati na velikim rasponima temperatura i saliniteta. Uspješno obrasta uronjene konstrukcije poput hidrotehničkih građevina, brodova. Vrsta se natječe s domaćim organizmima koji se hrane filtriranim staništem i hranu. Moguće je da guste formacije mijenjaju protok vode, stabilnost sedimenta i bakterijske zajednice zbog svoje učinkovitosti filtriranja čestica i morskih mikroorganizama.</p>
<p><i>Amphibalanus improvisus</i></p> 	<p>Smatra se da potječe sa sjeveroistoka i sjeverozapada Atlantika.</p>	<p>Jugozapad Atlantskog oceana, Karipsko more, Baltičko more. Crno more, Kaspijsko jezero, sjeverozapad Tihog oceana, mora istočne Azije.</p>	<p>Ovo je brzorastuća vrsta s visokim reproduktivnim potencijalom. Razmnožava se spolno i nespolno, te nastanjuje uronjene građevine koje posljedično korodiraju i propadaju. Utječe na bioraznolikost područja koje kolonizira i mijenja poredak u hranidbenom lancu.</p>
<p><i>Undaria pinnatifida</i></p> 	<p>Sjeverozapad Tihog oceana</p>	<p>Sredozemno more, sjeveroistok i jugozapad Atlantskog oceana, sjeveroistok Tihog oceana, jugoistok Australije i Novi Zeland.</p>	<p>Vrlo brzo kolonizira nova područja. Zbog toga se nastanjuje na uronjene građevine, brodove i strukture za uzgoj marikulture. Ova vrsta sposobna je smanjiti bioraznolikost područja koje kolonizira, uništiti autohtone vrste te poremetiti poredak u hranidbenom lancu.</p>
<p><i>Carcinus maenas</i></p> 	<p>Sjeveroistok Atlantskog oceana, Baltičko more</p>	<p>Zapad Afrike od Mauretanijske do južne Afrike, Sredozemno more, sjeverozapadni Atlantski ocean.</p>	<p>Odrasle jedinke mogu preživjeti velike razlike u temperaturi i salinitetu vode. Preživjet će do 10 dana izložen zraku s velikim udjelom vlage, i u mogućnosti je gladovati do 3 mjeseca. Međutim, pohlepan je predator. Hrani se mekušcima i</p>

		jugozapadni Atlantski ocean od Paname do Argentine, istočna Afrika od Crvenog mora do juga Afrike, uključujući Madagaskar, Japan, sjeveroistok Tihog oceana, Mianmar, Šri Lanka,. Jug Tihog oceana, jugoistok Australije	rakovima, važnim u komercijalnom području. Unosi neravnotežu u hranidbeni lanac, te istiskuje autohtone vrste s koloniziranog područja.
--	--	--	---

3.2.2. Emisije štetnih plinova

Obraštanje broda neposredno dovodi do potrebe za većom snagom motora za savladavanje sile otpora, kako bi se postigla brzina broda u službi. Povećanjem snage, povećava se potrošnja goriva i količina ispušnih plinova kao izravnog nusprodukta izgaranja.

Prema podacima Svjetske trgovinske organizacije (WTO) udio emisija ugljičnog dioksida pomorskog prometa u globalnim emisijama približno iznosi 10 % u 2022. [8] U Izvješčaju za 2020. Međunarodne pomorske organizacije (IMO) [9] stoji kako je u 2012. emitirano oko 962 milijuna tona CO₂ dok je u 2018. taj iznos porastao za gotovo 10 %, odnosno na oko 1056 milijuna tona. IMO je zadužen za regulaciju emisija stakleničkih plinova (GHG–greenhouse gasses) iz pomorske industrije, te je usvojio niz propisa koji ograničavaju emisije stakleničkih plinova iz brodova, uključujući:

- Međunarodni kodeks za emisije iz brodova (MARPOL): MARPOL Annex VI propisuje tehničke i operativne mjere za kontrolu emisija SO_x, NO_x, CO₂, VOC i PM iz brodova.
- Energetska učinkovitost brodova: IMO je uveo propise o energetske učinkovitosti brodova (EEDI) u smislu kvantifikacije energetske učinkovitosti brodova.
- Mehanizam globalnog ograničenja emisija CO₂ iz brodova (IMO GHG): IMO je usvojio mehanizam globalnog ograničenja emisija CO₂ iz brodova koji je stupio na snagu 2023. godine.

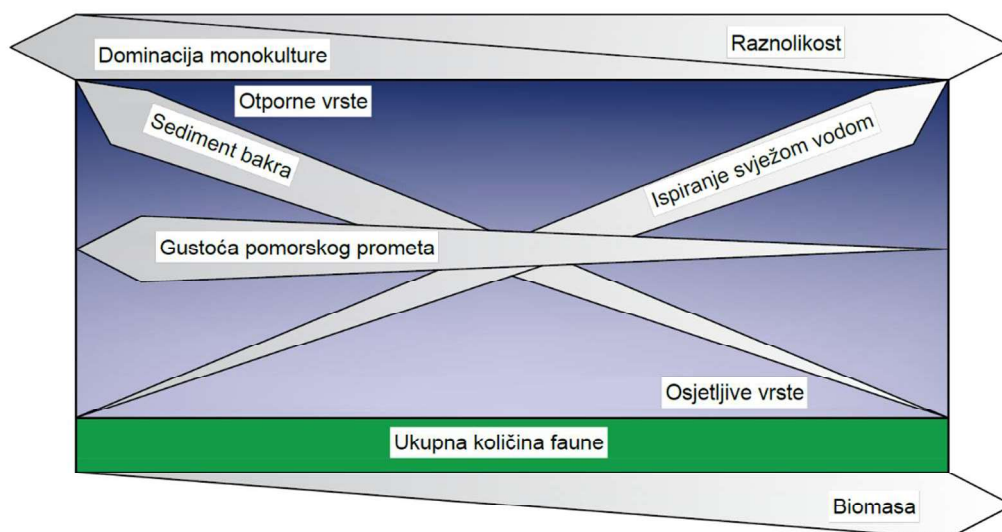
Predviđeno je smanjenje intenziteta emisija ugljika svih brodova za 40 % do 2030. u odnosu na 2008. Brodovi će biti ocijenjeni s dostignutim indeksom energetske učinkovitosti i godišnjim

operativnim pokazateljem emisije ugljika. Cilj je najefikasnije moguće potrošiti minimalnu količinu goriva i time proizvesti minimalnu količinu CO₂ i ostalih plinova. To je djelomično moguće postići optimizacijom perioda dokovanja i kvalitetnom zaštitom protiv obraštaja.

3.3. Biološki učinci premaza

3.3.1. Zdravstveni rizici

Svaka vrsta obraštaja predstavlja određeni zdravstveni rizik koji se može manifestirati izravnim putem kao prenosioc virusa s jednog područja na drugo ili neizravnim putem u smislu poremećaja ravnoteže lokalnog ekosustava. Brod koji prođe kroz zaraženo područje opasnost je za sve organizme koji se nalaze u okolici plovidbenog puta. Mnogi virusi nemaju izravan utjecaj na ljudsko zdravlje, no mogu nanijeti značajnu ekonomsku štetu marikulturnoj djelatnosti. Morski okoliš predstavlja idealne uvjete za razvoj obraštaja, jer gibanjem vode omogućava konstantnu dobavu nutrijenata i odnos metaboličkih otpadaka. Uz negativne utjecaje obraštaja na kvalitetu vode, poput oduzimanja kisika i hranjivih tvari ostalim organizmima, važno je naglasiti i utjecaj protuobraštajnih premaza. Voda u lukama najbolji je primjer loše kvalitete vode. Najveći utjecaj bakra i premaza prisutan je upravo u lukama i marinama. Promet je intenzivan, a morske struje slabe. Nakon što se bakar otpusti s oplata broda, ima dug životni vijek u sedimentu. Tako utječe na bentičke organizme među kojima se smanjuje biološka raznolikost. Opstaju organizmi otporniji na bakrove spojeve, odnosno primijećena je manja biomasa i raznolikost uz posljedično povećanje dominacije otpornih vrsta, Slika 13.



Slika 13. Prikaz utjecaja bakra na okoliš [10]

3.3.2. Zakonodavni okvir

Zakonodavstvo je politički alat kojim se primjenjuju pravila, određuju troškovi, te kojim se izravno utječe na industriju, potrošače, okoliš i društvo. Usmjerenost je na pojedine države, regije ili pak na razinu globalnog društva. Nije nepoznanica da protuobraštajni proizvodi plijene globalnu pažnju zbog svog utjecaja na okoliš. Tim više što trgovački brodovi nerijetko plove u međunarodnim vodama. Legislativa je stoga razvijena u svrhu kontrole tržišta i očuvanja okoliša. Uredba o biocidnim proizvodima (BPD – The Biocidal Products Regulation) pojavljuje se kao odgovor na uređenje korištenja biocida na području Europske Unije, van poljoprivrednih zanimanja, odnosno u području primjene na brodovima, te marikulturnoj opremi i ostalim strukturama uronjenim u vodu. Uredbom o biocidnim proizvodima zahtijeva se da nadležno tijelo odobri proizvod prije njegova stavljanja na tržište. Nadležna tijela mogu dati odobrenje samo ako se u ocjeni koju provedu pokaže da je uporaba proizvoda sigurna za zdravlje ljudi i životinja te za okoliš. Potrebno je dokazati i djelotvornost proizvoda za predviđenu namjenu. Ovo je primjer regulacije koji se odnosi na grupaciju država koje su ujedno i najreguliranije područje. Harmonizirana pravila primjenjuju se unutar svake države. Ciljevi uredbe su trojaki: osiguravanje razine zaštite čovjeka i okoliša, harmonizirana pravila za stavljanje biocida na tržište i posljedično tome ukidanje zapreka plovidbe unutar Europske Unije. Osim što se BPD-om regulira stavljanje biocida na tržište, ono regulira i uporabu aktivnih supstanci u takvim proizvodima. Dok se odobrenje i uvrštavanje tvari u Annex I/IA koordinira unutar Europske komisije, odobrenje proizvoda provodi se na razini država članica.

Na globalnoj razini razvojem konvencija i smjernica bavi se Međunarodna pomorska organizacija (IMO), kao specijalizirana organizacija Ujedinjenih Naroda. IMO je 2001. godine usvojila Međunarodnu konvenciju o nadzoru štetnih protuobraštajnih sustava brodova (International Convention for the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships, AFS Convention). Ova konvencija uključuje zabranu ili regulativu određenih sustava protiv obraštaja, kao i pojedinih premaza, boja ili pripreme površine. AFS konvencija utječe ne samo na zemlje koje su podržale ratifikaciju, već i na ulazak brodova u njihove vode, bez obzira na zastavu pod kojom brod plovi. Vrlo važna stavka ove konvencije je utjecaj kako na međunarodnu plovidbu tako i na lokalnu pomorsku trgovinu, iako svaka država odlučuje koliko će strogo provoditi AFS-konvenciju.

Prije stavljanja pojedinog proizvoda na tržište zahtjevi koje isti mora zadovoljiti na nacionalnoj razini definiraju se ili kao obavijest ili kao registracija. Obavijest je postupak obavještanja vlasti o stavljanju proizvoda na tržište. Ta obavijest sadrži sigurnosni list, a

ponekad i dodatne informacije o kemijskoj formulaciji proizvoda. Registracija pak uz nabrojeno sadrži podatke o utjecaju na okoliš i ljudsko zdravlje. Prije odobrenja registracije proizvod ne smije na tržište. Vlasti odlučuju je li rizik uporabe proizvoda prihvatljiv.

Nadalje, Povjerenstvo za zaštitu pomorskog okoliša pri IMO (The Marine Environment Protection Committee, MEPC) je 2021. godine usvojio amandman o zabrani uporabe cibutrin biocida. Od 2023. brodovi ne mogu aplicirati premaze koji sadrže spomenuti biocid, a na prvom sljedećem dokovanju dužni su ukloniti premaz i zamijeniti ga onim prihvaćenim od strane AFS-a. Međunarodna konvencija o nadzoru štetnih protuobraštajnih sustava brodova (International Convention on the Control of Harmful Anti-fouling Systems on Ships) usmjerava se ka osnutku tehničke grupe. Njena svrha jest okupiti tim stručnjaka koji bi analizirali prijedloge sustava protiv obraštanja kao i ograničavanje upotrebe istih [9].

3.4. Ekonomski učinci obraštaja

3.4.1. Utjecaj na otpor broda

Osnovna težnja pri osnivanju broda jest odrediti formu trupa broda koja pri zadanoj projektnoj brzini plovidbe zahtjeva minimalnu utrošenu energiju. Brod ima bolja hidrodinamička svojstva što je otpor manji. Prema metodi ITTC-57, ukupni otpor broda se može podijeliti na otpor trenja i ukupni otpor, odnosno

$$R_T = R_F + R_R \quad (1)$$

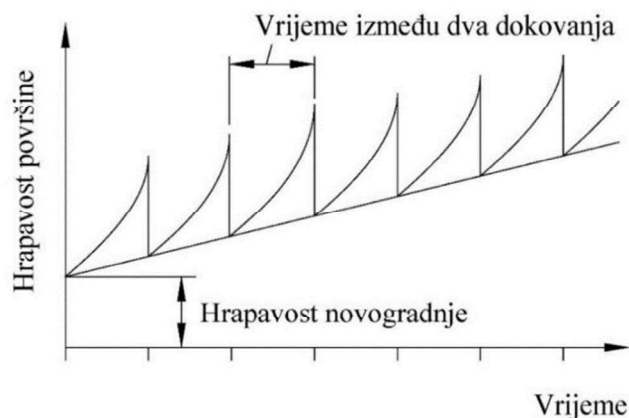
pri čemu je koeficijent otpora trenja definiran kao

$$C_F = \frac{0,075}{(\log R_n - 2)^2} \quad (2)$$

Kod velikih vrijednosti Reynoldsovog broja hrapavost površine trupa ima jako velik utjecaj na otpor. Tehnička hrapavost je naziv koji objedinjuje sve hrapavosti površine broskog trupa. Hrapavost novogradnje ovisi o tehnologiji izrade limova. Limovi se prije sklapanja u sekcije pjeskare, režu na potrebne dimenzije, premazuju radioničkim premazima. Svaki od tih postupaka ostavlja neku razinu hrapavosti na površini lima. Tehnologija zavarivanja brodskih sekcija također značajno utječe na hrapavost novogradnje.

