

Usporedba projektnog i operativnog indeksa energetske učinkovitosti Ro-Ro putničkog broda

Kajfeš, Ita

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:702475>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ita Kajfeš

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir, dipl. ing.

Student:

Ita Kajfeš

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru doc. dr. sc. Nikoli Vladimiru dipl. ing. na pruženoj potpori, strpljenju te svim savjetima, razgovorima, i kritikama tijekom pisanja ovog završnog rada, i asistentici Maji Perčić mag. ing. na ukazanoj pomoći i uloženom vremenu.

Također bih se zahvalila svojoj obitelji na velikoj potpori i inspiraciji tijekom cjelokupnog studiranja.

Ita Kajfeš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Ita Kajfeš

Mat. br.: 0035209128

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Usporedba projektnog i operativnog indeksa energetske učinkovitosti
Ro-Ro putničkog broda**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**Comparative analysis of energy efficiency design and operational
indexes of a Ro-Ro passenger ship**

Opis zadatka:

Energetska učinkovitost broda predstavlja jedan od važnih suvremenih projektnih kriterija u brodskom strojarstvu, pri čemu izračun projektnog indeksa energetske učinkovitosti predstavlja temelj za izdavanje Međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti. Navedeni dokument nužan je za stavljanje broda u službu od 01. siječnja 2013. godine, pri čemu su u njegovoj dosadašnjoj implementaciji uočene određene manjkavosti. Jedna od njih je razlika u projektnim i operativnim brzinama broda, što navedeni indeks čini nereprezentativnim za stvarna eksploatacijska stanja broda. U tom smislu, u završnom radu je potrebno analizirati projektni i operativni indeks energetske učinkovitosti za Ro-Ro putnički brod Petar Hektorović iz flote Jadrolinije koji se koristi na ruti Split-Vis-Split, imajući u vidu tehničke značajke broda i stvarni eksploatacijski profil.

Zadatak treba sadržavati:

1. Opis problematike utjecaja broda na okoliš,
2. Opis postupka izdavanja Međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti,
3. Tehnički opis analiziranog broda s naglaskom na brodski energetski sustav,
4. Analizu operativnog profila broda tijekom ljetnog i zimskog plovidbenog reda,
5. Proračun projektnog i operativnog indeksa energetske učinkovitosti zadanog broda uz odgovarajuću analizu rezultata.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Nikola Vladimir

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. REGULATORNI OKVIR U PODRUČJU ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODOVA	4
2.1. Izmjena MARPOL-a	4
2.2. Pravno administrativni okvir.....	5
2.2.1. Definicije –Pravilo 2	5
2.2.2. Trajanje i valjanost certifikata – Pravilo 9	5
2.2.3. Postignuti EEDI (eng. Attained EEDI) – Pravilo 20	6
2.2.4. Zahtijevani EEDI (eng. Required EEDI) – Pravilo 21.....	6
2.2.5. SEEMP – Pravilo 25	6
3. PROJEKTNI I OPERATIVNI INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI	9
3.1. Smjernice za proračun zahtijevanog EEDI-a	9
3.2. Smjernice za proračun postignutog EEDI-a.....	12
3.2.1. Vratilni generator – oduzimanje snage na vratilu	17
3.2.2. Vratilni motor – dodavanje snage na vratilu.....	18
3.3. Smjernice za proračun operativnog indeksa energetske učinkovitosti	18
4. IZDAVANJE MEĐUNARODNOG CERTIFIKATA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI (IEEC).....	19
4.1. Preliminarna verifikacija.....	19
4.2. Konačna verifikacija	20
5. ANALIZA EEDI-a	21

5.1. Podaci o brodu	21
5.1.1. Opći podaci	21
5.1.2. Osnovne dimenzije.....	21
5.2. Brodski energetska sustav.....	22
5.3. Izračun zahtijevanog EEDI-a	23
5.4. Izračun postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti	23
5.4.1. Bezdimezijski korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda f_j	23
5.4.2. Bezdimezijski korekcijski faktor f_c smanjene zapremnine.....	25
5.4.3. Snaga pogonskog stroja P_{ME}	25
5.4.4. Snaga pomoćnih motora P_{AE}	25
5.4.5. Postignuti EEDI	26
5.5. Izračun operativnog indeksa energetske učinkovitosti	28
5.5.1. Bezdimezijski korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda f_j	29
5.5.2. Snaga pogonskog stroja P_{ME}	29
5.5.3. Operativni indeks energetske učinkovitosti	30
5.6. Usporedba projektnog i operativnog indeksa energetske učinkovitosti.....	31
5.7. Usporedba ljetnog i zimskog režima rada.....	32
5.8. Inovativne tehnologije.....	34
6. ZAKLJUČAK.....	36
LITERATURA.....	37
PRILOZI.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1	Brod Petar Hektorović [4]	2
Slika 2	Najveći brod za prijevoz automobila M/V Tønsberg [6]	3
Slika 3	Struktura SEEMP-a	7
Slika 4	Prikaz promjene redukcijskog faktora u vremenu za dane vrste brodova.....	11
Slika 5	Referentne krivulje za ro-ro putnički brod u pojedinim fazama	11
Slika 6	Raščlamba izraza za izračun EEDI-a	17
Slika 7	Shema brodskog energetskeg sustava	22
Slika 8	Usporedba postignutog EEDI-a sa zahtijevanim iznosom u prvoj fazi redukcije.	27
Slika 9	Grafički prikaz brzina broda kroz proteklih mjesec dana	28
Slika 10	Određivanje snage porivnog stroja za brzinu od 13,4 čv [12].....	30
Slika 11	Usporedba.....	32
Slika 12	Usporedba dnevne emisije ugljikovog dioksida tijekom i izvan sezone.....	33
Slika 13	Rro-ro brod tvrtke VPLP [14]	34
Slika 14	brod za prijevoz automobila hibridnog tipa sa solarnim panelima [16].....	35

POPIS TABLICA

Tablica 1	Emisija CO ₂ različitih vrsta brodova	1
Tablica 2	Vrijednosti parametara a i c za dane vrste brodova.....	10
Tablica 3	Redukcijski faktor po fazama za dane vrste brodova.....	10
Tablica 4	Vrijednosti koeficijenta C _F za različite vrste goriva	14
Tablica 5	Vrijednosti eksponenata α, β, γ, i δ	15
Tablica 6	Opći podaci zadanog broda	21
Tablica 7	Osnovne dimenzije zadanog broda.....	21
Tablica 8	Potrebni podaci za izračun zahtijevanog EEDI-a.....	23
Tablica 9	Podaci potrebni za izračun Froudeovog broja F _{nL}	24
Tablica 10	Podaci potrebni za izračun korekcijskog faktora f _j	24
Tablica 11	Ulazni podaci za izračun postignutog EEDI-a	26
Tablica 12	Ulazni podaci za izračun dnevne emisije CO ₂	33

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
B_s	m	širina broda
C_{FAE}	kg CO ₂ /kg goriva	konverzijski faktor goriva pomoćnih strojeva
C_{FME}	kg CO ₂ /kg goriva	konverzijski faktor goriva glavnog stroja
d_s	m	gaz broda
DWT	t	nosivost broda
$Emisija CO_{2_{sez}}$	kg CO ₂ /dan	dnevna emisija CO ₂ u periodu sezone
$Emisija CO_{2_{van-sez}}$	kg CO ₂ /dan	dnevna emisija CO ₂ u periodu izvan sezone
f_c	-	faktor smanjene zapremnine
$f_{cRo-Pax}$	-	korekcijski faktor posebnih konstrukcijskih značajki- ro-ro putničkog broda
f_{eff}	-	faktor dostupnosti inovativnih energetski učinkovitih tehnologija
f_i	-	faktor smanjene nosivosti
f_j	-	korekcijski faktor posebnih konstrukcijskih značajki broda
f_{jRo-Ro}	-	korekcijski faktor posebnih konstrukcijskih značajki broda ro-ro broda
F_{nL}	-	Froudeov broj
f_w	-	koeficijent stanja mora
GT	m ³	bruto tonaža
$Kapacitet$	t	mjera nosivosti ovisno o tipu broda

L_{pp}	m	duljina broda između okomica
MCR_{ME}	kW	maksimalna trajna snaga motora
P_{AE}	kW	snaga pomoćnih strojeva
P_{AEeff}	kW	ukupna snaga sustava (energetskog izvora) za proizvodnju električne struje korištenjem otpadne toplinske energije
P_{eff}	kW	snaga inovativnih tehnologija
P_{ME}	kW	snaga motora pri 75% MCR_{ME}
P_{PTI}	kW	snaga vratilnog motora
P_{PTO}	kW	snaga vratilnog generatora
SFC_{AE}	g/kWh	specifična potrošnja goriva pomoćnog stroja
SFC_{ME}	g/kWh	specifična potrošnja goriva glavnog stroja
V_{Ref}	m/s	referentna brzina broda
X	%	redukcijski faktor
α	-	eksponent za izračun korekcijskog faktora f_j
β	-	eksponent za izračun korekcijskog faktora f_j
γ	-	eksponent za izračun korekcijskog faktora f_j
δ	-	eksponent za izračun korekcijskog faktora f_j
Δ	t	istisnina broda

ρ_w	kg/m^3	gustoća morske vode
∇	m^3	volumen uronjene forme broda

SAŽETAK

Ekološka osviještenost na globalnoj razini trenutno prolazi kroz uzlaznu putanju, društvo je svjesno onečišćenja okoliša i teži promicanju životnih vještina s ciljem reduciranja štetnih i otpadnih tvari. Brodska industrija kao važna karika transportnog sustava predstavlja veliki izvor štetnih stakleničkih plinova te je upravo zato u potrazi za novim, ekološki prihvatljivijim rješenjima. Shodno tome, Međunarodna pomorska organizacija je 2013. godine ograničila emisiju CO₂ svakog pojedinačnog broda i uvela fizikalnu veličinu projektnog indeksa energetske učinkovitosti čija je vrijednost ograničena zahtijevanim indeksom energetske učinkovitosti. U ovom radu analizirana je emisija ugljikovog dioksida jednog ro-ro putničkog broda u vlasništvu Jadrolinije namijenjenog za plovidbu u priobalnom području. Provedena je usporedba projektne i operativne vrijednosti indeksa energetske učinkovitosti sa zahtijevanom te je također izračunata ukupna dnevna emisija ugljikovog dioksida za zadani brod.

Ključne riječi: projektni indeks energetske učinkovitosti, EEDI, ro-ro putnički brod, staklenički plinovi.