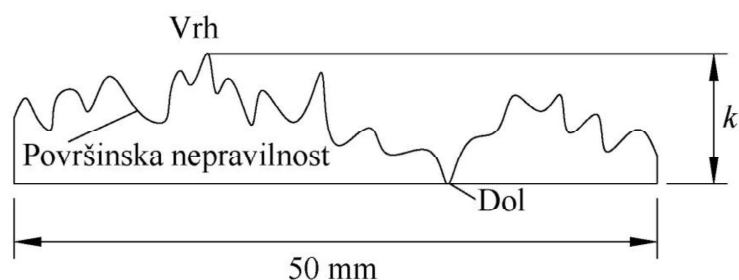
Uz hrapavost novogradnje tu je i hrapavost uslijed eksploatacije, te hrapavost dokovanja i obraštaja. Hrapavost novogradnje spada u primarnu hrapavost i iznosi između 70 i 100 μm . Hrapavost dokovanja i eksploatacijska hrapavost čine hrapavost drugog reda. Prirast eksploatacijske hrapavosti iznosi približno 2.8 μm /mjesec, a prirast hrapavosti dokovanja oko

14 μm /dokovanju [2]. Hrapavost obraštaja eksponencijalno raste između svakog dokovanja kao što je prikazano Slikom 14. Sve tekućine posjeduju svojstvo viskoznosti kojem je uzrok trenje. Povećanjem hrapavosti površine posljedično se povećava trenje, odnosno otpor gibanju broda. Time je potrebna veća snaga kako bi se postigla projektna brzina broda.



Slika 14. Dinamički karakter razvoja hrapavosti prvog i drugog reda [2]

Suvremeni pristup problemu obraštanja brodova koristi koncept ekvivalentne hrapavosti koja, uz jednakost otpora broda, u suštini predstavlja zamjenu stvarne neravnomjerne hrapavosti ekvivalentnom teoretskom hrapavosti ravnomjerno raspoređenog pijeska. Ovaj koncept, uz teoriju sličnosti, omogućio je znanstvenicima da izvedu eksperimente i odrede vezu između visine hrapavosti pijeska i otpora broda, te definiraju " Rt_{50} " kao mjeru hrapavosti: najveću razliku između vrha i dna neravnina na površini duljine 50 mm, Slika 15.



Slika 15. Utvrđivanje visine hrapavosti, Rt_{50} [2]

Kroz povijest, ulagali su se veliki naponi u zaštitu površine od obraštanja. Do danas nije pronađen idealan sustav zaštite. Cilj ovog rada je smanjiti troškove održavanja površine broskog trupa.

3.4.2. Povećani troškovi goriva

Uz utjecaj na okoliš prekomjerna potrošnja goriva ima i negativne ekonomske učinke. U dobra eksploatacijska svojstva broda ulazi i optimalna potrošnja goriva. U periodu između dokovanja obraštaj trupa eksponencijalno raste. Kako je ranije rečeno povećava se otpor i potrebna je veća snaga motora. Samim time motori sagorijevaju više goriva.

Tablica 2. Tablica predviđanja promjena u ukupnom otporu (ΔR_t) i potrebne snage na osovini (ΔSP) srednje velikog broda s određenim zaštitnim premazom i stanjima obraštaja trupa (uz odgovarajuću prosječnu hrapavost premaza (R_{t50})) za brzinu od 15 čv [11]

Stanje trupa	R_{t50} (μm)	ΔR_t (%)	ΔSP (%)
Hidrodinamički glatka površina	0	0	0
Apliciran AV premaz	150	2	2
Loše stanje premaza (lagana sluz)	300	11	11
Izražena sluz	600	20	21
Neizražen vapnenački obraštaj ili morska trava	1000	34	35
Blago izražen vapnenački obraštaj	3000	52	54
Izražen vapnenački obraštaj	10 000	80	86

Procjena povećanja potrošnje goriva između dokovanja iznosi do 40 %, čime ukupni troškovi plovidbe mogu narasti i do 77 % [11]. Procjenjuje se da antivegetativni premazi brodograđevnoj industriji omogućuju uštedu na gorivu od 60 milijardi dolara te redukciju emisije CO₂ za 384 milijuna tona, a SO₂ za 3,6 milijuna tona godišnje [12] Podatak iz 1981. govori da je potrošnja goriva mornarice SAD-a iznosila oko 16 milijuna barela, uz procjenu da bi se adekvatnim sustavom za zaštitu od obraštanja moglo uštedjeti oko 3.3 milijuna barela, odnosno oko 180 milijuna USD. Potrošnja goriva za komercijalnu plovidbu na globalnoj razini u 2000. iznosila je 300 milijuna tona. Bez adekvatne zaštite protiv obraštanja procjenjuje se da bi potrošnja bila 120 milijuna tona veća [1].

3.4.3. Povećani troškovi održavanja

Ulaganje u kvalitetan premaz broda umanjuje pojavu neočekivanih velikih troškova. Kod brodova u službi česta je pojava lokalnih mehaničkih oštećenja premaza kao na Slici 16. Kvalitetan premaz imat će manju propagaciju oštećenja, pa će se kod dokovanja lokalno

tretirati. Popravak premaza radi se tako da se površina lokalno brusi do određene kvalitete, zatim se premazuje temeljnim premazom, međupremazom i završnim slojem. Cijeli podvodni dio trupa premazuje se po završetku životnog vijeka premaza. Što je životni vijek dulji, to se manje vremena provodi u doku. Također, sustav zaštite od obraštanja uvelike ovisi o tehnologiji nanošenja. Svaki proizvođač boje odobrava tehnologiju obrade površine i nanošenja premaza. Vrlo bitno je slijediti upute zbog garancije na premaz. Oštećeni dio oplata daje odličnu podlogu za razvoj obraštaja, razvoj obraštaja negativno utječe na hidrodinamička svojstva broda te uzrokuje veću potrebnu pogonsku snagu. Povećanjem okretaja pogonskih motora povećava se i vjerojatnost kvara na vitalnim motornim dijelovima. Problem takvih kvarova je veliki trošak pristupnih radova. Odnosno otklanjanje kvara podrazumijeva da svi usisni cjevovodi moraju imati ventile koji brtve, kako ne bi došlo do propuštanja mora. Ako to nije slučaj, brod treba u dok. Uz to što je proces skup, vrlo je vremenski zahtjevan. Nedostatak vlastitog pogona zahtjeva najam remorkera za tegalj. Ovakav primjer nagomilavanja nepotrebnih troškova može se riješiti zaštitom protiv obraštanja što će pomoći u optimalnom korištenju pogonskog sustava.



Slika 16. Mehaničko oštećenje premaza



Slika 17. Otpadanje zaštitnog premaza po boku broda i početak obraštavanja izloženog dijela oplata dijela (lijevo) i oštećenje premaza na pramcu u području centralne linije broda (desno)

3.4.4. Gubitak prihoda

Svakom brodovlasniku, bez obzira na vrstu plovila ili veličinu flote, bitno je osigurati optimalna eksploatacijska svojstva brodova. U komercijalnom svijetu, brod koji ne donosi dobit nije samo teret za vlasnika, već i potencijalna prijetnja cjelokupnom poslovanju. Kako bi se osigurala održiva profitabilnost postojećeg broda, neophodno je planirati dokovanje i održavanje. Svaka industrija ima svoje sezonske promjene u obujmu posla. Pomorska industrija nije iznimka. Razumijevanje ovih ciklusa je ključno za uspješno poslovanje. Za dokovanje se odabire period u godini kada je obujam posla najmanji, jer su tada gubici od izostanka broda iz službe minimalni. Planiranje pravovremenog održavanja broda omogućuje bolje upravljanje zaradom i troškovima. Također je ključno u smanjenju rizika od kvarova i izbivanja broda iz službe. Redovito održavanje oplakane površine broda, spada u najunosnije ulaganje. Presudno je za produženje životnog vijeka plovila i njegovih komponenti. Kvalitetan premaz ne samo da produžuje interval između dokovanja, već i omogućava manju potrošnju goriva, manje trošenje pogonskog sustava, troškove popravaka i mogućnost potrebe za dokovanjem unutar sezone povećanog obujma posla. Održavanje brodova složen je proces koji zahtijeva pažljivo planiranje i praćenje. Kroz redovito održavanje, kvalitetne premaze i pravovremeno reagiranje na potencijalne probleme, brodovlasnici mogu osigurati isplativost svojih operacija i dugoročnu održivost svoje flote.

4. SUVREMENI SUSTAVI ZAŠTITE OD OBRAŠTANJA

4.1. Protuobraštajni premazi

Od prvih patenata u 17. st. pa sve do danas, razvijaju se sve efikasnije formule premaza protiv obraštanja. Odluka o izboru optimalnog AV premaza često je podložna oprečnim zahtjevima. Nekoliko je temeljnih parametara za izbor optimalnog AV premaza:

- Odnos vremena u službi i u luci
- Period dokovanja
- Područje plovidbe
- Brzina broda
- Kompatibilnost AV s antikoroziivnim premazom (AC)
- Adhezija AV na AC premaz
- Stupanj hrapavosti površine
- Tehnologija nanošenja premaza
- Namjena broda

Pogrešna procjena tih parametara dovodi do nefunkcioniranja sustava protiv obraštanja. Glavni uzroci uslijed kojih nanesei premaz nije postigao zahtijevani učinak uz pogrešan izbor premaza su sastav premaza i pogrešna tehnologija nanošenja premaza. Premaz se sastoji od:

1. Pigmenata
2. Veziva
3. Punila
4. Aditiva
5. Otapala

4.1.1. Pigmenti

Pigmenti su prirodno ili umjetno dobiveni proizvodi koji premazima daju obojenje. Da bi se pigmenti koristili u premazima moraju biti netopivi u vezivu, odnosno moraju se moći disperzirati u njemu. Neka bitna svojstva koja se traže od pigmenata su svjetlostalnost, te otpornost na kiseline, lužine, vodu, razna otapala itd. Pigmenti se dijele na organske i anorganske, a svaka od tih podgrupa se dijeli na prirodne i umjetne pigmente.

Prirodni anorganski pigmenti prisutni su u prirodi i ekstrahiraju se iz rudnika ili kamenoloma. Međutim, njihova upotreba gotovo je zanemarena u suvremenom dobu zbog brojnih nedostataka, poput ograničene sposobnosti bojenja i visoke gustoće. Njihova jedina prednost leži u otpornosti na svjetlo, vodu, organska otapala i alkohol. S druge strane, umjetni neorganski pigmenti nastaju kemijskim procesima taloženja iz otopina mineralnih soli. Osim taloženjem, mogu se proizvoditi i putem kemijskih postupaka oksidacije i kalcinacije. Oni premaz čine neprozirnim, te poboljšavaju mehanička i zaštitna svojstva kao i njihovu kemijsku i tehničku postojanost.

4.1.2. Punila

Koncentracija boje razbija se dodavanjem punila, fino zrnatih bijelih ili prozirnih prašaka, netopivih u vezivima. Punila se definiraju kao anorganski prašci koji smanjuju poroznost i konačnu cijenu premaza. Bitno je da punila budu prozirna ili bijela kako premaz ne bi promijenio boju pigmenta. Dobivaju se ili iz prirodnih minerala ili sintetskim taloženjem iz vodenih otopina. Dije se na karbonate, sulfate, okside i silikate. Punila obavezno trebaju biti međusobno kompatibilni s pigmentima kao i s vezivima premaznih sredstava i podlogama na koje se nanose. Punila nikako ne smiju kemijski reagirati s vezivom, ni nakon dužeg vremena, kako ne bi utjecali na reološka svojstva premaza (tečenje materije i deformacije koje se pod djelovanjem naprezanja s vremenom bez prestanka povećavaju)[13][14].

4.1.3. Veziva

Vezivo je tekuća komponenta premaza koja služi kao nosilac pigmentiranih čestica i sredstvo za disperziranje. Vezivo premazu daje neka od nužnih reoloških svojstva (plastičnost, tečenje). Vezivo osigurava prijenos premaza po površini trupa i veže pigmentne čestice. Zadatak veziva je da skupi pojedine čestice pigmenta u jednoličnu smjesu te da premazu da potrebna fizikalna svojstva. Podjela veziva je različita, a najčešća je podjela prema načinu sušenja na fizikalno i kemijsko sušenje. Osim prema načinu sušenja veziva se dijele i prema kemijskim spojevima koji ih tvore. Tako postoje veziva na osnovi prirodnih smola, derivata celuloze, prirodnog ili sintetičkog kaučuka, sušivih masnih ulja, poliplasta i bituminoznih tvari[13].

4.1.4. Otapala

Otapala su organske tvari koje se koriste za razrjeđivanje i rastvaranje drugih sastojaka premaza, bez kemijskih reakcija. Uloga otpala u premazu je razrjeđivanje kako bi se dobila potrebna viskoznost premaza radi lakšeg nanošenja i boljeg prekrivanja površine. Određena otapala mogu pomoći u procesu sušenja premaza, što je važno za postizanje željenih svojstava i trajnosti premaza. Dije se na ugljikovodike, derivate ugljikovodika s kisikom i klorirane ugljikovodike dok se ugljikovodici opet dijele na alifatske ugljikovodike i aromatske ugljikovodike. Za mnoga otapala postoje restrikcije zbog opasnosti od negativnog utjecaja na okoliš. Te restrikcije se odnose na vrstu i udio otapala u premazu [13].

4.1.5. Aditivi

Aditivi su raznovrsne tvari koje se dodaju u premaze broskog trupa kako bi poboljšali ili prilagodili njihova svojstva. Ovi dodaci igraju ključnu ulogu u optimizaciji performansi premaza, poboljšanju zaštite površine broda i produljenju njegove trajnosti. U premaze se dodaju stabilizatori boje, disperzanti koji sprječavaju nastajanje grudica, taloženje i održavaju homogenost smjese, aditivi koji sprječavaju koroziju tako što štite metal od prodora vode i kisika, te aditivi protiv obraštanja koji sadrže biocide. Biocid i tehnologija koja kontrolira ispuštanje biocida diktira učinkovitost biocidnih antivegetativnih premaza. Kao glavno biocidno sredstvo koristi se bakar (Cu_2O , CuSCN) s razgradivim pojačivačima, od kojih je najčešći cink-oksidi (ZnO , ZnO_2). Bakar je učinkovit biocid za morsku faunu. Biljni organizmi imuniji su na njegovo djelovanje[15].

4.2. Podjela premaza

Trenutne protuobraštajne tehnologije premaza mogu se podijeliti u dvije skupine [16]:

1. Kemijski aktivni premazi koji sprječavaju obraštanje napadajući organizme kemijski aktivnim spojevima.
2. Netoksični premazi koji poboljšavaju otpuštanje organizama s površine bez kemijski aktivnih spojeva.

Kemijski aktivni premazi dijele se prema mehanizmu otpuštanja biocida u tri skupine:

- a) tehnologija premaza temeljenih na prirodnim smolama koji mogu biti:
 - Premazi s netopivom matricom

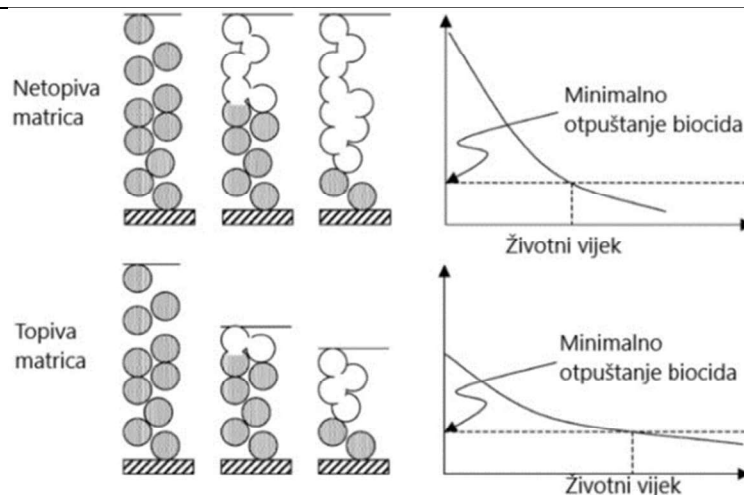
- Premazi s topivom matricom, CDP
- b) Samopolirajući premazi, SPC
 - c) hibridna SPC/CDP tehnologija

4.2.1. Premazi s netopivom matricom

Ova vrsta premaza ima matricu od netopivog polimera koja se ne troši i ne gubi volumen nakon uranjanja u vodu. Koriste se različiti komercijalni polimeri sa složenim molekulama, a najčešći su vinil, epoksi, akril i klorirani polimeri. Glavni nedostatak vrste premaza je kratki životni vijek (12-18 mjeseci). Rezultat je stvaranja šupljina u premazu kada dođe do otapanja topivih pigmenta što također uzrokuje i povećanje hrapavosti površine. Princip rada prikazan je slikom 17. Premaz je moguće reaktivirati struganjem prazne matrice, ali to može izazvati ponovni rast morskih algi koje su se naselile u šupljinama s druge strane, prednosti su vrlo dobra mehanička čvrstoća, nisu podložni pucanju i imaju dobru otpornost na atmosferske uvjete u morskom okruženju [15], [17].

4.2.2. Premazi s topivom matricom (CDP)

Topivom matricom ovih premaza izbjegnut je pad efikasnosti s vremenom, jer se koristi vezivo topivo u vodi. Temelj veziva je prirodna smola ekstrahirana iz borovih i jelinih stabala. Nedostatak tradicionalnih premaza je što se biocidi i topiva matrica istovremeno otapaju, a stopa otapanja povećava se s vremenom, stoga je životni vijek premaza 12-15 mjeseci. Taj su nedostatak nadomjestili CDP (Controlled Depletion Polymer) premazi. Vezivo ovih premaza ojačano je sintetičkom smolom koja je otpornija od prirodne. Posljedica je kontrola hidratizacije i otapanja veziva čime se životni vijek produljio na 36 mjeseci. Ovi premazi u teoriji imaju polirajući efekt, no u stvarnosti je to spriječeno iscrpljenim slojem nagomilanih bakrenih soli i ostalih netopivih spojeva. Najčešće su korišteni kod kratkih intervala dokovanja broda i u područjima niske stope obraštaja [15],[17].



Slika 18. Usporedba radnog principa premaza s topivom i netopivom matricom [17]

4.2.3. Samopolirajući premazi SCP

Kod samopolirajućih premaza biocidi se otpuštaju kroz procese hidrolize ili ionske zamjene između akrilnog polimera i morske vode samo u blizini površine, u sloju tanjem od 30 μm . Ovo omogućuje kontrolirano otpuštanje biocida, što rezultira efektom samozaglađivanja, posebno korisnim za hidrodinamička svojstva. Ovi premazi su posebno prikladni za nove površine, stvarajući čvrst i dugotrajan premaz. Glavni biocid uključuje bakreni oksid, s cinkovim oksidom (ZnO , ZnO_2), koji djeluje kao pojačivač. Ovi se biocidi brzo razgrađuju i ne akumuliraju se u morskom okolišu. U usporedbi s CDP premazima, ovi premazi pokazuju znatno veću učinkovitost jer stopa otpuštanja biocida ostaje konstantna dok god je prisutan sloj premaza [15][3].

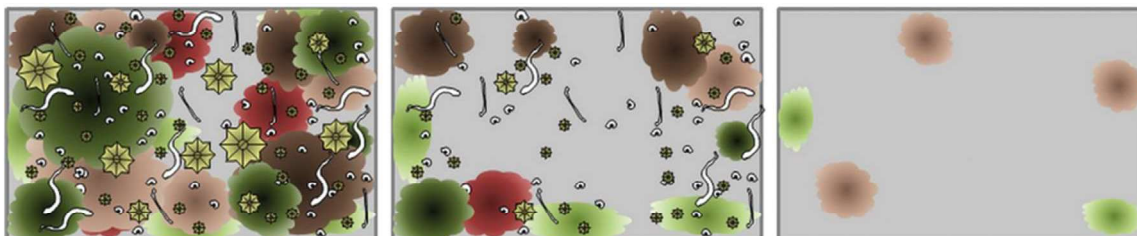
4.2.4. Hibridni SPC/CDP premazi protiv obraštaja

Hibridni premazi SPC/CDP najnoviji su tip premaza na bazi prirodnih smola. Upotpunjavaju samopolirajući premaz s CDP tehnologijom. Smoli se dodaju cinkov oksid kao pojačivač i npr. bakreni akrilat kao vodotopivi polimer. Cjenovno se nalaze između tih dviju vrsta premaza [15].

4.2.5. Neobraštajuća (Foul-release) tehnologija

Neobraštajući premazi (FR) najpoželjniji su zbog neštetnosti okolišu. Silikonski foul-release premazi ne rade na principu otpuštanja biocida u okoliš, već svojom glatkom površinom

onemogućuju nastanjivanje morskih organizama. Odnosno, ako dođe do adhezije organizama, zbog stajanja u luci, isti će otpasti pri gibanju broda. Površina ovih premaza podsjeća na blago valovitu morsku površinu. Vrlo su mekani i podložni mehaničkim oštećenjima. Princip rada FR premaza prikazan je na Slici 19.



Slika 19. Obrasli FR premaz (lijevo), plovidba brzinom 10 čv u trajanju od 1 minute (sredina), plovidba brzinom 20 čv u trajanju 1 min (desno)[16]

Druga vrsta FR premaza su polimeri koji sadrže fluor. Fluorakrilatni kopolimeri sprječavaju pričvršćivanje temeljnih slojeva obraštaja mijenjajući kemizam površine (sklonost površine kemijskim reakcijama s okolišem). Ne sadrže teške metale stoga su ekološki prihvatljiviji od navedenih vrsta. Novije vrste premaza uključuju polimere, biološke boje i površine po uzoru na morske organizme te elektrovodljive premaze. Hidrofilni polimer, polietilen glikol (PEG), čvrsto veže molekule vode na sebe i onemogućuje stvaranje početnog sloja proteina, dodaje ga se direktno u premaz ili ga se nanaša na premaz. Oponašanje strukturalnih i kemijskih osobina epiderme morskih organizama još je jedan primjer izbjegavanja štetnih biocida. Primjeri takvih površina su koža morskog psa s plakoidnim ljuskama, izbočine i žljebovi u koži kitova, te mikropogrfaksa struktura na ljušturama školjkaša i oklopu rakova[18].

Tablica 3. Prikaz glavnih značajki pojedinih vrsta AF premaza [15]

VRSTA PREMAZA	SVOJSTVA
Premazi s netopivom matricom	<ul style="list-style-type: none"> → Visoka mehanička čvrstoća → Prazna matrica pridonosi povećanju hrapavosti broskog trupa → Premaz je moguće reaktivirati struganjem prazne matrice, ali to može izazvati ponovni rast morskih trava koje su se naselile u šupljinama → Kratki životni vijek, do 18 mjeseci
Premazi s topivom matricom, CDP	<ul style="list-style-type: none"> → Visoki udio prirodne smole, bakar kao glavni biocid → Niska mehanička čvrstoća → Debeli iscrpljeni sloj zbog gomilanja netopivih spojeva (soli, nečistoće) → Pruža zaštitu u trajanju do 36 mjeseci → Cijena najniža među AF premazima bez kositra
Samopolirajući kopolimeri, SPC	<ul style="list-style-type: none"> → Otpuštanje biocida i otapanje polimera u tankom površinskom sloju -efekt samozaglađivanja → Čvrst i trajan film premaza – idealno za primjenu na novogradnjama → Glavni biocid je bakreni oksid s cinkovim oksidom kao pojačivačem → Stopa otpuštanja biocida je konstantna dokle god postoji sloj AF premaza → Zaštita do 60 mjeseci, ovisno o uvjetima u službi
Hibridni CDP/SPC	<ul style="list-style-type: none"> → Mali udio otapala, kontrolirana stopa otpuštanja biocida → Trajniji film u odnosu na CDP premaze → Učinkovitost i cijena između performansi CDP i SPC tehnologija → Životni vijek do 36 mjeseci
<i>Foul-release</i> premazi	<ul style="list-style-type: none"> → Bez biocida → Silikonska baza stvara vrlo glatku površinu koja otežava obraštanje → Vrlo mekani, podložni mehaničkim oštećenjima → Za samočišćenje potrebna je velika brzina plovidbe ili visoka aktivnost broda → 5-10 puta skuplji od ostalih AF premaza

4.3. Priprema površine

Za svaki sustav protiv obraštanja postoji tehnologija nanošenja. Postupak počinje odsoljavanjem i pranjem oplakane površine broda. Brod se pere visokotlačnim vodenim mlazom. Time se uklanjaju alge i veći dio makrobraštaja. Nakon toga u slučaju silikonskog premaza premaz se skida u potpunosti do materijala konstrukcije trupa broda, kako je prikazano Slikom 20. Bitno je brusilicom načiniti oštar rub postojećeg premaza. Ako se ne postigne dobar prijelaz zakrpa će se oljuštiti. Nanosi se temeljni premaz, međupremaz i silikon. Nije od važnosti hoće li se priječi linija, jer će s neoštećenog premaza višak novonanesenog skliznuti.



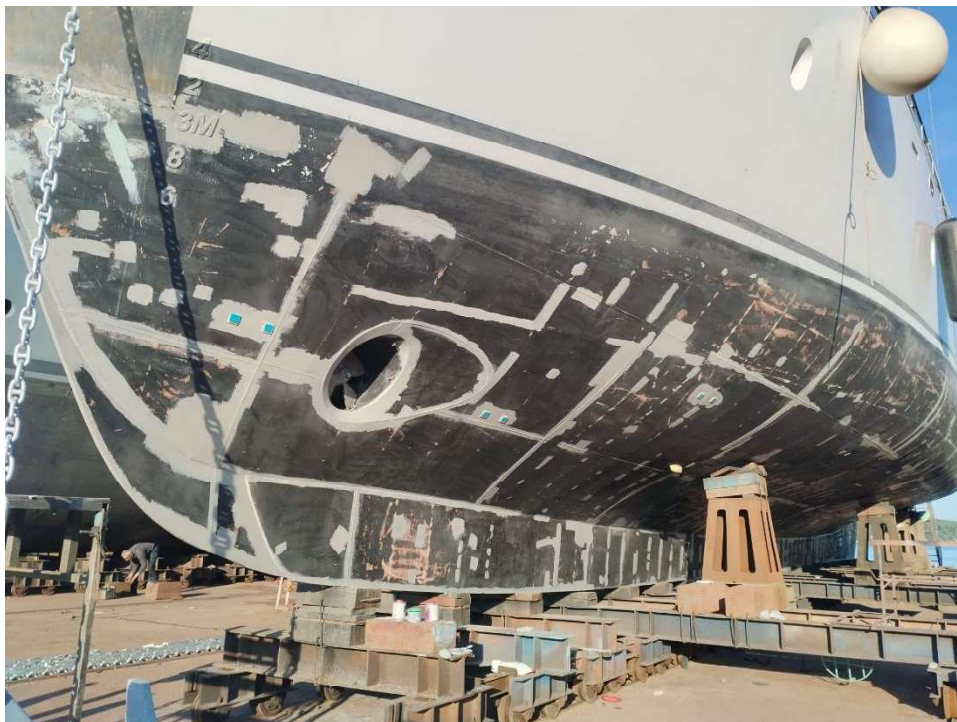
Slika 20. Priprema površine za lokalno obnavljanje silikonskog premaza

Kod ostalih konvencionalnih premaza koristi se izraz reaktivacija premaza. Premazi s topivom matricom bruse se do određene kvalitete. Lokalno se brusi do veće kvalitete, dok se ostatak površine brusi manje kvalitetno. Prikaz obrušene oplakane površine na Slici 21.