SUMMARY

Environmental awareness at the global level is currently going through an upgoing trajectory, society is conscious of environmental pollution and strives to promote life skills with the aim of reducing harmful waste products. Ship industry as an important part of transport system, is a major source of harmful greenhouse gasses and is therefore looking for new, eco-friendly solutions. Consequently, in 2013, the International Maritime Organization limited the CO₂ emissions of each individual ship and introduced the Energy Efficiency Design Index (EEDI) and its maximum value determined by the required EEDI. In this thesis, the carbon dioxide emission of a ro-ro passenger ship owned by Jadrolinija intended for navigation in the coastal area is analyzed. The design and operational values of the energy efficiency index were compared with the required ones and also, the total carbon dioxide emission of the considered ship was calculated.

Key words: Energy Efficiency Design Index, EEDI, ro-ro passenger ship, greenhouse gases

1. UVOD

Pomorski promet, danas se smatra najisplativijim načinom prijevoza robe i putnika te energetski najprihvatljivijim. Unatoč tome, u 2007. godini je procijenjeno da pomorski promet generira čak 3,3% globalne emisije ugljikovog dioksida, što bi odgovaralo 1,050 milijuna tona CO₂ u samo jednoj godini [1]. Procjene emisije ugljikovog dioksida određuju se na temelju podataka o godišnjoj potrošnji goriva, gdje otprilike 10% otpada na putničke brodove i ro-ro putničke brodove. Onečišćenje uzrokovano ovim tipovima brodova predstavlja veliki problem i opasnost zato što se brodovi kroz duži period zadržavaju u luci te je njihova ruta plovidbe također u neposrednoj blizini samih luka [2]. U sljedećoj tablici uspoređene su vrijednosti godišnje emisije CO₂ za neke vrste brodova.

Tablica 1 Emisija CO₂ različitih vrsta brodova

Vrsta broda	Predviđena emisija CO ₂ [milijuna t/god]	Udio u ukupnoj emisiji flote [%]
Putnički	21,31	1,91
Ro-Ro za prijevoz vozila	27,42	2,46
Ro-Ro za prijevoz tereta na kotačima	18,25	1,63
Ro-Pax	81,84	7,32
Ukupno	148,82	13,31

Kroz protekle godine, znanost i tehnologija bitno su napredovali te su sa energetskeg gledišta brodovi danas puno učinkovitiji nego što su bili prije dvadesetak godina, no bez obzira na spomenuti napredak, brodska industrija i dalje ima vrlo visoki stupanj onečišćenja prirode ispuštanjem štetnih plinova u okoliš. Do 2011. godine količina emisije štetnih plinova bila je ograničena Međunarodnom konvencijom o sprječavanju onečišćenja s brodova (eng. *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL*), kada je na 62. sjednici Odbora za zaštitu pomorskog okoliša (eng. *Marine Environment Protection*

Committee, MEPC) pri Međunarodnoj pomorskoj organizaciji (IMO) usvojena rezolucija kojom se donose izmjene MARPOL-a, Prilog IV: Sprječavanje onečišćenja zraka s brodova, a koje se odnose na dodavanje poglavlja 4: Pravila za energetska učinkovitost brodova [3]. Tom izmjenom propisana je obavezna primjena projektnog indeksa energetske učinkovitosti (eng. *Energy Efficiency Design Indeks*, EEDI) i broskog plana upravljanja energetska učinkovitošću (eng. *Ship Energy Efficiency Management Plan*, SEEMP). Zahtjeva se da projektna veličina EEDI-a bude ispod referentne krivulje, odnosno da postignuti EEDI bude manji od zahtijevanog.

U ovom radu provedena je usporedba projektnog i operativnog indeksa energetske učinkovitosti za brod Petar Hektorović, prikazanog na Slici 1, kao predstavnika tipa ro-ro putničkih brodova u vlasništvu Jadrolinije koji plovi na liniji Split-Vis, koristeći pritom informacije sa stranice MarineTraffic [4]. Brod Petar Hektorović ima kapacitet 140 osobnih automobila i 1080 putnika.



Slika 1 Brod Petar Hektorović [4]

Pojam Ro-Ro broda definiran je 1995. godine amandmanima u poglavlju II-1 Međunarodne konvencije o zaštiti ljudskih života na moru [5] kao putnički brod s ro-ro teretnim prostorom. Osnovna značajka ro-ro broda (eng. roll-on, roll-off: dokotrljati, otkotrljati) je ukrcaj i iskrcaj

tereta na kotačima, koristeći pritom krmene, pramčane ili bočne rampe koje su prepoznatljiva karakteristika ove vrste brodova. Na ovaj način prevozi se veliki asortiman tereta koji može biti na vlastitim kotačima kao što su osobni automobili, prikolice, vagoni i kamioni, ili bez vlastitih kotača kao na primjer kontejneri koji se ukrcavaju i iskrcavaju vozilima za utovar odnosno istovar.

Ro-ro brodovi nisu strogo kategorizirani u određene razrede i danas su primjenjivi u svim veličinama, od malih trajekata do velikih brodova za prijevoz automobila kapaciteta i do 42.000 tona. Moguće je izdvojiti posebne skupine ro-ro brodova:

- ConRo brod služi za prijevoz kombiniranog tereta, kontejnera i ro-ro tereta,
- Car carrier su brodovi najčešće većih kapaciteta i prevoze isključivo osobne automobile, primjer ovakvog broda je prikazan je na Slici 2,
- RoPax je brod koji osim ro-ro tereta može prevoziti i putnike, tradicionalno nazvan trajektom.



Slika 2 Najveći brod za prijevoz automobila M/V Tønsberg [6]

2. REGULATORNI OKVIR U PODRUČJU ENERGETSKE UČINKOVITOSTI BRODOVA

2.1. Izmjena MARPOL-a

Donedavno je glavna preokupacija MEPC-a bio upravo EEDI kao mjera kojom bi se regulirala energetska učinkovitost i emisija CO₂, a izražava se kao emisija CO₂ po prevezenoj toni i milji. U svrhu pronalaska novih tehnoloških rješenja s ciljem povećanja energetske učinkovitosti, unaprjeđenja zaštite okoliša te smanjenja potrošnje goriva, IMO donosi rezoluciju MEPC.203(62) [3] kojom je uvedena izmjena MARPOL-a, Prilog VI. Izmjenama je uvedena obavezna primjena Pravila za utvrđivanje i kontrolu energetske učinkovitosti broda [7], prema kojem je neophodno izračunati i zadovoljiti EEDI te implementirati SEEMP. Po ispunjenju ovih zahtjeva, brodu se dodjeljuje Međunarodni certifikat energetske učinkovitosti (eng. *International Energy Efficiency Certificate*, IEEC) koji je obavezan je za sve brodove čiji je kapacitet veći od 400 GT i sudjeluju u međunarodnoj plovidbi. [3]

Rezolucijom MEPC.203(62) [3] određeno je:

1. Usvajaju se izmjene priloga VI,
2. Definirano je da se izmjene prihvaćaju 1. srpnja 2012. ako se do tada ne podnese prigovor,
3. Pozivaju se svi relevantni administrativni organi da imaju na umu da izmjene stupaju na snagu 1. siječnja 2013. po prihvaćanju,
4. Zahtjeva se da tajnik distribuira rezolucije svim članicama,
5. Pozivaju se sve članice da obavijeste brodovlasnike, kapetane, brodogradilišta, projektne urede, proizvođače brodskih motora, brodske opreme i druge zainteresirane stranke o promjenama MARPOL-a Priloga VI.

Ostale značajne rezolucije MEPC-a

- MEPC.213(63) [8]: Upute za osnivanje SEEMP-a,
- MEPC.214(63) [9]: Upute za nadzor i certificiranje EEDI-a,
- MEPC.215(63) [10]: Upute za izračun referentne krivulje EEDI-a,
- MEPC.245(66) [7]: Upute za izračun postignutog EEDI-a.

2.2. Pravno administrativni okvir

U sklopu rezolucije MEPC.203(62) [3] koja se odnosi na izmjene i dopune MARPOL priloga VI, navedeni su neki propisi nužni za shvaćanje i primjenu izmjena potrebnih za proračun EEDI-a.

2.2.1. Definicije –Pravilo 2

- Postojeći brod je svaki brod koji nije novi brod
- Novi brod odnosi se na:
 - Brod za kojeg je ugovor o gradnji potpisan nakon 1. siječnja 2013. god, ili
 - Brod kojem je (u slučaju gubitka ugovora o gradnji) kobilica polegnuta nakon 1. srpnja 2013., ili
 - Brod koji je isporučen 1. siječnja 2015. ili kasnije.
- Značajne preinake odnose se na one koje:
 - Znatno mijenjaju dimenzije, kapacitet, ili snagu motora broda,
 - Mijenjaju tip i namjenu broda,
 - Po mišljenju administracije znatno produljuju životni vijek broda,
 - Dovoljno izmjenjuju brod, da kad bi bio novi, ušao bi u okvir trenutno važećih odredbi,
 - Dovoljno mijenjaju energetska učinkovitost broda da EEDI može prekoračiti zahtijevanu vrijednost.
- „Ro-ro putnički brod“ je putnički brod sa prostorom za ro-ro teret
- Postignuti EEDI je ostvareni EEDI broda, izračunat u skladu s Pravilom 20 u sklopu ove Rezolucije
- Zahtijevani EEDI je najveća vrijednost EEDI-a koju prema Propisu 21, brod određenog tipa i dimenzija smije postići

2.2.2. Trajanje i valjanost certifikata – Pravilo 9

IIEC valjan je za cijelog životnog vijeka broda osim ako se brod ne povuče iz službe, ako je izdan novi certifikat uslijed većih preinaka na brodu, ili je zamijenjena zastava pod kojom brod plovi.

2.2.3. Postignuti EEDI (eng. Attained EEDI) – Pravilo 20

Postignuti EEDI potrebno je izračunati za:

- Svaki novi brod;
- Svaki novi brod koji je pretrpio značajne preinake;
- Svaki novi ili postojeći brod koji je pretrpio značajne preinake, koje su do te mjere opsežne da Administracija brod može smatrati novo projektiranim.

Tipovi brodova obuhvaćeni Pravilom 20:

- brod za rasuti teret,
- brod za ukapljene plinove,
- tanker,
- kontejnerski brod,
- brod za opći teret,
- brod za rashlađeni teret,
- brod za mješoviti teret,
- putnički brod,
- ro-ro brod,
- ro-pax brod.