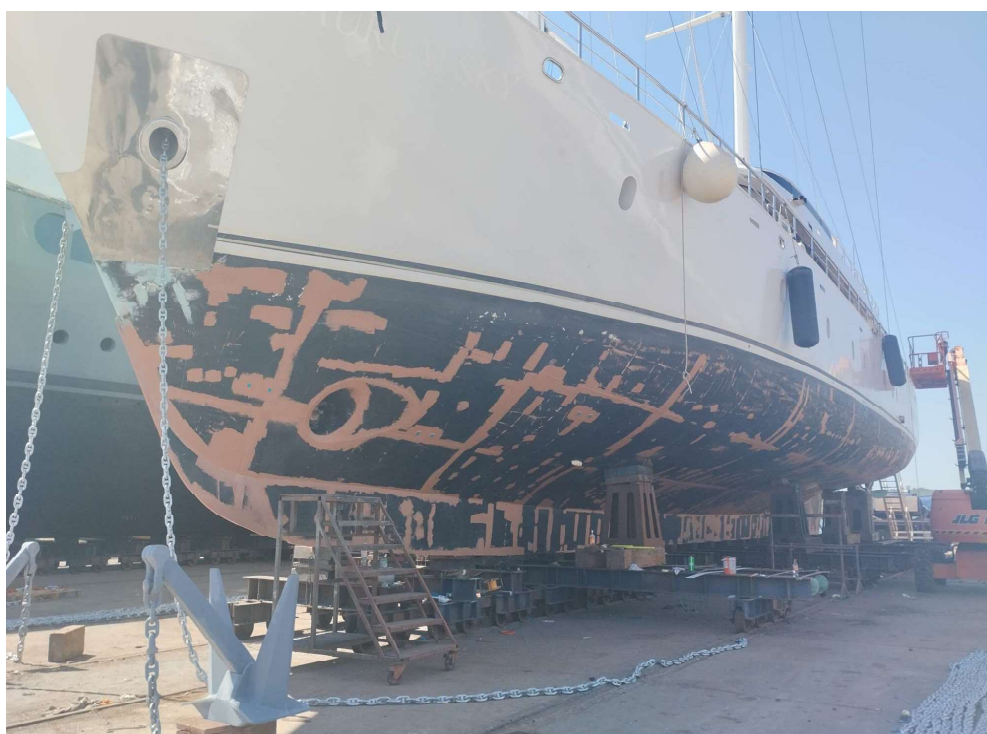


Slika 21. Priprema površine za lokalno obnavljanje premaza s topivom matricom

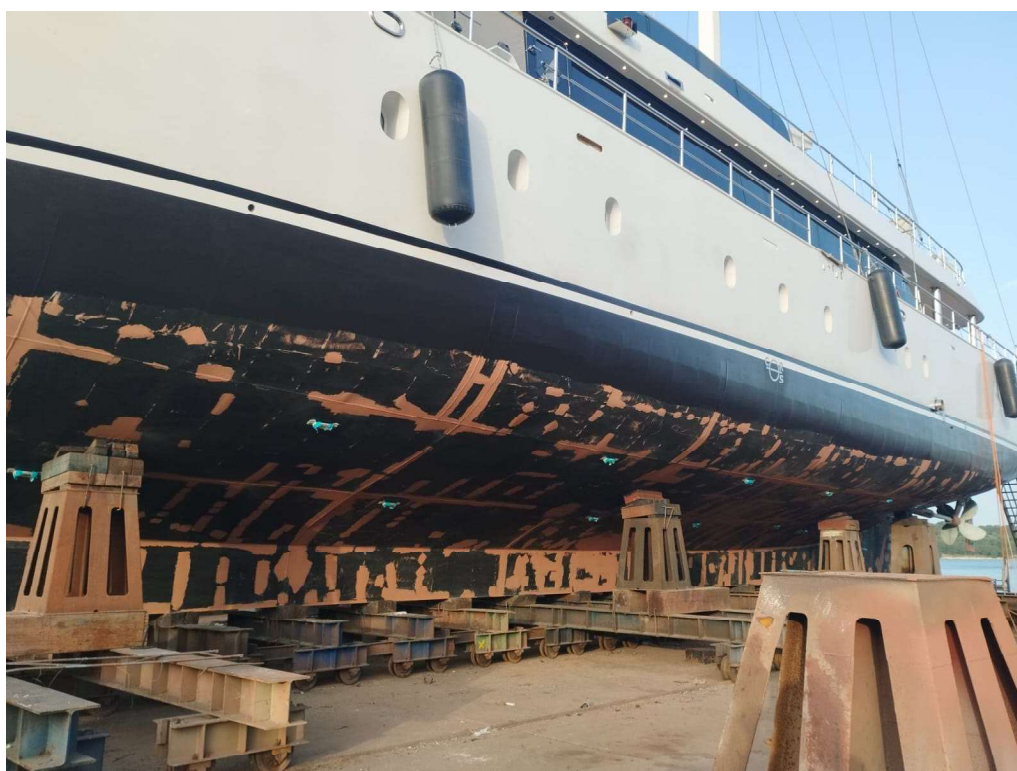
Nakon što se površina izbrusi, opere se mlazom vode. Kada je površina suha lokalno se premazuje temeljnim premazom i međupremazom, te se završni premaz nanosi preko cijele oplakane površine, Slika 22., 23., 24.



Slika 22. Lokalno nanesen temeljni premaz



Slika 23. Lokalno nanesen međupremaz



Slika 24. Usred procesa premazivanja završnog premaza

4.4. Aktivna zaštita ultrazvukom

Aktivna ultrazvučna zaštita brodova od obraštanja koristi se za sprječavanje prianjanja morskih organizama na trup broda. Emitiranjem ultrazvučnih valova ometa se razvoj larvi i spora, sprječavajući ih da se nasele i formiraju obraštaj. Prednost ultrazvučne zaštite je ekološka prihvatljivost, jer utječe na one organizme koji se žele naseliti na trup broda. Ultrazvučni sustavi za zaštitu od obraštanja rade na principu emitiranja ultrazvučnih valova visoke frekvencije koji su nečujni ljudima i većini morskih organizama. Valovi se emitiraju s pretvarača postavljenih na trup broda i šire se u okolnoj vodi, stvarajući zvučno polje oko broda. Ultrazvuk ometa ponašanje i razvoj larva i spora morskih organizama na sljedeće načine

- Ometanje kretanja: ultrazvuk utječe na sposobnost larvi da plivaju i orijentiraju se, što im otežava pronalaženje i naseljavanje na trupu broda.
- Oštećenje stanica: visoka razina energije ultrazvuka može oštetiti stanice i tkiva larvi i spora, sprječavajući njihov rast i razvoj.
- Promjena ponašanja: ultrazvuk može promijeniti ponašanje larva i spora, čineći ih manje sklonima naseljavanju na trupu broda.

Ultrazvuk značajno smanjuje potrebu za čišćenjem. Negativna strana je visoka početna investicija. Ultrazvučni sustavi zahtijevaju kontinuirano napajanje, što može biti problem na brodovima bez adekvatnog napajanja. Također, djelotvornost ultrazvuka ovisi o temperaturi mora, što je hladnije sustav je manje učinkovit. Isto tako smanjena je učinkovitost zaštite ako je prisutna velika koncentracija planktona. Ultrazvučna zaštita je svestrana, jer je primjenjiva na trgovačkim i vojnim brodovima, jahtama i ribarskim brodovima. Tehnologija aktivne ultrazvučne zaštite od obraštanja je relativno nova i još uvijek se razvija. U tijeku su istraživanja za poboljšanje efikasnosti ultrazvučne zaštite u svim uvjetima. Sam sustav sastoji se od centralne jedinice spojene na konstantni izvor napajanja, te sonde spojene na oplatu, cjevovod mora i slično, Slika 25.

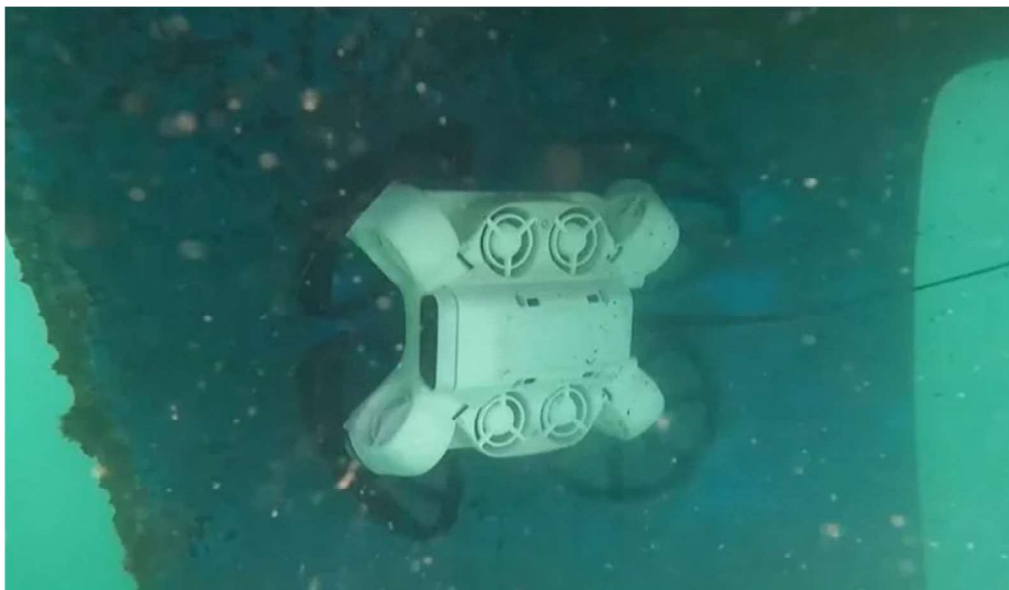


Slika 25. Sastavni dijelovi ultrazvučnog sustava zaštite

4.5. Aktivna zaštita podvodnim robotom

Aktivna zaštita broskog trupa podvodnim robotom inovativna je tehnologija. Koristi se za uklanjanje obraštanja i održavanje glatkog trupa broda. Ova metoda nudi niz prednosti u odnosu na tradicionalne metode, ali ima i svojih mana. Brodovlasnici u prosjeku jednom godišnje unajme ronionca. Ako brod čisti ronilac, postoji mogućnost ljudske greške. Negativna strana jest također što brod tijekom procesa ne plovi, tako da uklonjene spore ili larve plutaju u vodi oko broda i postoji mogućnost ponovnog prihvaćanja za površinu trupa. Podvodni roboti se mogu koristiti u raznim situacijama, može se koristiti za čišćenje trupa broda dok je usidren ili vezan u luci ili se robot može lansirati s broda i pratiti ga tijekom plovidbe, čisteći trup od obraštaja. Roboti mogu efikasno ukloniti obraštaj s teško dostupnih mjesta na trupu broda. Neki roboti koriste visokotlačne vodene mlaznice, a neki četke, što uvelike umanjuje mogućnost oštećenja premaza. Još jedna prednost je što se ne mora svaki puta unajmljivati i dogovarati termin s roniocem. Redovito čišćenje robotima može smanjiti potrebu za suhim dokom i ručnim čišćenjem, što dugoročno štedi novac. Kao i kod ultrazvučne zaštite mana ovog sustava je visoka početna cijena investicije. Tehnologija je relativno nova, pa su nabava i održavanje robota skupi. Dostupnost robota za čišćenje trupa nije uvijek jednostavna, a rad robota može biti otežan lošim vremenskim uvjetima ili slabom vidljivošću pod vodom. Razvoj podvodnih robota za čišćenje trupa se aktivno odvija. Neka od poboljšanja koja se istražuju uključuju:

poboljšanje autonomije kako bi roboti mogli duže raditi bez nadzora, razvoj senzora kako bi bolje prepoznali i uklonili obraštaj, te naravno razvoj novih metoda čišćenja koje su još efikasnije i ekološki prihvatljivije.



Slika 26. Podvodni robot za snimanje i čišćenje oplakane površine [19]

5. MATEMATIČKI MODEL

U ovom radu prikazan je ranije razvijen matematički model planiranja idealnog vremenskog perioda između dokovanja broda. Model je detaljnije opisan u istraživačkom radu [20]. Temelji se na ideji planiranja idealnog perioda dokovanja. U istraživačkom je radu prikazana metoda za procjenu povećanja potrebne snage porivnog sustava uvjetovane razvojem obraštaja po oplakanoj površini brodskog trupa. Obraštaj po oplakanoj površini trupa razmatra se kao hrapavost. Razvoj obraštaja uvjetovan stohastičkim reproduktivnim potencijalom obraštajnih vrsta. Ovako složen model zahtjeva određena pojednostavljenja:

1. Hrapavost broda razvija se samo na oplakanoj površini trupa broda, dok vijak ostaje bez obraštaja.
2. Promjene u polju sustrujanja izazvane hrapavošću trupa ne utječu na koeficijent korisnosti vijka.
3. Učinak hrapavosti trupa razmatra se samo kroz visine hrapavosti.
4. Dodatak za hrapavost računa se prema poznatoj korelaciji za model i brod ITTC 1978

Kako bi se dobila realna slika potrebe broda za snagom pogonskog stroja, potrebno je definirati parametre poput dodatka za hrapavost, srednju razinu hrapavosti površine i učinkovitost premaza protiv obraštanja.

Prikazani model je baziran na preporukama ITTC 1978, no korištene formule su doradene. U formulu za dodatak hrapavosti uzet je u obzir faktor forme k kojeg računamo, ako nije drugačije zadan, kao

$$k = 18,7 \left(\frac{C_B \cdot B_{WL}}{L_{WL}} \right)^2 \quad (3)$$

gdje je C_B blok koeficijent trupa, a B_{WL} širina vodne linije broda. Nakon definiranja faktora forme jednačba za dodatak hrapavosti glasi:

$$\Delta C_F = 0,044 \left[\left(\frac{k_s}{L_{WL}} \right)^{\frac{1}{3}} - 10Re^{-\frac{1}{3}} \right] (1 + k) + 0,000125 \quad (4)$$

U jednačbi (4) L_{WL} je duljina broda na vodnoj liniji, k_s je srednja vrijednost razine hrapavosti trupa, odnosno dalje u tekstu AHR. Reynoldsov broj izražava se preko izraza

$$R_n = \frac{L_{WL} \cdot v}{\nu} \quad (5)$$

a koeficijent hrapavosti u službi, koji se koristi za dobivanje dodatka potrebe za snagom ΔP :

$$C_s = \Delta C_{F(j+1)0} - \Delta C_{Fj} = 0.044(1 + k) \frac{AHR_{j+1}^{\frac{1}{3}} - AHR_j^{\frac{1}{3}}}{L_{WL}^{\frac{1}{3}}} \quad (6)$$

Ukupna hrapavost površine je zbroj pojedinačnih razina hrapavosti:

$$AHR = AHR_{NB} + AHR_S + AHR_D + AHR_F \quad (7)$$

Početna vrijednost hrapavosti oplakane površine AHR_{NB} iznosi 70-100 μm . To je hrapavost uzrokovana tehnologijom gradnje trupa i premazom novoizgrađenog trupa. Hrapavost službe i dokovanja procijenjena je na 2.8 μm po mjesecu službe i 14 μm po dokovanju

$$\Delta P_j = \frac{1}{2} \frac{\rho v^3 S C_s}{\eta} \quad (8)$$

gdje je ρ gustoća vode, η koeficijent korisnosti vijka, a S označava oplakanu površinu broda.

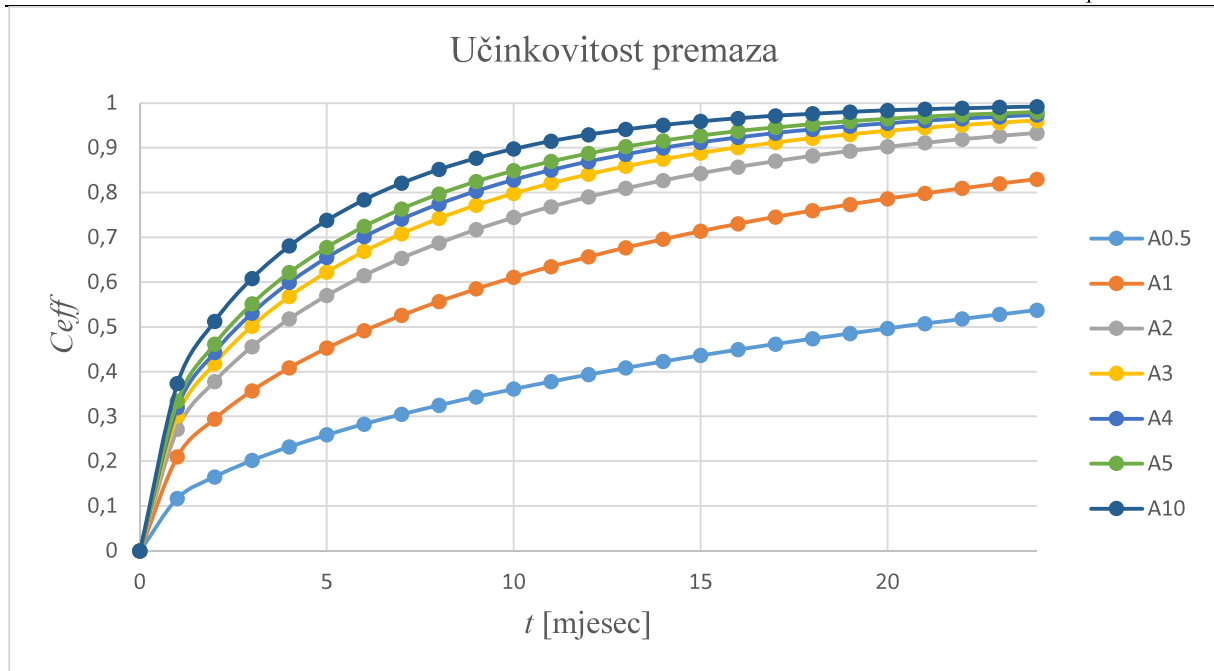
Ovaj model je realističan, jer je definiran stohastičnom funkcijom ovisnom o svojstvima vrste obraštaja. Stohastička funkcija pretpostavljena je da i -ta vrsta, gdje je $i = 1, 2, 3, \dots, SP$, a SP je sveobuhvatnost obraštajnih vrsta prihvaćenih za infinitezimalno mali komad oplakane površine s vjerojatnošću $p_i = p_i(x, y, z, t)$, gdje su $x, y, z \in S$, a t označava vrijeme. Svaka vrsta koja se prihvati za oplakanu površinu pridonijet će porastu visine hrapavosti:

$$dh_i = \begin{cases} C_{eff} r_i dt, & \text{if } X > p_i(x, y, z, t) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

gdje C_{eff} označava učinkovitost premaza, $r_i = r_i(x, y, z, t)$ je stopa rasta pojedine vrste obraštaja, X je slučajni broj u rasponu (0,1). Inače oplakana površina trupa neće obrasti. C_{eff} je bitna komponenta, uzima u obzir životni vijek premaza, kao i tehnologiju nanošenja premaza.

$$C_{eff} = \frac{2}{\pi} \arccos \left[(Ae)^{-\frac{t}{B}} \right] \quad (10)$$

U formuli za učinkovitost premaza nalazi se A , odnosno sama tehnologija nanošenja premaza koja može postići vrijednost između 0.5 i 10. Neki primjeri efikasnosti premaza prikazani su na Slici 27. Povećanjem vrijednosti A , efikasnost je manja. B označava životni vijek premaza u mjesecima.



Slika 27. Učinkovitost pemaza

Na taj je način srednju hrapavost oplakane površine moguće izraziti kao

$$AHR_{F,i} = \frac{1}{S} \int_S \int_t C_{eff} r_i dt dS \quad (11)$$

odnosno kao

$$AHR_{F,i} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{j=1}^N C_{eff} r_{i,j,k} \Delta t_j \quad (12)$$

gdje je M je ukupni broj elemenata oplakane površine, a N je ukupna količina vremenskih trenutaka. Δt_j označava vremenski korak, dok $p_{i,j,k}$ i $r_{i,j,k}$ su vjerojatnost prihvatanja i stopa rasta, i -te vrste u j -tom vremenskom trenutku, $j = 1, 2, \dots, N$, na k -tom elementu oplakane površine, $k = 1, 2, \dots, M$.

U skladu s konceptom Rt_{50} , ukupna vrijednost hrapavosti u nekom vremenskom trenutku, uzima se iz sljedeće jednadžbe:

$$AHR_{F,j} = \max \{ AHR_{F,i=1,j}, AHR_{F,i=2,j}, \dots, AHR_{F,i=SP,j} \} \quad (13)$$

Jednadžba (14) služi za dobivanje akumuliranih troškova potrošnje goriva, zbog povećanja hrapavosti oplakane površine. U j -tom trenutku, troškovi goriva određeni su s $\eta_{sail,j}$ kao udjelom vremena provedenog u plovidbi, SFC_j specifičnom potrošnjom goriva, i CF_j jediničnom cijena goriva, odnosno:

$$C_{Fuel}^N = \sum_{j=1}^N (N - j + 1) \cdot SFC_j \cdot \Delta P_j \cdot \eta_{sail,j} \cdot \Delta t_j \cdot CF_j \quad (14)$$

Normalizirana cijena goriva tada iznosi:

$$\bar{C}_{Fuel} = C_{Fuel}^N I \quad (15)$$

gdje je

$$I = \frac{T_M}{R_M} \quad (16)$$

a T_M označava referentni period dokovanja, dok je R_M oznaka za relativni period dokovanja.

Nadalje, troškovi dokovanja broda mogu se računati kao:

$$C_M = n_L C_{AF} \frac{S}{\eta_{AF}} + C_{APP} S + C_{ID} \quad (17)$$

Gdje je n_L broj premaza, C_{AF} specifična cijena premaza, η_{AF} specifična potrošnja premaza, C_{APP} cijena pripreme površine i radnih sati, te potrošnog materijala. C_{ID} je oznaka popratnih troškova dokovanja, kao što su plaća posade. Konačno, normalizirani trošak održavanja iznosi

$$\bar{C}_M = C_M \cdot I \quad (18)$$

a ukupni troškovi broda u službi izraženi su jednadžbom (19):

$$C_T = \bar{C}_{Fuel} + \bar{C}_M \quad (19)$$

Sljedeća jednadžba označava točku minimuma krivulje troškova goriva i dokovanja.

$$C_{Fuel}^N = C_M \quad (20)$$

5.1. Validacija matematičkog modela

U ovom je radu matematički model validiran na motornom brodu Aurum Sky. Opći podaci broda dani su u Tablici 4. Brod je izgrađen 2020. godine. Do sada je bio dokovan dva puta, uključujući ovogodišnje dokovanje. Brod je registriran kao jahta za iznajmljivanje, te u službi provede šest mjeseci godišnje, preostalih šest mjeseci je vezan u Šibeniku.

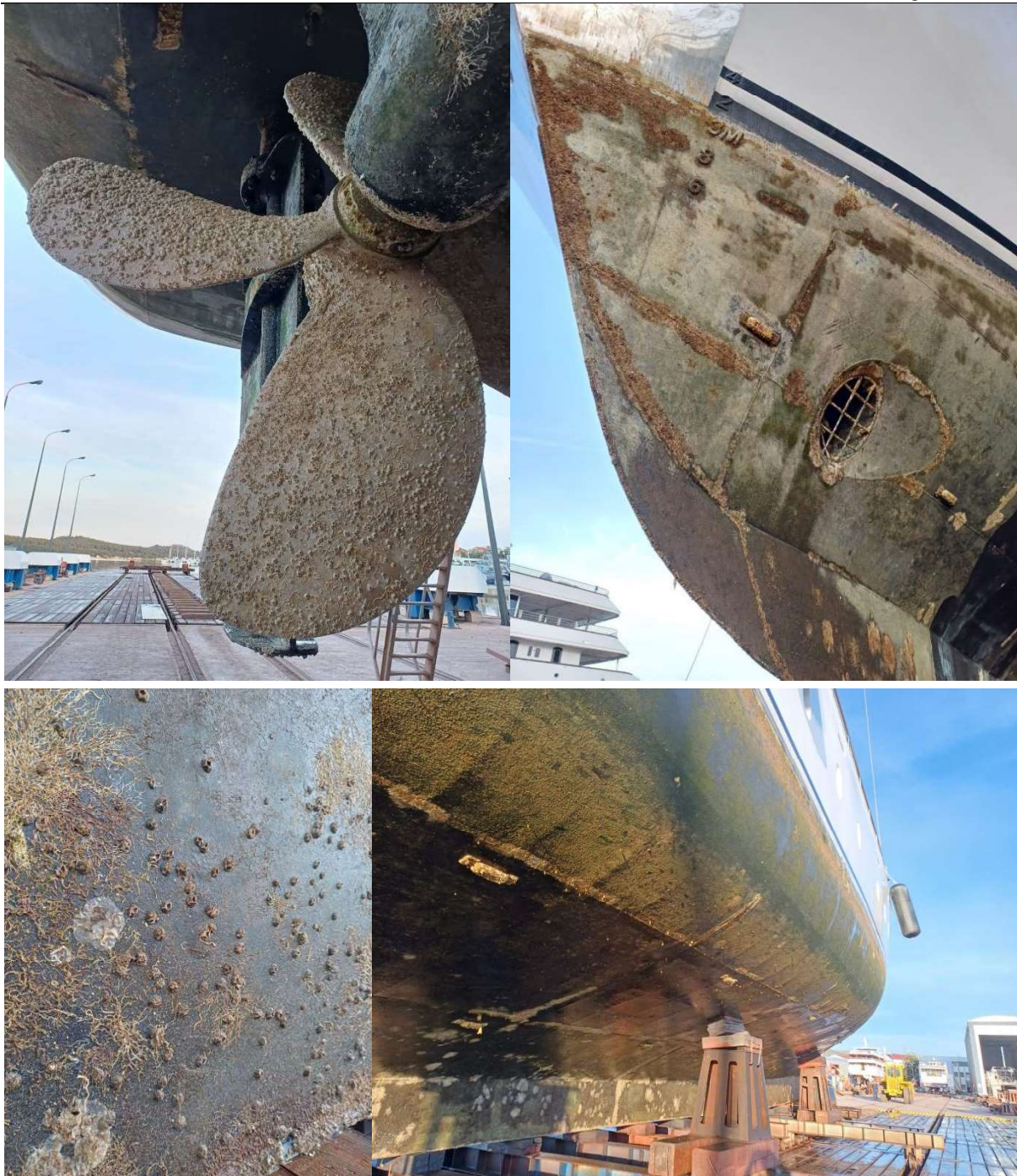
Tablica 4. Opći podaci broda

Podaci o brodu:			
Duljina preko svega	L_{OA}	40,04	m
Duljina vodne linije	L_{WL}	36,52	m
Širina	B	8,4	m
Širina vodne linije	B_{WL}	8,4	m
Gaz	T	2,56	m
Istisnina	Δ	361,81	t
Blok koeficijent	C_B	0,45	
Srednja brzina u službi	v	11,5	čv



Slika 28. Aurum Sky na syncroliftu

Brod je iz mora dignut syncroliftom, nakon 24 mjeseca od zadnjeg dokovanja. Oplakana površina u potpunosti je bila prekrivena zelenim algama. Mjestimično bila je prekrivena mahovnjacima i balanidima Slika 29.