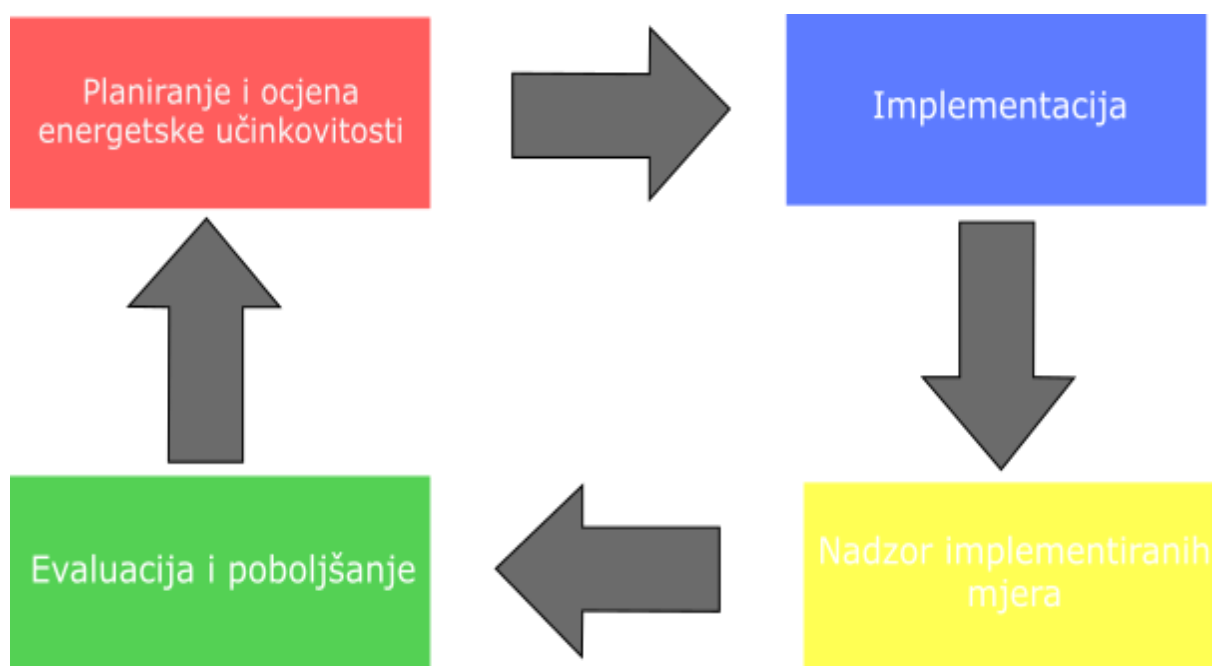
2.2.4. Zahtijevani EEDI (eng. Required EEDI) – Pravilo 21

Zahtijevani projektni indeks energetske učinkovitosti potrebno je izračunati za iste slučajeve kao što je definirano u točki 2.2.3.

2.2.5. SEEMP – Pravilo 25

Svaki brod kapaciteta većeg od 400 GT obavezan je na brodu imati SEEMP, izrađenog po smjernicama koje je izdao IMO [8]. SEEMP je neophodan uz EEDI za stjecanje IECC-a, stoga čini značajnu komponentu u kontroli emisije ugljikovog dioksida. SEEMP osigurava strukturirani pristup nadziranju i unaprjeđenju brodske učinkovitosti te potiče brodovlasnika na razmatranje primjene novih tehnologija u pojedinom koraku plana s ciljem optimizacije performansi broda [11]. Na Slici 3 ilustrirana je struktura SEEMP-a

SEEMP omogućava formiranje mehanizma za poboljšanje energetske učinkovitosti broda na ekonomički najprihvatljiviji način, a brodarskim kompanijama pruža uvid u upravljanje energetskom učinkovitošću preko pokazatelja operativne energetske učinkovitosti (eng. *Energy efficiency operational indicator*, EEOI) [11]. Važnost SEEMP-a leži u pravilnoj primjeni kako bi se minimalizirala emisija štetnih plinova i provođenju unaprijed zacrtanog smanjenja EEDI-a kroz nadolazeće godine kako je IMO propisao.



Slika 3 **Struktura SEEMP-a**

Planiranje, odnosno prva faza je od esencijalne važnosti u cjelokupnoj strukturi SEEMP-a, u kojoj se analizira trenutno stanje upravljanja energetskom učinkovitošću na brodu i moguća poboljšanja. Za provedbu ove faze ključno je osigurati dovoljno vremena. Operativne mjere koje neposredno utječu na učinkovitost potrošnje goriva nije moguće preslikavati s jednog broda na drugi, nego se zahtjeva individualan pristup problemu. Kod uvođenja mjera potrebno je voditi računa o preostalim komponentama koje sudjeluju u transportnom sustavu, posebice ne pretjerivati s opterećenjem posade.

Nakon jasno dovršene prve faze, slijedi implementacija koja podrazumijeva realizaciju prethodno iznesenih mjera, detaljan opis načina njene provedbe, praćenje potrebnog vremena

implementacije i čuvanje zapisa vezanih za pojedine mjere. Sljedeća faza uključuje nadzor i praćenje implementiranih mjera u kvantitativnom smislu. Za ispravno provođenje nadzora potrebno je podatke prikupljati konzistentno i nastojati organizirati praćenje s kopna. Faza vrednovanja i poboljšanja može se već početi provoditi i paralelno s nadzorom, a potrebna je radi osiguranja povratnih informacija zbog početka planiranja sljedećeg ciklusa.

Sustav SEEMP-a je iterativan što znači da se po završetku posljednje faze ponovno kreće na planiranje daljnjeg unaprjeđenja sustava i na taj način se kontinuirano provodi cjelokupni postupak.

3. PROJEKTNI I OPERATIVNI INDEKS ENERGETSKE UČINKOVITOSTI

EEDI je vrlo značajna mjera energetske učinkovitosti čiju se definiciju može formulirati kao omjer ukupne emisije ugljikovog dioksida i gospodarskog učina (društvene koristi) koji brod obavi. Potreba za uvođenjem EEDI-a proizlazi iz tendencije za unaprjeđenjem energetskog sustava odnosno povećanjem njegove učinkovitosti, što je popraćeno manjim gubitkom energije a time i manjom količinom dimnih plinova koje uključuju štetne i stakleničke plinove, drugim riječima teži se stvaranju ekološki prihvatljivijeg sustava.

3.1. Smjernice za proračun zahtijevanog EEDI-a

U Pravilu 21 definirano je kako je za svaki novi brod ili stari brod s provedenim značajnim preinakama kapaciteta preko 400 GT potrebno odrediti zahtijevani EEDI [3]. Zahtijevani projektni indeks energetske učinkovitosti definiran je krivuljom čija funkcija ovisi o tipu broda i njegovom kapacitetu, a izračunava se prema izrazu:

$$\text{Zahtijevani EEDI} = (1 - X) \cdot \text{Referentni EEDI} \quad (1)$$

$$\text{Referentni EEDI} = a \cdot \text{DWT}^{-c} \quad (2)$$

Gdje su :

X - redukcijski faktor

DWT - kapacitet broda izražen u tonama

a, c - koeficijenti dani u Tablici 2 za različite tipove brodova

Tablica 2 Vrijednosti parametara a i c za dane vrste brodova

Vrsta broda	a	c
Tankeri	1218,8	0,488
Brodovi za rasuti teret	961,79	0,477
Kontejnerski brodovi	174,22	0,201
Ro-ro putnički brodovi	752,16	0,381

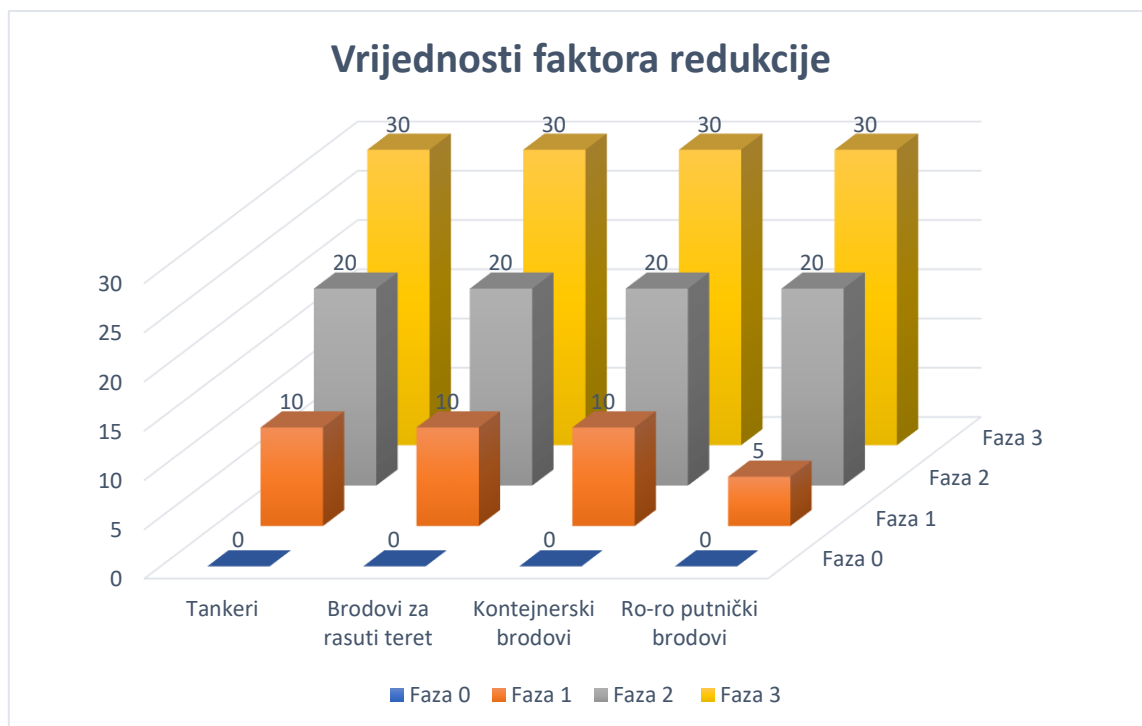
Vrijednost redukcijskog faktora X definirao je IMO tako da se ona mijenja kroz četiri faze (uključujući nultu fazu) u određenim vremenskim razdobljima [10], a označava postotak, koliko je zahtijevani EEDI manji u odnosu na referentni. U Tablici 3 može se pratiti povećanje redukcijskog faktora s odmakom vremena što doprinosi povećanju energetske učinkovitosti.