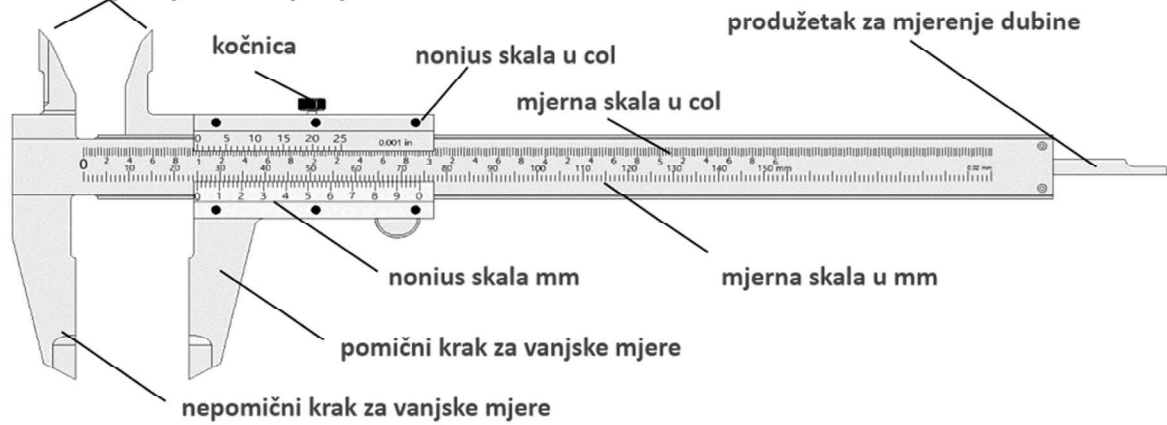


Slika 29. Fotografije obraštaja

5.1.1. Rezultati mjerenja u naravi – AHR_f

Mjerena je desna strana trupa (starboard side). Pretpostavljeno je da je obraštaj simetričan s obje strane broda. Oplakana površina desne strane trupa podijeljena je na 18 zona. Krećući od vodne linije na pramcu, prema kobilici na krmi. Mjerenje je napravljeno pomičnom mjerkom, prema pretpostavci Rt_{50} . Primjer mjerenja jednog mjernog mjesta dan je na Slici 31. Izmjerene visine hrapavosti nalaze se u Tablici 5. Točnost mjerenja pomičnom mjerkom iznosi ± 1 mm.

krakovi za mjerenje unutarnje mjere



Slika 30. Pomično mjerilo s dijelovima



Slika 31. Primjer načina mjerenja u naravi

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti hrapavosti

zona	mjerene točke [mm]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	4	3,5	4	2,5	2,5	6,2	4,5	3	3,78
2	7	6,5	2	1,5	/	/	/	/	4,25
3	2,5	14	12	1	2	/	/	/	6,30
4	2	2,5	1,2	15	14	4	4	4	5,84
5	5	2,2	4	3	2,5	5	3	/	3,53
6	9	7,5	5	8	6	5,5	4	5	6,25
7	5	4,5	5	5,5	2	7	9	1	4,88
8	1	2	1	2	2	1	1,5	1	1,44
9	12	12	14	2,5	2	2	/	/	7,42
10	2,5	2	2	2	2	1	/	/	1,92
11	3	2	2	5	7	3	4	/	3,71
12	6	7	6	12	5	6	9	/	7,29
13	10	14	5	5,5	14	1,5	2	/	7,43
14	2	1	3	2	7	5	3	/	3,29
15	2	4	5	6	2	2	/	/	3,50
16	6	5	5	14	12	15	5	/	8,86
17	2	2	2	3	5	7	2	/	3,29
18	10	5	8	5	7	9	12	/	8,00

Izmjerene vrijednosti zbrojene su i podijeljene brojem mjernih mjesta. Dobivena je srednja vrijednost obraštaja $AHR_f = 5.05$ mm.

Program planiranja razvoja obraštaja, napravljen je u Fortranu. Unose se početne vrijednosti parametara za svaki kalendarski mjesec, a dobiva se prosječna visina obraštaja. Ulazne vrijednosti stope rasta i vjerojatnosti nastanjivanja pojedine vrste prikazane su Tablicom 7. i 8., uzete su iz Disertacije Branka Belamarića [2]. U Tablici 6. nalaze se vrijednosti koje ostaju konstante neovisno o vremenskom koraku.

Tablica 6. Konstanti ulazni podaci

Konstantni ulazni podaci u proračun	
Mjeseci	24
Zone	18
Mjerna mjesta	16
Stopa rasta zelenih algi	37,5
Učinkovitost premaza	0,5
Životni vijek premaza	60

Tablica 7. Ulazni podaci stope rasta [2]

Zona	Stopa rasta vrste obraštaja r_i [mm/mjesec]		
	Zelena alga, r_1	Crv cjevaš, r_2	Balanid, r_3
1	0,038	1,666	0,666
2	0,038	1,666	0,500
3	0,038	1,666	0,500
4	0,038	1,666	0,500
5	0,038	1,666	0,166
6	0,038	0	0
7	0,038	1,250	0,666
8	0,038	1,250	0,666
9	0,038	2,083	0,666
10	0,038	0,833	0,250
11	0,038	0	0
12	0,038	0	0
13	0,038	0,416	0,833
14	0,038	0,416	0,250
15	0,038	0,416	0,250
16	0,038	0,416	0,250
17	0,038	0,833	0,333
18	0,038	0	0

Tablica 8. Ulazni podaci vjerojatnosti nastanjivanja oplakane površine [2]

Mjesec	Vjerojatnost prihvaćanja vrste obraštaja za površinu					
	Zelena alga, p_1		Crv cjevaš, p_2		Balanid, p_3	
	1-3, 7-9, 13-15	4-6, 10-12, 16-18	1-3, 7-9, 13-15	4-6, 10-12, 16-18	1-3, 7-9, 13-15	4-6, 10-12, 16-18
Siječanj	1	1	0	0,125	0	0,062
Veljača	1	1	0,375	0,062	0,062	0,187
Ožujak	1	1	0,562	0,125	0,125	0,500
Travanj	1	1	0,875	0,312	0,312	0,562
Svibanj	1	1	0,750	0,312	0,312	0,625
Lipanj	1	1	0,937	0,437	0,437	1
Srpanj	1	1	1	0,562	0,562	1
Kolovoz	1	1	1	0,812	0,812	1
Rujan	1	1	0,937	1	1	1
Listopad	1	1	0,750	0,132	0,312	0,250
Studeni	1	1	0,375	0,250	0,250	0,562
Prosinac	1	1	0,062	0	0	0,062

U Tablici 9. iskazani su dobiveni rezultati, odnosno kronološki razvoj srednje visine hrapavosti uzrokovane obraštajem od zadnjeg dokovanja.

Tablica 9. Izlazni podaci programa

	Mjesec	AHR _f [μm]
1	22	58,8
2	23	59,1
3	24	120,2
4	25	284,4
5	26	520,3
6	27	730,0
7	28	958,1
8	29	1208,4
9	30	1471,2
10	31	1754,9
11	32	2053,6
12	33	2357,0
13	34	2662,1
14	35	2979,2
15	36	3307,8
16	37	3647,3
17	38	3997,4
18	39	4357,7
19	40	4727,7
20	41	5107,3
21	42	5496,1
22	43	5893,9
23	44	6300,6
24	45	6715,8

Vrijednost AHR_f dobivena razvijenom teorijom odstupa za 1,7 mm, od stvarnih izmjenjenih vrijednosti. U obzir svakako treba uzeti grešku mjerenja u naravi, obzirom da su određeni dijelovi trupa bili teško dostupni i proces je bio vremenski ograničen.

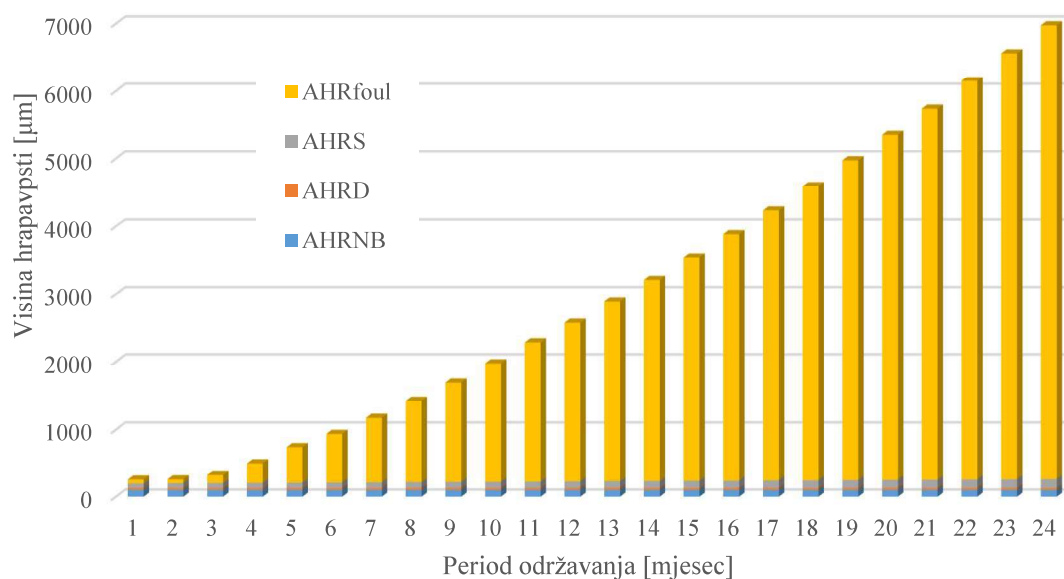
5.1.2. Utjecaj hrapavosti na prirast snage

Kada je utemeljena veza između hrapavosti oplakane površine broskog trupa i perioda od prethodnog dokovanja, može se postaviti utjecaj na dodatak potrebne snage. U Tablici 10. uvrštene su vrijednosti svih vrsta hrapavosti, te pribrojene hrapavosti obraštaja, kako bi se dobila konačna vrijednost hrapavosti oplakane površine. Stupac s vrijednostima hrapavosti korišten je za daljnji proračun prirasta snage prema izrazima (6) i (8). Tablica 10. grafički je prikazana Slikom 32.

Tablica 10. Vrijednosti pojedinih hrapavosti i konačna vrijednost

Mjesec	AHR _f [μm]	AHR _{NB} [μm]	AHR _S [μm]	AHR _D [μm]	AHR [μm]	AHR [mm]
1	58,8	100	67,2	28	255,0	0,25
2	59,1	100	70	28	259,1	0,26
3	120,2	100	72,8	28	324,0	0,32
4	284,4	100	75,6	28	492,0	0,49
5	520,3	100	78,4	28	731,7	0,73
6	730,0	100	81,2	28	945,2	0,95
7	958,1	100	84	28	1177,1	1,18
8	1208,4	100	86,8	28	1431,2	1,43
9	1471,2	100	89,6	28	1697,8	1,70
10	1754,9	100	92,4	28	1985,3	1,99
11	2053,6	100	95,2	28	2287,8	2,29
12	2357,0	100	98	28	2595,0	2,60
13	2662,1	100	100,8	28	2903,9	2,90
14	2979,2	100	103,6	28	3224,8	3,22
15	3307,8	100	106,4	28	3557,2	3,56
16	3647,3	100	109,2	28	3900,5	3,90
17	3997,4	100	112	28	4254,4	4,25
18	4357,7	100	114,8	28	4618,5	4,62
19	4727,7	100	117,6	28	4992,3	4,99
20	5107,3	100	120,4	28	5375,7	5,38
21	5496,1	100	123,2	28	5768,3	5,77
22	5893,9	100	126	28	6169,9	6,17
23	6300,6	100	128,8	28	6580,4	6,58
24	6715,8	100	131,6	28	6999,4	7,00