Tablica 3 Redukcijski faktor po fazama za dane vrste brodova

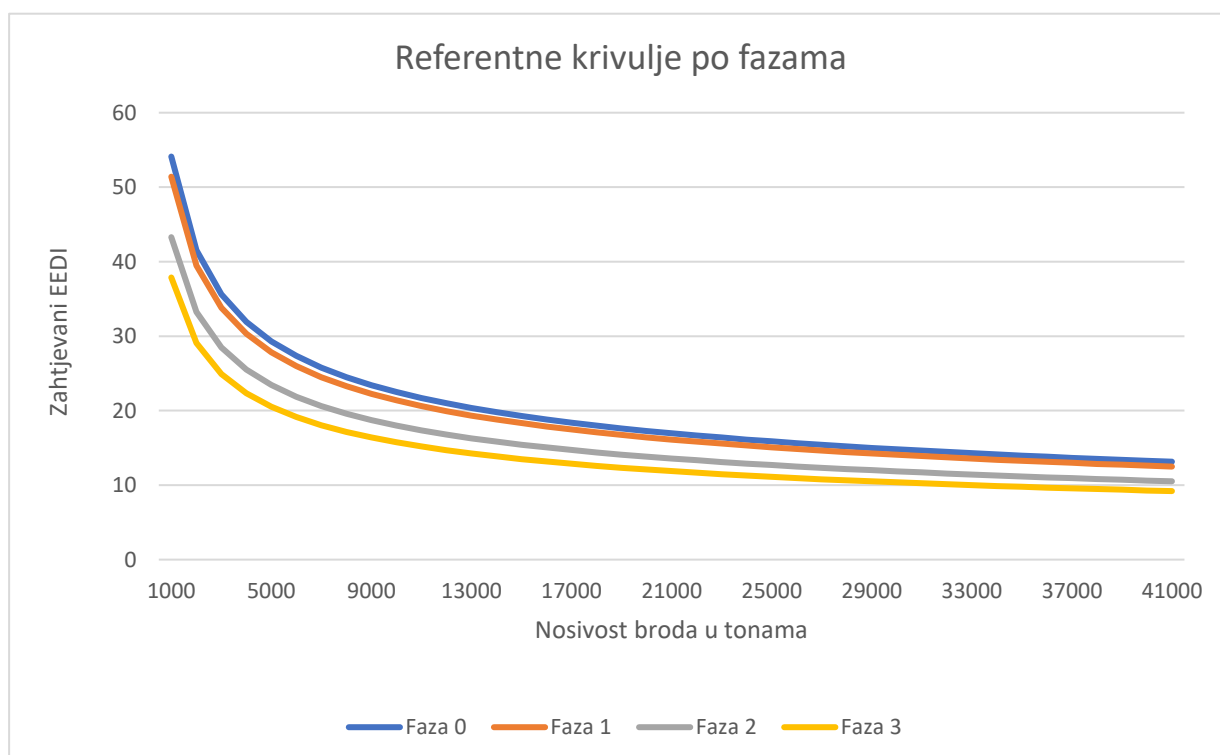
Vrsta broda	Faza 0	Faza 1	Faza 2	Faza 3
	2013-2014	2015-2019	2020-2024	2025-
Tankeri	0	10	20	30
Brodovi za rasuti teret	0	10	20	30
Kontejnerski brodovi	0	10	20	30
Ro-ro putnički brodovi	0	5	20	30

Ukoliko se brod može svrstati u više skupina od gore navedenih, onda je potrebno proračun provesti za najnepovoljniji slučaj odnosno podacima koji daju manji zahtijevani EEDI.

Na Slici 4 vizualno je prikazan porast redukcijskog faktora kroz 4 faze za određene vrste brodova.



Slika 4 Prikaz promjene redukcijuskog faktora u vremenu za dane vrste brodova



Slika 5 Referentne krivulje za ro-ro putnički brod u pojedinim fazama

Na prethodnom grafu prikazana je ovisnost zahtijevanog EEDI-a za ro-ro putnički brod u ovisnosti o njegovoj nosivosti za sve 4 faze. U analizi ovog rada obrađene su plovidbe u periodu od mjesec dana za tekuću, 2020. godinu te je potrebno uzeti u obzir redukcijски faktor u Fazi 2 ($X = 20\%$). Postignuti EEDI se dakle, u grafu mora nalaziti ispod referentne linije u određenoj fazi.

$$\text{Postignuti EEDI} \leq \text{Zahtjevani EEDI} = (1 - X) \cdot \text{Referentna vrijednost EEDI} \quad (3)$$

3.2. Smjernice za proračun postignutog EEDI-a

Radi boljeg razumijevanja same formule za izračun postignutog EEDI-a, korisno je napraviti pregled prijašnjih rješenja za izračun emisije CO₂. Postupno se formulirao izraz energetske učinkovitosti nastojeći pritom izraziti iznos zagađenja okoliša u odnosu na odrađeni gospodarski učin.

Prvu gotovu formulaciju MEPC-u su predstavili članovi japanske radne grupe *Working Group on Greenhouse Gas Emissions from Ships*, definirali su je kao CO₂ emisijski indeks:

$$\text{Postignuti projektni CO}_2 \text{ indeks} = \frac{C_F \cdot SFC \cdot P}{\text{Kapacitet} \cdot V_{ref}} \quad (4)$$

S druge strane, Danci su detaljnije ušli u problematiku i opsežnije definirali postignuti CO₂ indeks na način da su količinu emitiranog ugljikovog dioksida podijelili u dva segmenta; prvi se odnosi na iznos koji emitira stroj porivnog sustava broda, a drugi na pomoćne strojeve.

$$\text{Postignuti projektni CO}_2 \text{ indeks} = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) \sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} \cdot SFC_{MEi} \cdot P_{MEi} + \prod_{k=1}^L f_k \sum_{i=1}^{NME} C_{FAEi} \cdot SFC_{FAEi} \cdot P_{AEi}}{\text{Kapacitet} \cdot V_{ref}} \quad (5)$$

Usporedbom navedenih izraza, MEPC odlučuje uvesti novu formulaciju za proračun CO₂ indeksa koji se bazira na danskom prijedlogu uz dodatak korekcijskog faktora f_w koji se odnosi na vremenske uvjete.

$$\text{Projektni CO}_2 \text{ indeks novog broda} = \frac{(\prod_{j=1}^M f_j) (\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} \cdot SFC_{FMEi} \cdot P_{MEi})}{\text{Kapacitet} \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \frac{(\prod_{j=1}^L f_j) (\sum_{i=1}^{NAE} C_{FAEi} \cdot SFC_{FAEi} \cdot P_{AEi})}{\text{Kapacitet} \cdot V_{ref} \cdot f_w} \quad (6)$$

Gornjem izrazu je naknadno dodan utjecaj inovativnih, energetskih efikasnih tehnologija pa se dobiva:

$$\begin{aligned} \text{Projektni } CO_2 \text{ indeks novog broda} = & \frac{(\prod_{j=1}^M f_j)(\sum_{i=1}^{NME} C_{FMEi} \cdot SFC_{FMEi} \cdot P_{MEi})}{\text{Kapacitet} \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \\ & \frac{(\prod_{j=1}^L f_j)(\sum_{i=1}^{NAE} C_{FAEi} \cdot SFC_{FAEi} \cdot P_{AEi}) - (\sum_{eff=1}^{Neff} f_{eff} \cdot C_{FAEi} \cdot SFC_{FAEi} \cdot P_{AEi})}{\text{Kapacitet} \cdot V_{ref} \cdot f_w} \end{aligned} \quad (7)$$

U konačnici se CO_2 emisijski indeks preimenovao u EEDI. Uvedena je modifikacija dodavanja odnosno oduzimanja snage na vratilu, tehnologije utilizacije otpadne topline te je dodan korekcijski faktor f_i radi posebnih konstrukcijskih značajki pojedinih brodova. Izraz koji slijedi definiran je u rezoluciji MEPC-a (MEPC.245(66)) iz 2014. godine.

$$\begin{aligned} EEDI = & \frac{(\prod_{j=1}^n f_j)(\sum_{i=1}^{nME} C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \cdot P_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Kapacitet} \cdot V_{ref} \cdot f_w} + \\ & \frac{(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Kapacitet} \cdot V_{ref} \cdot f_w} - \\ & \frac{\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot \text{Kapacitet} \cdot V_{ref} \cdot f_w} \end{aligned} \quad (8)$$

Gdje su:

- P_{ME} - snaga pogonskog stroja koja odgovara 75% MCR (maksimalne trajne snage) instaliranih glavnih motora nakon oduzimanja snage vratilnih generatora [kW]
- P_{AE} - snaga pomoćnih motora potrebna isključivo za podmirenje energetskih potreba sustava propulzije i potrebe smještaja pri normalnom stanju plovidbe, a računaju se prema izrazu:

1. Za brodove s ukupnom snagom propulzije većom od 10000 kW:

$$\cdot P_{AE} = \left(0,025 \cdot \left(\sum_{i=1}^{nME} MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PT(i)}}{0,75} + 250 \right) \right) \quad (9)$$

2. Za brodove s ukupnom snagom propulzije manjom od 10000 kW:

$$\cdot P_{AE} = \left(0,05 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} \cdot MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{PTI}} \cdot P_{PT(i)}}{0,75} \right) \right) \quad (10)$$

P_{PTI} - iznosi 75 % nominalne snage instaliranog vratilnog motora podijeljenog s prosječnim stupnjem djelovanja dizel-električnih agregata [kW],

P_{AEeff} - smanjenje snage pomoćnih motora zbog inovativnih električnih energetske učinkovite tehnologije za proizvodnju električne energije [kW],

P_{eff} - doprinos inovativnih, energetske učinkovite, mehaničkih tehnologija pri 75 % MCR glavnog motora [kW],

Kapacitet - za putničke brodove odgovara iznosu bruto tonaže,

SFC - specifična potrošnja goriva [g/kWh],

C_F - bezdimenzijski koeficijent pretvorbe goriva u CO₂,

Tablica 4 Vrijednosti koeficijenta C_F za različite vrste goriva

Tip goriva	Sadržaj ugljika	C_F (t CO ₂ /t goriva)
Dizel gorivo	0,8744	3,06
Lako gorivo	0,8594	3,151
Teško gorivo	0,8493	3,114
LPG - propan	0,8182	3,000
LPG - butan	0,8264	3,030
LNG	0,7500	2,750
Metanol	0,3750	1,375
Etanol	0,5217	1,913

f_j - bezdimenzijski korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda, koji se za ro-ro putničke brodove izračunava prema izrazu:

$$f_{jRo-Ro} = \frac{1}{F_{nL}^{\alpha} \cdot \left(\frac{L_{pp}}{B_s}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{B_s}{d_s}\right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{L_{pp}}{\nabla^{1/3}}\right)^{\delta}} \quad (11)$$

$$\text{ako je } f_{jRo-Ro} > 1, \text{ uzima se } f_{jRo-Ro} = 1 \quad (12)$$

gdje su:

F_{nL} - Froudeov broj definiran izrazom:

$$F_{nL} = \frac{0,5144 \cdot V_{ref}}{\sqrt{L_{pp} \cdot g}} \quad (13)$$

L_{pp} - duljina broda između okomica

B_s - širina broda

d_s - gaz broda

g - akceleracija sile teže

∇ - volumen podvodne morske forme

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho_w}$$

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - eksponenti dani u Tablici 5 za pojedinu vrstu broda:

Tablica 5 Vrijednosti eksponenata $\alpha, \beta, \gamma, i \delta$

Vrsta broda	Eksponent			
	α	β	γ	δ
Ro-ro teretni brod	2,00	0,50	0,75	1,00
Ro-ro putnički brod	2,50	0,75	0,75	1,00

f_w - bezdimenzijski koeficijent koji ukazuje na smanjenje brzine pri stanju mora koji uključuje valnu visinu, frekvenciju vala i brzinu vjetra, prema propisu 20 i 21, MARPOL Annex VI; $f_w = 1$

f_i - bezdimenzijski faktor smanjene nosivosti, za ro-ro putničke brodove jednak je: $f_i = 1$

f_c - bezdimenzijski faktor smanjene zapremine koji se u slučaju da je odnos kapaciteta broda i bruto tonaže manja od 0,25 računa prema izrazu:

$$\text{Ako je } DWT/GT < 0,25 \rightarrow f_{cRo-Pax} = \left(\frac{DWT/GT}{0,25} \right)^{-0,8} \quad (14)$$

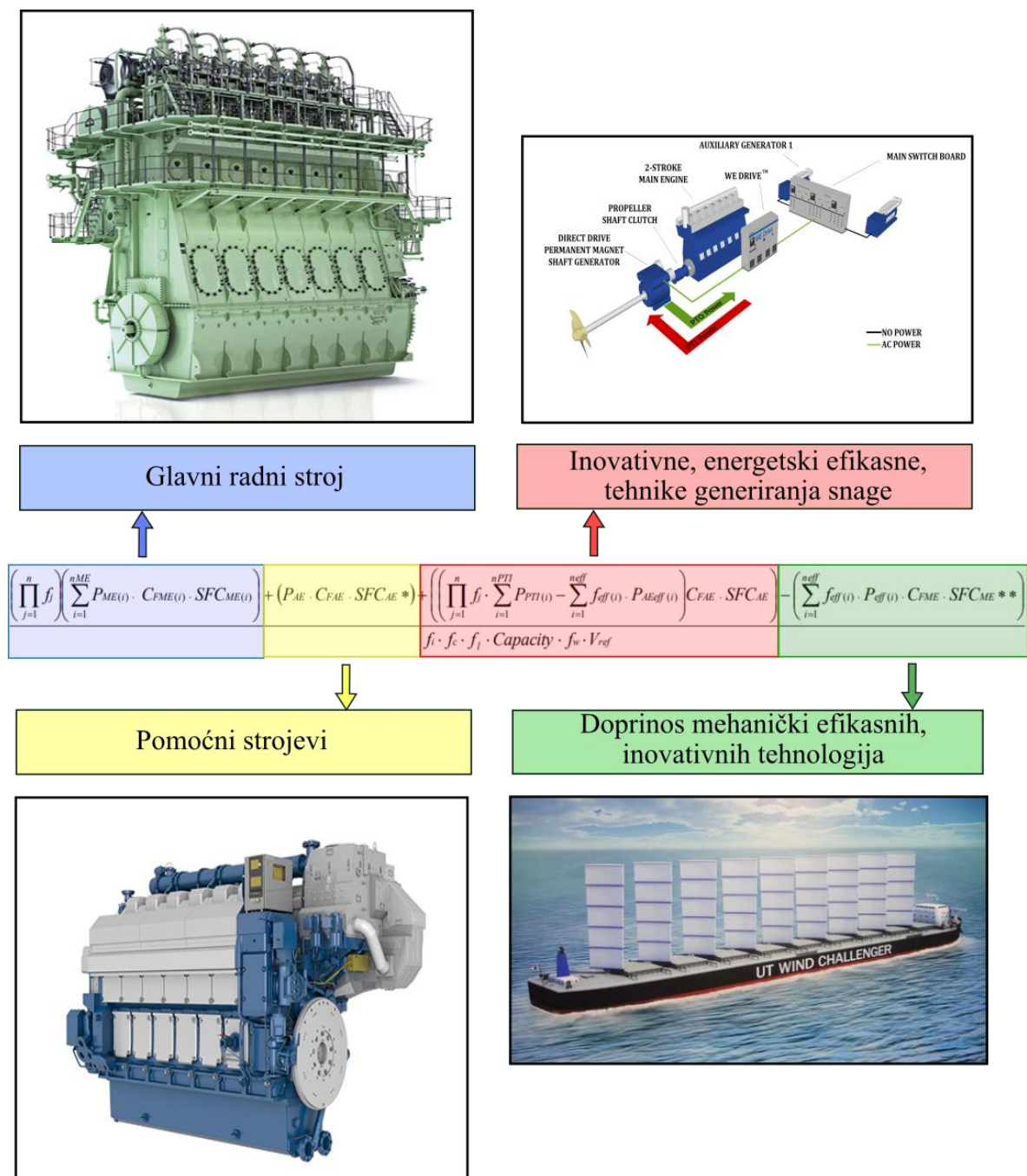
$$\text{Ako je } DWT/GT > 0,25 \rightarrow f_{cRo-Pax} = 1 \quad (15)$$

f_{eff} - bezdimenzijski faktor dostupnosti inovativnih energetski efikasnih tehnologija

V_{ref} - brzina koja se pri P_{ME} može postići pri punoj nosivosti [čv].

Indeks ME(i) odnosi se na glavni porivni stroj, a indeks AE(i) na pomoćne strojeve. Ova formulacija izraza za izračun EEDI-a, ne može se primijeniti na brodove s dizel-električnom, turbinskom propulzijom ili hibridnim propulzijskim sustavom, s iznimkom putničkih brodova i brodova za prijevoz prirodnog ukapljenog plina.

Formulacija za izračun projektnog indeksa energetske učinkovitosti može se raščlaniti na četiri zasebne cjeline od kojih svaka nosi svojevrsan doprinos vrijednosti EEDI-a. Razdioba je prikazana na Slici 6.



Slika 6 Raščlamba izraza za izračun EEDI-a

3.2.1. Vratilni generator – oduzimanje snage na vratilu

U slučaju instalacije vratilnog/ih generatora, $P_{PTO(i)}$ iznosi 75% nazivne električne snage pojedinog generatora. Ukoliko je vratilni generator postavljen na parnu turbinu, taj postotak iznosi 83 %. Za izračun utjecaja vratilnog generatora, na raspolaganju su dvije propisne opcije [7].

3.2.2. Vratilni motor – dodavanje snage na vratilu

U slučaju postavljanja vratilnog motora, $\sum P_{PT(i)}$ iznosi 75% predviđene utrošene snage pojedinom vratilnog motora, podijeljenog s procijenjenom prosječnom korisnosti generatora [7].

3.3. Smjernice za proračun operativnog indeksa energetske učinkovitosti

Postupak za izračunavanje postignutog operativnog indeksa energetske učinkovitosti provodi se na isti način kao i za postignuti EEDI uz izmjenu referentne brzine koju je potrebno odrediti na temelju baze podataka o plovidbi broda. Potrebno je pronaći srednju vrijednost prikupljenih podataka i definirati srednju operativnu brzinu koja će uz pretpostavku biti manja od projektne brzine V_{ref} . Vrijednost EEDI-a obrnuto je proporcionalna referentnoj brzini te će smanjenje brzine imati za posljedicu povećanje EEDI-a. Promjena brzine neposredno će utjecati na još neke članove u i izrazu za izračun EEDI-a, što je objašnjeno u 5.5.

4. IZDAVANJE MEĐUNARODNOG CERTIFIKATA ENERGETSKE UČINKOVITOSTI (IEEC)

Nakon što je postignuti EEDI izračunat u skladu s Pravilom 20, MARPOL Annex VI [3], potrebno je izdati IEEC. Postupak pregleda i ovjere IEEC-a provodi se kroz dvije faze:

1. Preliminarna verifikacija u projektnoj fazi,
2. Konačna verifikacija na pokusnoj plovidbi.

4.1. Preliminarna verifikacija

Za preliminarnu verifikaciju u projektnoj fazi, podnositelj zahtjeva za izdavanje IEEC-a dužan je dostaviti EEDI tehnički dokument koji sadržava sve informacije potrebne za certificiranje [9]. EEDI tehnički dokument mora biti napisan barem na engleskom jeziku i treba sadržavati sljedeće:

1. Nosivost broda ili bruto tonaža, maksimalna trajna snaga glavnog i pomoćnih strojeva, brzina broda, tip goriva, specifična potrošnja goriva glavnog stroja (pri 75% MCR) i pomoćnih strojeva (pri 50% MCR), tablice potrošnje električne energije,
2. Krivulju snage porivnog motora procijenjenu u projektnoj fazi i brzine i brzine broda za najveće stanje krcanja,
3. Osnovne dimenzije, tip broda, relevantne informacije za klasifikaciju, pregled propulzijskog sustava i sustava proizvodnje električne struje,
4. Tok snage u projektnoj fazi,
5. Opis opreme za uštedu energije,
6. Izračunatu vrijednost postignutog EEDI-a skupa s opisom proračuna,
7. Izračunati vrijednost postignutog vrijednost $EEDI_{\text{weather}}$ uzimajući u obzir koeficijent f_w koji je različit od jedinice.

Krivulje snage koje se prilažu u dokumentaciji u ovoj fazi, trebaju se bazirati na pouzdanim rezultatima modelskih ispitivanja. Osim navedenih podataka koje je potrebno priložiti u EEDI tehničkom dokumentu, verifikator ima pravo od podnositelja zahtjeva zatražiti sljedeće podatke:

1. Opis modelskog ispitivanja, ime institucije, dimenzije bazena za ispitivanje, izvještaj modelskih ispitivanja,
2. Nacrte rebara modela i stvarnog broda radi potvrde prihvatljivosti modelskog ispitivanja,
3. Masa lakog broda i tablica istisnina z potvrdu nosivosti,
4. Detaljan izvještaj metode i rezultata modelskog ispitivanja,
5. Detaljan postupak izračuna brzine broda,
6. Razlog zašto brod nije podvrgnut modelskom ispitivanju.