Srednja visina hrapavosti



Slika 32. Srednja visina hrapavosti oplakane površine

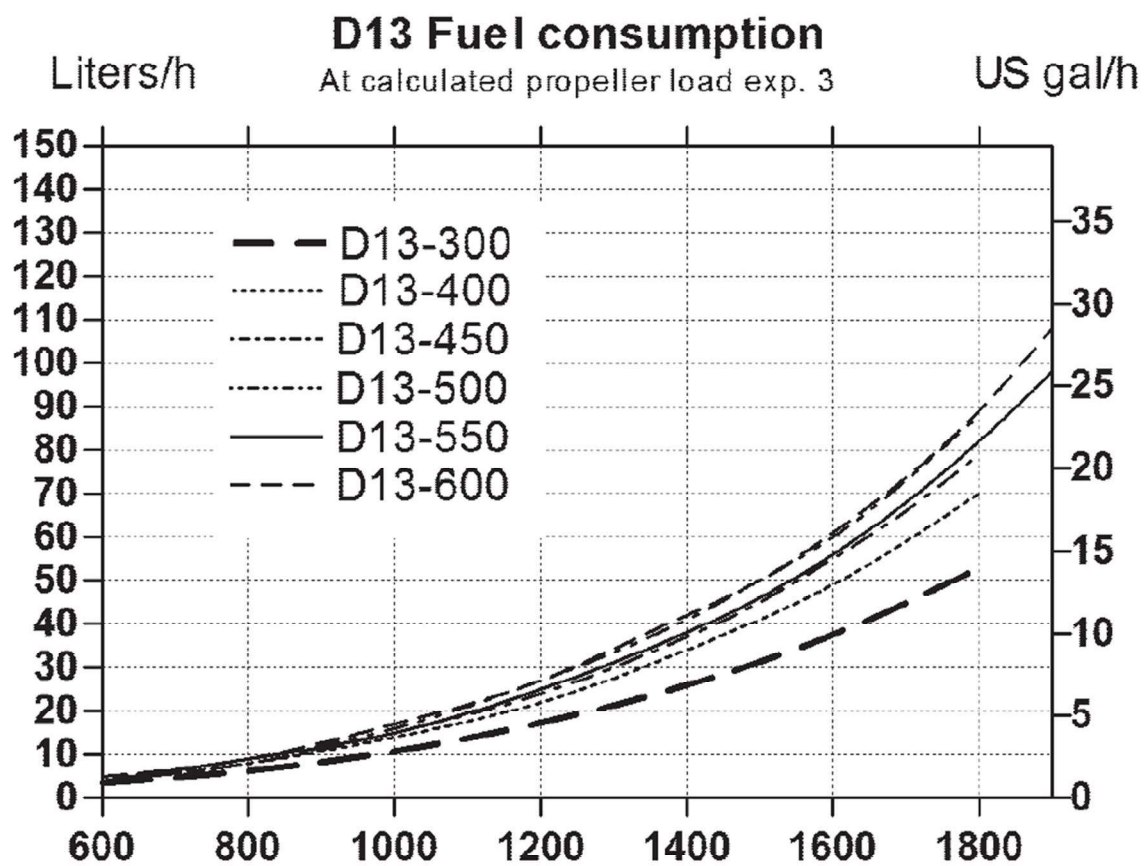
Tablica 11. Povećanje dodatka potrebne snage po mjesecima

<i>kalendarski mjesec</i>	<i>kronološki mjesec</i>	C_{eff}	$AHR[m]$	ΔC_F	$C_{s(real)}$	$\Delta P [kW]$
travanj	22	0,06	0,000255	0,000253	0,000000	0,00
svibanj	23	0,09	0,000259	0,000258	0,000005	0,36
lipanj	24	0,11	0,000324	0,000336	0,000084	5,50
srpanj	25	0,13	0,000492	0,000500	0,000247	16,20
kolovoz	26	0,14	0,000732	0,000678	0,000425	27,84
rujan	27	0,16	0,000945	0,000805	0,000553	36,21
listopad	28	0,17	0,001177	0,000924	0,000671	43,98
studeni	29	0,18	0,001431	0,001037	0,000784	51,39
prosinac	30	0,19	0,001698	0,001142	0,000889	58,28
siječanj	31	0,20	0,001985	0,001244	0,000991	64,94
veljača	32	0,21	0,002288	0,001340	0,001088	71,28
ožujak	33	0,22	0,002595	0,001430	0,001178	77,18
travanj	34	0,23	0,002904	0,001514	0,001261	82,65
svibanj	35	0,24	0,003225	0,001595	0,001342	87,94
lipanj	36	0,25	0,003557	0,001673	0,001420	93,06
srpanj	37	0,25	0,003901	0,001749	0,001496	98,03
kolovoz	38	0,26	0,004254	0,001822	0,001570	102,85
rujan	39	0,27	0,004619	0,001894	0,001641	107,54
listopad	40	0,28	0,004992	0,001963	0,001711	112,10
studeni	41	0,28	0,005376	0,002031	0,001779	116,55
prosinac	42	0,29	0,005768	0,002098	0,001845	120,89
siječanj	43	0,30	0,006170	0,002162	0,001910	125,14
veljača	44	0,30	0,006580	0,002226	0,001973	129,29
ožujak	45	0,31	0,006999	0,002288	0,002035	133,35

Podaci za stvarnu potrošnju goriva i potrebnu snagu dobiveni su iz Tehničkih podataka o motoru dobivenih od brodoglasnika. Radi se o VOLVO PENTI D13B MH(R1-500). Diesel motoru s unutarnjim izgaranjem. Riječ je o dva motora sa 6 linijski poredanih cilindara, od kojih svaki razvija 368 kW snage.



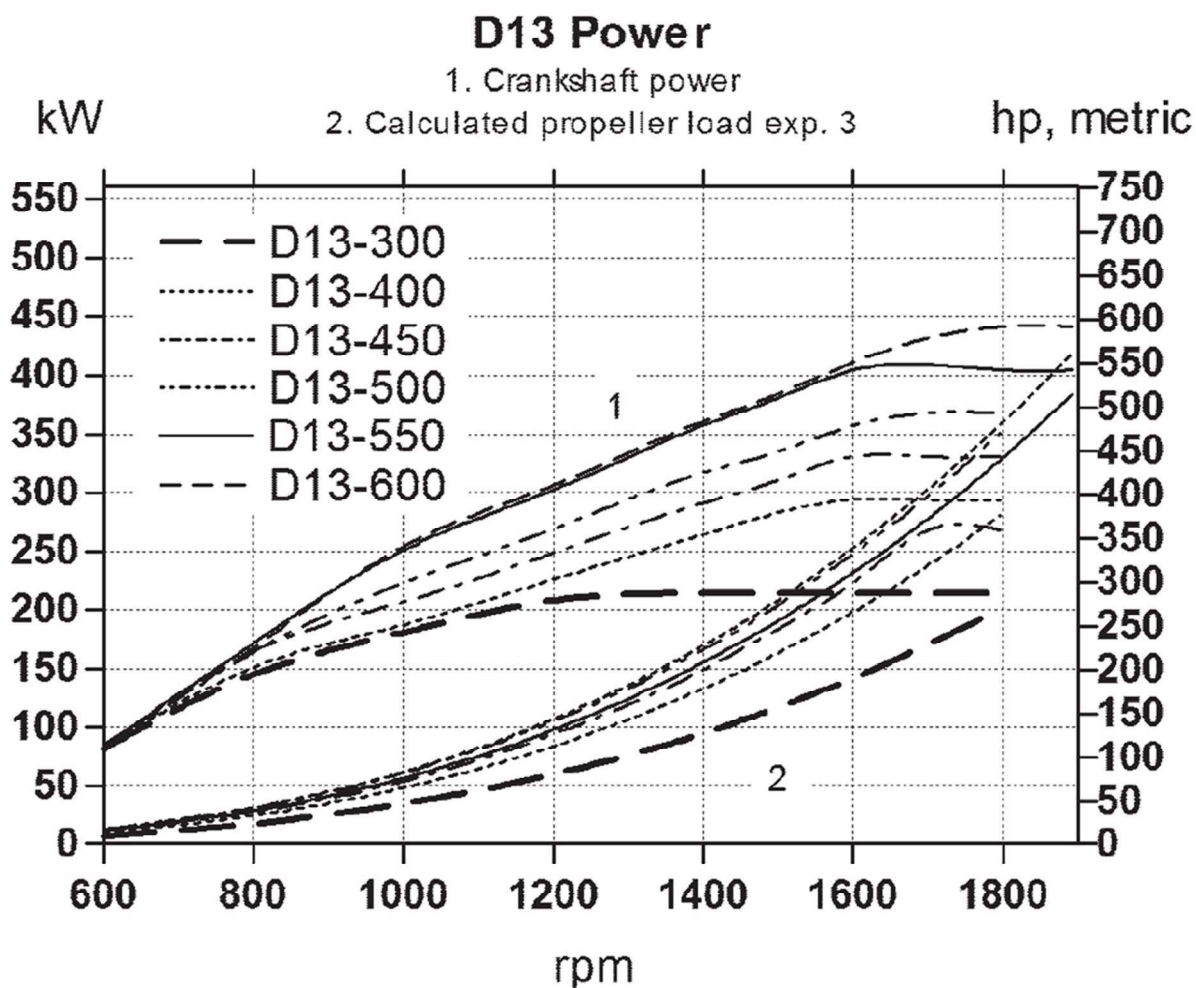
Slika 33. Motor Volvo Penta D13MH(R1-500)



Slika 34. Graf ovisnosti potrošnje goriva o okretajima

Tablica 12. Tablica razvijene snage motora pri određenim okretajima

Performance	Rating	rpm	600	800	1000	1200	1400	1500	1600	1700	1800
Crankshaft power 1), 5)	1	kW	80,7	164	222,6	268,7	317,2	334,8	357,1	367,8	367,8
		hp	110	223	303	365	431	455	486	500	500



Slika 35. Graf ovisnosti snage o okretajima

Od brodovlasnika dobiveni su podaci o mjesečnoj količini točenog goriva tijekom jedne sezone. Odnosno ukupno pet vrijednosti. Obzirom da su ti podaci dosta oskudni, kako bi se dobile vrijednosti za 24 mjeseca korišten je sustav aproksimacije jednadžbom pravca kroz dvije točke:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (21)$$

Početna vrijednost je polovična količina potrošenog goriva u mjesecu svibnju, dok je krajnja vrijednost polovična potrošnja goriva za mjesec rujan. Razlog tome je što brod provede šest mjeseci u plovidbi unutar godine dana. Vrijeme plovidbe za prvi mjesec je također polovična vrijednost stvarnog vremena u plovidbi iz istog razloga. Nadalje, vrijeme provedeno u plovidbi povećava se zbog smanjenja brzine. Prema iskazu vlasnika primijećeno je smanjenje srednje

brzine plovidbe s 11,5 čv (5,92 m/s) na 10 čv (5,144 m/s), nakon dvije godine. Uvrštavanjem tih podataka u formulu za prevaljeni put dobiva se:

$$s = t_1 \cdot v_1 = 37,5 \cdot 5,92 \cdot 3600 = 799200 \text{ m} \quad (22)$$

$$t_{24} = \frac{s}{v_{24} \cdot 3600} = 43,16 \text{ h} \quad (23)$$

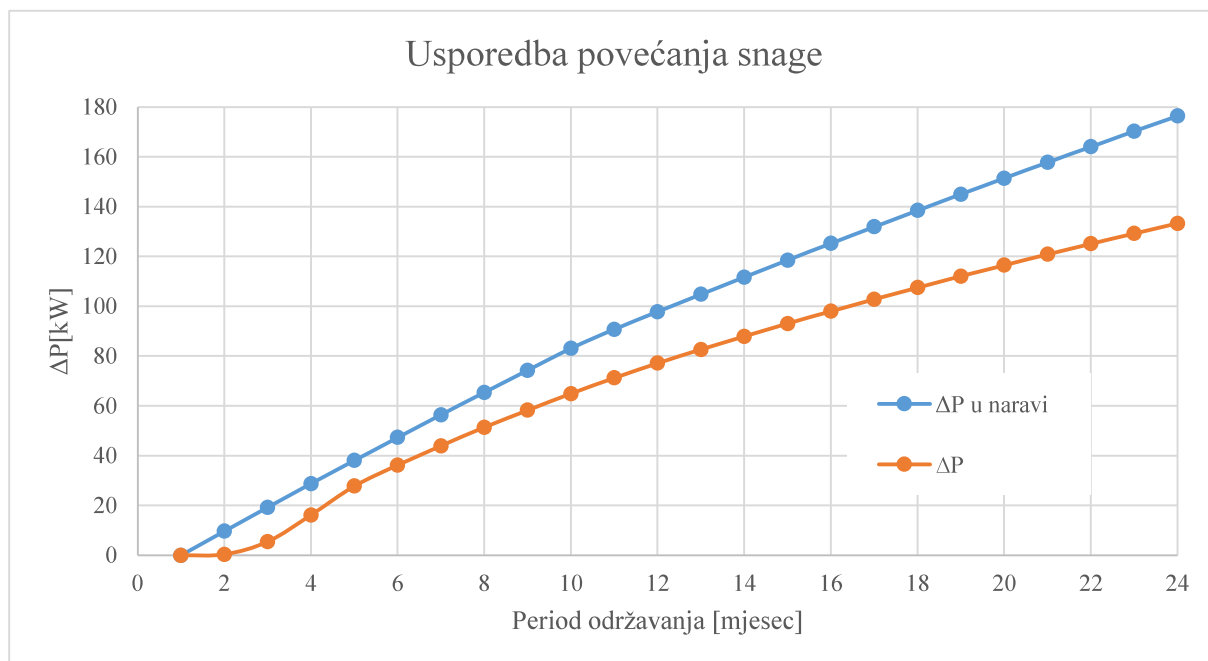
Vrijednosti za ostale mjesece se linearno mijenjaju.

Pretpostavka jest da su dobiveni podaci o količinama goriva izraženi u litrama. Temeljem podataka o točenju goriva na crpkama, moguće je bilo izračunati srednju potrošnju goriva prema pretpostavci provedenog vremena u plovidbi. Srednja potrošnja goriva za jedan motor dalje je korištena za dobivanje podataka iz dijagrama na Slici 34. Dobiveni rezultati okretaja i snage prikazani su Tablicom 13.