Nakon što je postignuti EEDI zadovoljio kriterije u fazi projektiranja, verifikator izdaje izvješće o preliminarnoj verifikaciji EEDI-a.

4.2. Konačna verifikacija

Pokusna plovidba bi se ako je moguće trebala izvoditi u dubokom moru, bez valova i bez vjetra. Gaz i trim potrebno je potvrditi mjerenjima, prethodno pokusnoj plovidbi i njihov iznos bi poželjno trebao biti što sličniji onom iznosu koji je pretpostavljen prilikom procjene krivulje snage porivnog stroja [9]. Prije same pokusne plovidbe, verifikatoru je potrebno dostaviti:

1. Opis provedbe pokusne plovidbe,
2. Konačne tablice istisnine i izmjerena masa lakog broda,
3. Kopiju NO_x tehničkog dokumenta.

Potrebno je da verifikator prisustvuje pokusnoj plovidbi kako bi mogao potvrditi sljedeće:

1. Porivni sustav i sustav opskrbe energijom, specifikacije motora,
2. Gaz i trim,
3. Uvjete mora,
4. Brzinu broda,
5. Snagu na vratilu i brzinu vrtnje glavnog stroja.

Obaveza podnositelja zahtjeva je usporediti krivulje snage dobivene kao rezultat pokusne plovidbe s onim procijenjenim u fazi projektiranja. U slučaju odstupanja, postignuti EEDI potrebno je preračunati.

5. ANALIZA EEDI-a

5.1. Podaci o brodu

5.1.1. Opći podaci

Tablica 6 Opći podaci zadanog broda

Ime broda	Petar Hektorović
Brodogradilište	Svendborg Skibsvaerft & Maskinbyggeri – Svendborg, Danska
Vrsta broda	putnički
Tip broda	ro-ro putnički
Klasifikacijsko društvo	Hrvatski Registar Brodova - HRB
Zastava	hrvatska
Godina gradnje	1989

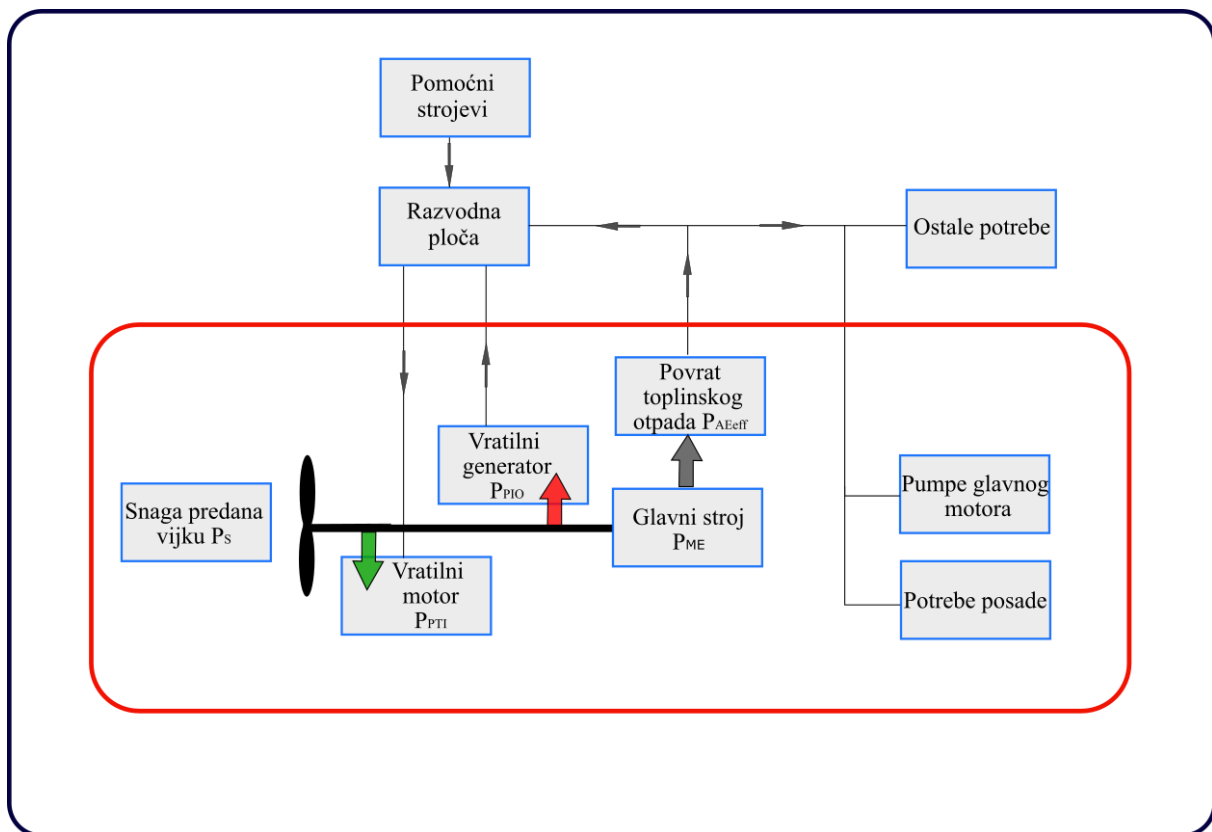
5.1.2. Osnovne dimenzije

Tablica 7 Osnovne dimenzije zadanog broda

Duljina preko svega (m)	91,8
Duljina između okomica (m)	80
Širina broda (m)	18
Visina broda (m)	10,5
Gaz (m)	3,8

5.2. Brodski energetski sustav

Autonomnost broda je jedna njegova vrlo važna karakteristika, što znači da je njegov energetski sustav potpuno samostalan kao cjelina i neovisan, upravo iz tog razloga, potrebno je poznavati sve elemente u tom energetskom sustavu. Uz primarne izvore energije – glavni i pomoćni strojevi, potrebno je uzeti u obzir sve relevantne potrošače i moguće doprinose snaga inovativnim energetski učinkovitim tehnologijama koje u slučaju broda Petar Hektorović nisu instalirane. Na Slici 7 prikazana je generička shema broskog energetskog sustava na kojoj su crvenom bojom zaokruženi svi elementi koji ulaze u proračun EEDI-a.



Slika 7 Shema broskog energetskog sustava

5.3. Izračun zahtijevanog EEDI-a

Tablica 8 Potrebni podaci za izračun zahtijevanog EEDI-a

Parametar	Opis	Iznos	Jedinica
X	Redukcijski faktor	5	%
a	Koeficijenti određeni vrstom broda	752,16	-
c		0,381	-
DWT	Nosivost broda	804	t

$$\text{Zahtijevani EEDI} = (1 - X) \cdot a \cdot DWT^{-c}$$

$$\text{Zahtijevani EEDI} = \left(1 - \frac{5}{100}\right) \cdot 752,16 \cdot 804^{-0,381}$$

$$\text{Zahtijevani EEDI} = \mathbf{55,864 \text{ g/(t} \cdot \text{milja)}}$$

Zahtijevani EEDI ro-ro putničkog broda Petar Hektorović nosivosti od 804 tona iznosi 55,864 g/(t · milja), što označava maksimalnu vrijednost koju postignuti EEDI smije dostići. Svaki prelazak preko navedenog iznosa značio bi da brod ne zadovoljava zahtjevima koje je propisao IMO te nemogućnost dobivanja Međunarodnog certifikata energetske učinkovitosti (IEEC) te samim time nema dopuštenje za plovidbu.

5.4. Izračun postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti

Izračunati postignuti EEDI uspoređuje se sa zahtijevanim kako bi se odredilo zadovoljava li brod postavljene uvjete.

5.4.1. Bezdimenzijski korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda f_j

Korekcijski faktor f_j se izračunava prema (11) i (13) uzevši u obzir sljedeće podatke:

Tablica 9 Podaci potrebni za izračun Froudeovog broja F_{nL}

Parametar	Opis	Iznos	Jedinica
L_{PP}	duljina između okomica	80	m
g	akceleracija sile teže	9,80665	m/s^2
V_{ref}	brzina broda	15	m/s

Froudeov broj je tada jednak:

$$F_{nL} = \frac{0,5144 \cdot V_{ref}}{\sqrt{L_{PP} \cdot g}}$$

$$F_{nL} = \frac{0,5144 \cdot 15}{\sqrt{80 \cdot 9,80665}}$$

$$F_{nL} = 0,2755$$

Tablica 10 Podaci potrebni za izračun korekcijskog faktora f_j

Parametar	Opis	Iznos	Jedinica
F_{nL}	Froudeov broj	0,2755	-
α	EkspONENTI dani u Tablici 5	2,5	-
β		0,75	-
γ		0,75	-
δ		1	-
L_{PP}	Duljina između okomica	80	m
B_S	Širina broda	18	m
d_S	Gaz broda	3,8	m
Δ	Istisnina broda	3636	t

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho_w}$$

$$\nabla = \frac{3636 \cdot 1000}{1025} = 3547 \text{ m}^3$$

$$f_{jRo-Ro} = \frac{1}{F_{nL}^{\alpha} \cdot \left(\frac{L_{pp}}{B_s}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{B_s}{d_s}\right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{L_{pp}}{\nabla^{1/3}}\right)^{\delta}}$$

$$f_{jRo-Ro} = \frac{1}{0,2755^{2,5} \cdot \left(\frac{80}{18}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{18}{3,8}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{80}{3547^{1/3}}\right)^1}$$

$$f_{jRo-Ro} = \mathbf{0,4869}$$

Obzirom da je vrijednost $f_{jRo-Ro} < 1$, uzima se $f_j = \mathbf{0,4869}$

5.4.2. *Bezdimenzijski korekcijski faktor f_c smanjene zapremnine*

$$\frac{DWT}{GT} = \frac{804}{6721} = 0,12$$

Obzirom da je $DWT/GT < 0,25$, korekcijski faktor f_c računa se prema izrazu (14)

$$f_{cRo-Pax} = \left(\frac{DWT/GT}{0,25}\right)^{-0,8}$$

$$f_{cRo-Pax} = \left(\frac{804/6721}{0,25}\right)^{-0,8}$$

$$f_{cRo-Pax} = \mathbf{1,8034}$$

5.4.3. *Snaga pogonskog stroja P_{ME}*

Snaga pogonskog stroja odgovara 75% maksimalne trajne snage glavnog pogonskog stroja:

$$P_{ME} = 0,75 \cdot MCR_{ME}$$

$$P_{ME} = 0,75 \cdot 3600$$

$$P_{ME} = \mathbf{2700 \text{ kW}}$$

5.4.4. *Snaga pomoćnih motora P_{AE}*

S obzirom da ukupna snaga propulzije ne prelazi iznos od 10000 kW, snaga pomoćnih strojeva

P_{AE} računa se prema izrazu (10):

$$P_{AE} = \left(0,05 \cdot \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} \cdot MCR_{ME(i)} + \frac{\sum_{i=1}^{n_{PTI}} \cdot P_{PT(i)}}{0,75} \right) \right)$$

$$P_{AE} = \left(0,05 \cdot \left(3600 + \frac{0}{0,75} \right) \right)$$

$$P_{AE} = 1800 \text{ kW}$$

5.4.5. Postignuti EEDI

Tablica 11 Ulazni podaci za izračun postignutog EEDI-a

Parametar	Opis	Iznos	Jedinica
P_{ME}	Snaga pogonskog stroja koja odgovara 75% MCR	2700	kW
P_{AE}	Snaga pomoćnih motora	1800	kW
P_{PTI}	Dodana snage zbog postavljanja vratilnog motora	-	kW
P_{AEeff}	Oduzeta snaga zbog postavljenog vratilnog generatora	-	kW
P_{eff}	Doprinos inovativnih, energetski učinkovitih, mehaničkih	-	kW
SFC	Specifična potrošnja goriva	215	g/kWh
$Kapacitet$	Bruto tonaža	6721	t
C_F	Koeficijent pretvore goriva prema Tabici 4	3,06	-
f_j	korekcijski faktori	0,4869	-
f_w		1	-
f_i		1	-
f_c		1,8034	-
f_{eff}		-	-
V_{ref}		brzina koja se pri P_{ME} može postići pri punoj snazi	15

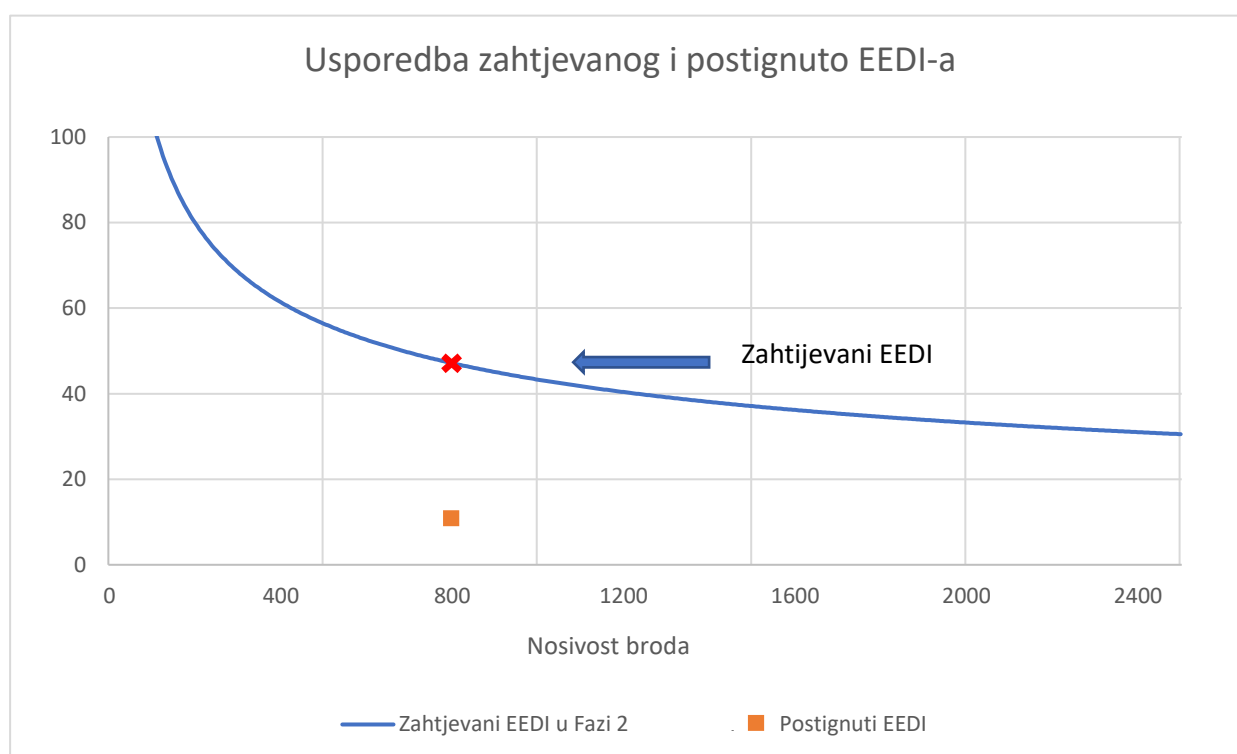
$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j)(\sum_{i=1}^{nME} C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \cdot P_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

$$\frac{(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)}) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

$$- \frac{\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

$$EEDI = \frac{0,4869 \cdot (3,06 \cdot 215 \cdot 2700) + (1800 \cdot 3,06 \cdot 215)}{1 \cdot 1,8034 \cdot 1 \cdot 6721 \cdot 15 \cdot 1} + 0 - 0$$

$$EEDI = 11,271 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{milja})$$



Slika 8 Usporedba postignutog EEDI-a sa zahtjevanim iznosom u prvoj fazi redukcije

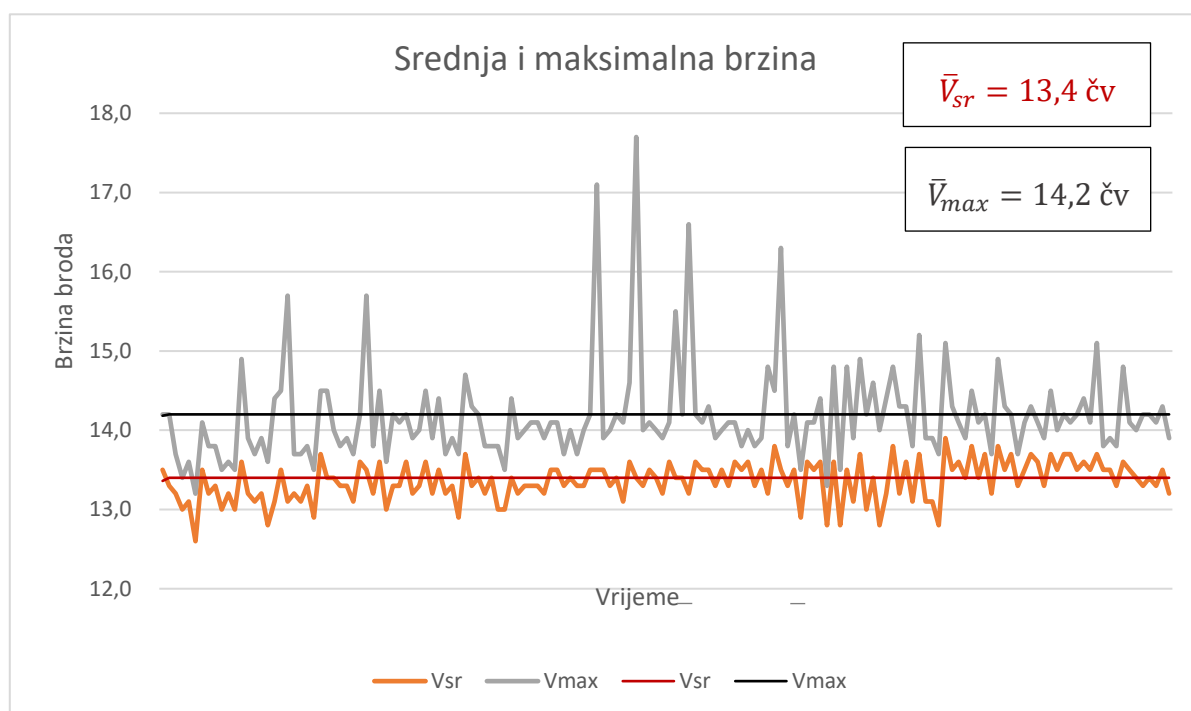
$$Postignuti EEDI < Zahtjevani EEDI$$

Na Slici 8 je vidljivo da se postignuti projektni indeks energetske učinkovitosti nalazi ispod referentne krivulje za prvu fazu redukcije što znači da je postignuta vrijednost manja od zahtjevanog i time je zadovoljen stupanj energetske učinkovitosti promatranog broda.

5.5. Izračun operativnog indeksa energetske učinkovitosti

U proračunu postignutog projektnog indeksa energetske učinkovitosti uvrštava se najveća brzina koja se pri P_{ME} pri punom kapacitetu može postići, no brod u službi će rijetko kad pa čak i nikad postići tu brzinu, stoga nije potpuno relevantna za ovaj proračun. Umjesto uzimanja u obzir navedene brzine broda, kod izračuna operativnog indeksa energetske učinkovitosti usvojit će se prosječna vrijednost srednje brzine broda određena na temelju podataka o plovidbi prikupljenih sa stranice MarineTraffic [13].

Za posljednjih mjesec dana (od 11. kolovoza do 10. rujna 2020.), prikupljeni su podaci srednje brzine broda na svakoj plovidbi i također maksimalne brzine te je pronađena prosječna vrijednost za obje brzine što je i prikazano Slikom 9.



Slika 9 Grafički prikaz brzina broda kroz proteklih mjesec dana

Iz prikupljenih podataka može se uočiti da je od zabilježene 154 plovidbe, na njih 9 izmjerena maksimalna brzina koja je veća od 15 čv ili bar jednaka tom iznosu što je tek 5,84% plovidba, dok dakako ni jedna srednja brzina ne doseže vrijednost od 15 čv.