Tablica 13. Povećanje snage u naravi

t [mjesec]	t_{sail} [h]	Potrošeno goriva [l/mjesec]	Srednja potrošnja [l/h]	Srednja potrošnja 1 motor [l/h]	Okretaji n [o/min]	P 1 motor [kW]	P u naravi [kW]	ΔP u naravi [kW]
1	37,5	1256,00	33,49	16,75	1013,58	225,73	451,46	0,00
2	37,75	1351,74	35,81	17,91	1034,65	230,59	461,17	9,72
3	37,99	1447,48	38,10	19,05	1055,45	235,38	470,76	19,31
4	38,24	1543,22	40,36	20,18	1075,99	240,12	480,23	28,77
5	38,48	1638,96	42,59	21,29	1096,26	244,79	489,58	38,12
6	38,73	1734,70	44,79	22,40	1116,27	249,40	498,80	47,34
7	38,98	1830,43	46,96	23,48	1136,04	253,96	507,91	56,45
8	39,22	1926,17	49,11	24,56	1155,55	258,45	516,91	65,45
9	39,47	2021,91	51,23	25,62	1174,82	262,90	525,79	74,33
10	39,71	2117,65	53,32	26,66	1193,86	267,28	534,57	83,11
11	39,96	2213,39	55,39	27,70	1209,94	271,11	542,22	90,76
12	40,20	2309,13	57,43	28,72	1224,53	274,65	549,30	97,84
13	40,45	2404,87	59,45	29,73	1238,94	278,14	556,29	104,83
14	40,70	2500,61	61,45	30,72	1253,18	281,60	563,19	111,74
15	40,94	2596,35	63,41	31,71	1267,25	285,01	570,02	118,56
16	41,19	2692,09	65,36	32,68	1281,15	288,38	576,76	125,30
17	41,43	2787,83	67,28	33,64	1294,88	291,71	583,42	131,96
18	41,68	2883,57	69,18	34,59	1308,46	295,00	590,00	138,54
19	41,93	2979,30	71,06	35,53	1321,87	298,25	596,51	145,05
20	42,17	3075,04	72,92	36,46	1335,13	301,47	602,94	151,48
21	42,42	3170,78	74,75	37,38	1348,23	304,65	609,29	157,83
22	42,66	3266,52	76,57	38,28	1361,18	307,79	615,57	164,11
23	42,91	3362,26	78,36	39,18	1373,98	310,89	621,78	170,32
24	43,155	3458,00	80,13	40,06	1386,64	313,96	627,92	176,46

Usporedba povećanja snage dobivene proračunom, te podataka iz stvarnosti prikazana je grafom na Slici 36. Stvarni podaci podliježu greškama obzirom da je većina toga pretpostavljena, te postoji mogućnost da ΔP u naravi iznosi manje nego je dobiveno aproksimacijama. Time je i razlika u mjerenjima manja.



Slika 36. Usporedba povećanja snage

5.1.3. Izbor najisplativijeg perioda dokovanja

U Tablici 14. nalaze se konstantne vrijednosti za proračun najisplativijeg perioda dokovanja za ovaj određeni slučaj.

Tablica 14. Konstantne vrijednosti u proračunu najisplativijeg perioda dokovanja

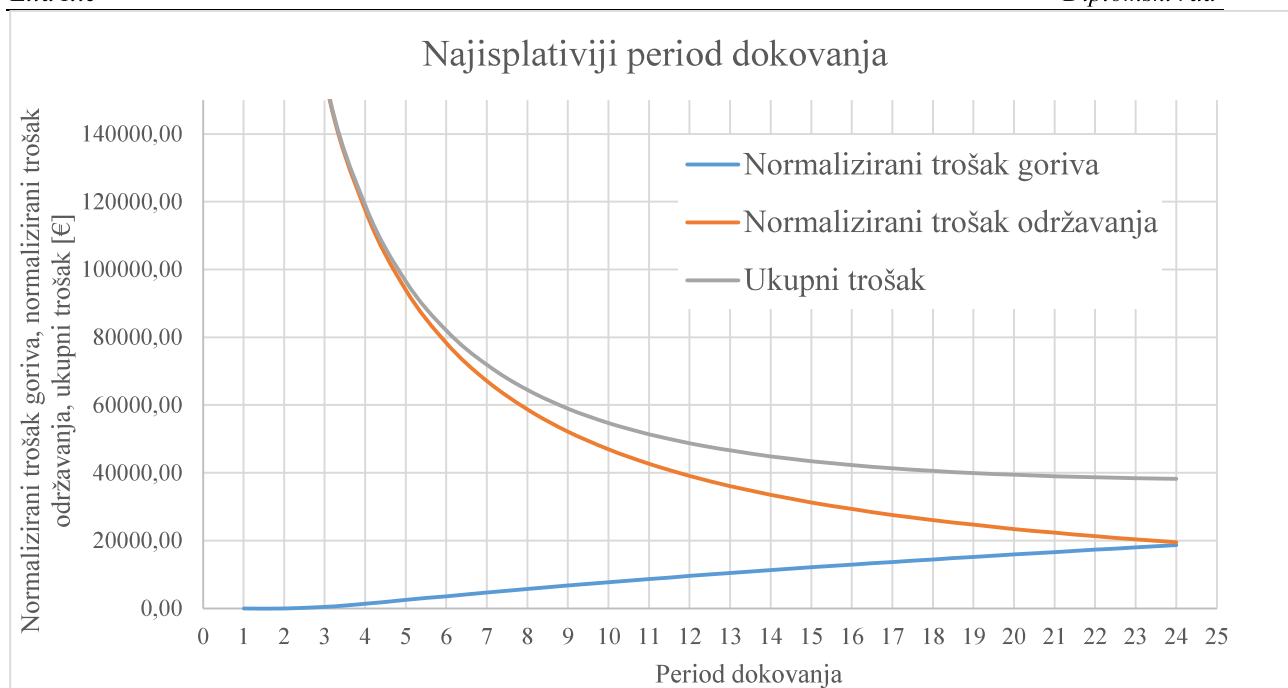
Faktor utjecaja forme	k	0,200028262	
Učinkovitost propulzije	η	0,6	
Oplakana površina	S	370,57	m ²
Gravitacija	g	9,80665	m/s ²
Kvaliteta premaza	A	0,5	
Životni vijek premaza	B	60	
Kinematička viskoznost	ν	1,0056E-06	m ² /s
Gustoća morske vode	ρ	1025	kg/m ³
Ukupni broj mjeseci između dokovanja	N	24	
Specifična potrošnja goriva	SFC_j	190	g/kWh
Korak	Δt_j	1	mjesec
Relativni period dokovanja	R_M	24	mjesec
Broj slojeva boje	n_L	3	
Koštanje bojanja	C_{AF}	3021,58	€
Koštanje pripreme površine	C_{APP}	6419,38	€
Potrošnja premaza	η_{AF}	5,9317	m ² /l
Popratni troškovi dokiranja	C_{ID}	10134,75	€
Ukupni troškovi održavanja oplakane površine	C_M	19575,71	€

Formule (3)-(20) stavljene su u Tablicu 15., te uz konstantne vrijednosti iz Tablice 14. daju graf na Slici 37.

Tablica 15. Vrijednosti ukupnih troškova održavanja

ΔP	η_{sail}	CF_j	C_{fuelN}	TM	I	C_{fuel}	\bar{C}_M	C_T
0,00	0,0521	0,00149	0,00	24	24,00	0,00	469817,04	469817,04
0,36	0,0521	0,00149	3,78	23	12,00	45,36	234908,52	234953,88
5,50	0,0521	0,00149	62,12	22	8,00	496,95	156605,68	157102,63
16,20	0,0521	0,00149	234,05	21	6,00	1404,32	117454,26	118858,58
27,84	0,0521	0,00149	529,64	20	4,80	2542,29	93963,41	96505,70
36,21	0,0521	0,00149	914,09	19	4,00	3656,38	78302,84	81959,22
43,98	0,0521	0,00149	1380,98	18	3,43	4734,79	67116,72	71851,51
51,39	0,0521	0,00149	1926,58	17	3,00	5779,75	58727,13	64506,88
58,28	0,0521	0,00149	2545,28	16	2,67	6787,42	52201,89	58989,31
64,94	0,0521	0,00149	3234,68	15	2,40	7763,22	46981,70	54744,93
71,28	0,0521	0,00149	3991,42	14	2,18	8708,56	42710,64	51419,20
77,18	0,0521	0,00149	4810,75	13	2,00	9621,49	39151,42	48772,91
82,65	0,0521	0,00149	5688,19	12	1,85	10501,27	36139,77	46641,04
87,94	0,0521	0,00149	6621,78	11	1,71	11351,62	33558,36	44909,98
93,06	0,0521	0,00149	7609,74	10	1,60	12175,59	31321,14	43496,73
98,03	0,0521	0,00149	8650,42	9	1,50	12975,62	29363,57	42339,19
102,85	0,0521	0,00149	9742,27	8	1,41	13753,80	27636,30	41390,10
107,54	0,0521	0,00149	10883,92	7	1,33	14511,89	26100,95	40612,84
112,10	0,0521	0,00149	12074,01	6	1,26	15251,39	24727,21	39978,60
116,55	0,0521	0,00149	13311,35	5	1,20	15973,62	23490,85	39464,47
120,89	0,0521	0,00149	14594,79	4	1,14	16679,76	22372,24	39052,00
125,14	0,0521	0,00149	15923,29	3	1,09	17370,86	21355,32	38726,18
129,29	0,0521	0,00149	17295,85	2	1,04	18047,85	20426,83	38474,68
133,35	0,0521	0,00149	18711,55	1	1,00	18711,55	19575,71	38287,26

Troškovi dokovanja navedeni u Tablici 14. odnose se na cijenu premaza,



Slika 37. Graf najisplativijeg perioda dokovanja broda

Unutar 24 mjeseca nije postignut najisplativiji period dokovanja. No, uzimajući u obzir da je mjesec travanj, te odgađanje dokovanja može značiti nespremnost broda na sezonu, ostvarili bi se dodatni troškovi održavanja koji bi negativno utjecali na taj period.

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad bavi se problematikom koja potječe iz razdoblja pojave brodogradnje i pomorstva. Razvijanjem tehnologije i znanosti, problem obraštaja rješava se na mnoge načine. Biološki aspekti pojave obraštaja odnose se na širenje invazivnih vrsta i uništavanje lokalnih ekosustava.

Povećanjem hrapavosti oplakane površine broskog trupa potrebna je veća količina goriva, što povećava emisije stakleničkih plinova. U pogledu novčanih gubitaka, obraštaj negativno utječe na operativna svojstva broda. Kako bi se izbjegli gubitci i omogućila najveća profitabilnost broda, razvijena je metoda planiranja najprofitabilnijeg perioda dokovanja. Matematički model predviđanja razvoja obraštaja, realističan je jer u obzir uzima stohastički razvoj pojedine vrste obraštaja.

Metoda je uspješno validirana na MB Aurum Sky. Rezultati mjerenja visine hrapavosti obraštaja u metodi i naravi razlikovale su se minimalno, te su rezultati povećanja snage od onoga u stvarnosti odudarali za 24 %. Uzimajući u obzir nedostatak dovoljne količine podataka o potrošnji goriva, postoji mogućnost nedovoljne utemeljenosti takvog zaključka. Svakako se da zaključiti kako metoda odlično predviđa razvoj obraštaja u smislu prosječne visine hrapavosti oplakane površine.

Za usavršavanje matematičkog modela predlaže se ponoviti pokus iz Belamarićeve disertacije [2], kako bi se dobili podaci razvoja obraštaja na mjestima različitog saliniteta mora koji utječe na razvoj obraštaja. Time bi ulazni podaci u matematičkom modelu bili vjerodostojniji, a sama metoda predviđanja još preciznija. Također, za buduće je istraživanje neophodno osigurati pouzdanije podatke o potrošnji goriva tijekom plovidbe broda.

LITERATURA

- [1] **Hellio, C., Yebra, D.:** Advances in marine antifouling coatings and technologies Cambridge, 2009.
- [2] **Belamarić, B.:** Utjecaj hrapavljenja oplakane površine na eksploatacijska svojstva broda Zagreb, 2008.
- [3] <https://ussconstitutionmuseum.org/2015/08/12/copperbottomed/>, 16.3.2024.
- [4] **Hadžić, N.:** Tehnologija brodogradnje III, Fakultet strojarstva i brodogradnje , Zagreb, 2020.
- [5] **Hadžić, N., Uroić, T., Gatin, I.:** Optimizacija održavanja sustava zaštite protiv obraštanja ribarskih brodova Zagreb, 2021.
- [6] **Fitzsimons, B., Parry, T.:** Fitz Atlas of coating surveys
- [7] <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Common-Hull-Fouling-Invasive-Species.aspx>, 24.3.2024.
- [8] World Trade Report, World Trade Organization, 2022., Geneva
- [9] **Kitack L.:** Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report, introduction, International Maritime Organisation, London, 2021.
- [10] **Neira, C., Levin, L.A., Mendoza, G., Zirino, A.:** Alteration of benthic communities associated with copper contamination linked to boat moorings. Marine Ecology-an Evolutionary Perspective **35**, 46-66, 2014.
- [11] **Giorgiutti Y., Rezende F., Van S., Monteiro C., Preterote, G.:** Impact of Fouling on Vessel's Energy Efficiency, Rio de Janeiro: 25° Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore, 2014.
- [12] **Lejars, M., Margailan, A., Bressy, C.:** Fouling Release Coatings: A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings, Toulon, ACS Publications, 2011.
- [13] **Knifić, Ž., Ivče, R., Komadina P.:** Značenje uporabe zaštitnih premaza u održavanju trupa broda. Rijeka : Pomorski fakultet sveučilišta u Rijeci, 2014.
- [14] **Alar, V., Šimunović V., Juraga I.:** Teorijske Osnove Korozijskih Procesa i Metode Zaštite, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, katedra za zaštitu materijala, 2011.
- [15] **Juraga I., Stojanović I., Noršić T.:** Zaštita broskoga trupa od korozije i obraštanja. Časopis Brodogradnja, 2007.
- [16] **Lejars, M., Margailan, A., Bressy. C.:** Fouling Release Coatings: A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings. Toulon, 2011.

-
- [17] **Yebra, D.M., Kiil, S., Weinell, C., Dam-Johansen, K.:** Antifouling Technology – Past, Present and Future Steps towards Efficient and Environmentally Friendly Antifouling Coatings, *Progress in Organic Coatings* 50, 75-104, 2004.
- [18] **Ujčić, K.:** Utjecaj protuobraštajnih boja na morske organizme, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2017.
- [19] <https://pomorac.hr/2024/01/12/hullbot-robot-za-pregled-i-ciscenje-brodskog-trupa/>, 10.4.2024.
- [20] **Hadžić, N., Gatin, I., Uroić, T., Ložar, V.:** Biofouling dynamic and its impact on ship powering and drydocking, Elsevier 2022, Zagreb