5.5.1. *Bezdimenzijski korekcijski faktor zbog posebnih konstrukcijskih značajki broda f_j*

Promjena korekcijskog faktora f_j u računu operativnog indeksa energetske učinkovitosti posljedica je uzete nove brzine V_{ref} . Za izračun samog faktora ulazni podaci su prikazani u Tablici 9 i Tablici 10 uz preinaku brzine sa $V_{ref} = 13,4$ čv, koristeći pritom izraze (11) i (13).

$$F_{nL} = \frac{0,5144 \cdot V_{ref}}{\sqrt{L_{pp} \cdot g}}$$

$$F_{nL} = \frac{0,5144 \cdot 13,4}{\sqrt{80 \cdot 9,80665}}$$

$$F_{nL} = \mathbf{0,2461}$$

$$f_{jRo-Pax} = \frac{1}{F_{nL}^\alpha \cdot \left(\frac{L_{pp}}{B_s}\right)^\beta \cdot \left(\frac{B_s}{d_s}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{L_{pp}}{\nabla^{1/3}}\right)^\delta}$$

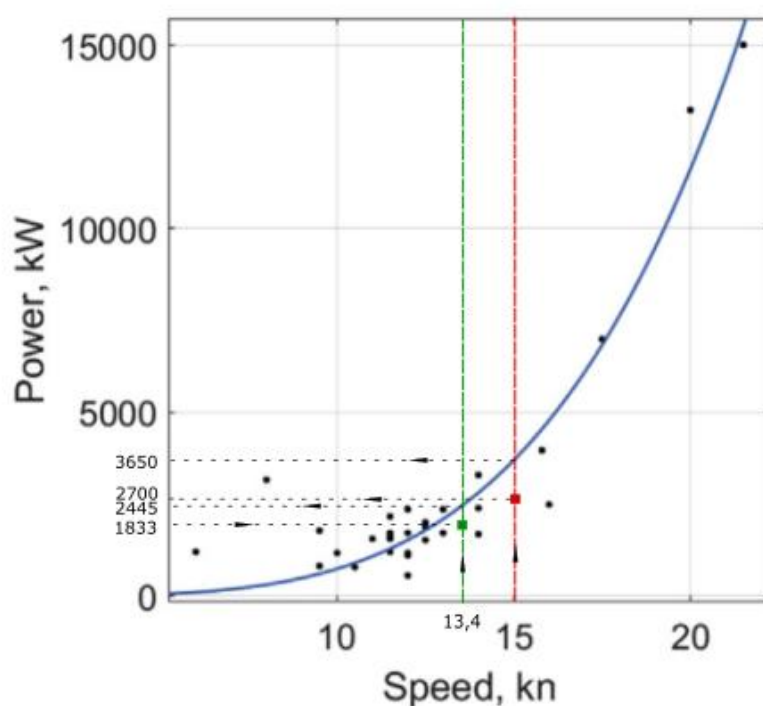
$$f_{jRo-Pax} = \frac{1}{0,2461^{2,5} \cdot \left(\frac{80}{18}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{18}{3,8}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{80}{3547^{1/3}}\right)^1}$$

$$f_{jRo-Pax} = \mathbf{0,6456}$$

Vrijednost korekcijskog faktora $f_{jRo-Pax}$ je i u ovom slučaju veća od jedinice pa se uzima izračunata vrijednost $f_{jRo-Pax} = \mathbf{0,6456}$

5.5.2. *Snaga pogonskog stroja P_{ME}*

Ostvarenom manjom brzinom broda smanjuje se i ukupni otpor broda koji je potrebno svladati snagom porivnog stroja. Za hrvatsku flotu ro-ro putničkih brodova provučenA je regresijska krivulja kojom je definirana ovisnost propulzijske snage P_P o brzini broda [12]. Na Slici 10 prikazano je određivanje snage pogonskog stroja P_{ME} iščitavanjem vrijednosti iz grafa pomoću programa Inkscape uzevši u obzir da je $P_P = P_{ME}$ [12]



Slika 10 Određivanje snage porivnog stroja za brzinu od 13,4 čv [12]

Prava snaga pogonskog stroja za brzinu u službi $V_{Ref} = 15$ čv iznosi $P_{ME} = 2700$ kW, što je 74% vrijednosti koju pokazuje regresijska krivulja. Obzirom na malu razliku između projektne i srednje operativne brzine, kod određivanja pogonske snage za brzinu od 13,4 čv, dovoljno je precizno uzeti 74% vrijednosti koju pokazuje regresijska krivulja.

$$P_{ME} = 0,74 \cdot 2445$$

$$P_{ME} = 1833 \text{ kW}$$

5.5.3. Operativni indeks energetske učinkovitosti

Za izračun operativnog indeksa energetske učinkovitosti je dakle potrebno uvrstiti ulazne podatke iz Tablice 11 i upotrijebiti izraz (8) uz promijenjenu referentnu brzinu $V_{ref} = 13,4$ čv.

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j)(\sum_{i=1}^{n_{ME}} C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \cdot P_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

$$\frac{(\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)}) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Kapacitet \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

$$EEDI = \frac{0,6456 \cdot (3,06 \cdot 215 \cdot 1833) + (1800 \cdot 3,06 \cdot 215)}{1 \cdot 1,8034 \cdot 1 \cdot 6721 \cdot 13,4 \cdot 1} + 0 - 0$$

$$EEDI = 12,083 \text{ g}/(\text{t} \cdot \text{milja})$$

5.6. Usporedba projektnog i operativnog indeksa energetske učinkovitosti

$$\frac{EEDI_{operativni} - EEDI_{projektini}}{EEDI_{projektini}} = \frac{12,083 - 11,271}{11,271} \cdot 100\% = 7,2\%$$

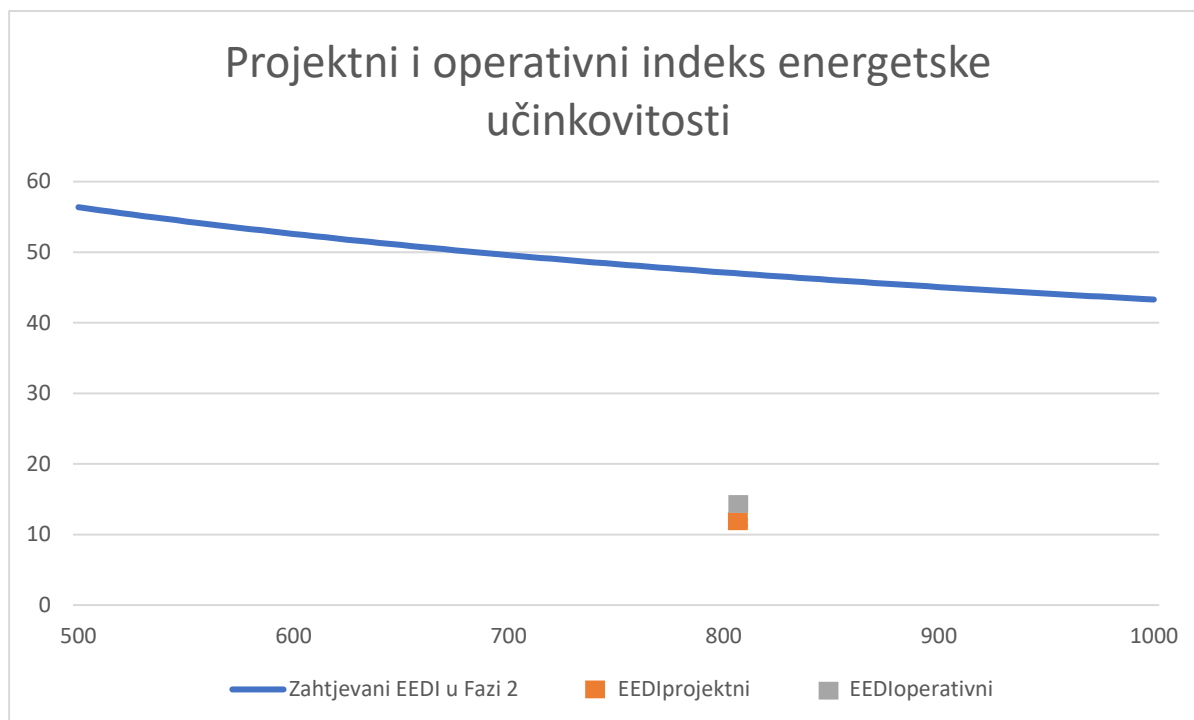
Sagledavanje srednje brzine plovidbe rezultiralo je očekivanim porastom EEDI-a, i to za značajnih 7,2%. Vrijednost EEDI-a obrnuto je proporcionalna referentnoj brzini koja se nalazi u nazivniku, također spomenuta brzina indirektno utječe na EEDI preko korekcijskog faktora zbog posebnih značajki broda f_j . Smanjenjem brzine, smanjuje se i Froudeov broj koji se u izrazu za korekcijski faktor f_j nalazi u nazivniku pa se na taj način f_j povećava, što u konačnici povećava i sam EEDI. S druge strane, za postizanje manje brzine, jasno je da je potrebna manja snaga porivnog stroja što ima suprotni učinak, odnosno povećanje EEDI-a u konačnici.

$$\downarrow V_{Ref} \rightarrow \uparrow EEDI$$

$$\downarrow V_{Ref} \rightarrow \downarrow F_{nL} \rightarrow \uparrow f_j \rightarrow \uparrow EEDI$$

$$\downarrow V_{Ref} \rightarrow \downarrow P_{ME} \rightarrow \uparrow EEDI$$

Unatoč bitnom porastu indeksa energetske učinkovitosti, njegova operativna vrijednost i dalje zadovoljava zahtijevani EEDI za drugu fazu redukcije. Na Slici 11 su u grafu prikazani projektini i operativni indeks energetske učinkovitosti i jasno se vidi da se obje vrijednosti nalaze ispod referentne krivulje.



Slika 11 Usporedba

5.7. Usporedba ljetnog i zimskog režima rada

Poznajući operativni indeks energetske učinkovitosti moguće je odrediti ukupnu emisiju ugljikovog dioksida za određeni period kao i prosječnu emisiju po danu. Godišnji red plovidbe broda Petar Hektorović podijeljen je u dvije skupine:

- Sezonski red plovidbe → 30.05. - 30.08. (59 dana)
- Izvansezonski red plovidbe → 31.08. - 31.12. i 01.01. - 29.05. (306 dana)

Za vrijeme sezonskog reda plovidbe, brod obavlja tri plovidbe u svakom smjeru, dakle, ukupno šest u danu, dok je izvan sezone taj broj smanjen na četiri plovidbe dnevno, odnosno dvije u svakom smjeru [13], a prosječna duljina plovidbe iznosi 29 NM [4]. Navedene informacije zajedno s Tablicom 12, daju potrebne podatke za izračun emisije CO₂.

Tablica 12 Ulazni podaci za izračun dnevne emisije CO₂

	Sezona	Van Sezone
Prijeđeni put po danu [NM/dan]	174	116
DWT [t]	804	

$$Emisija CO_2 = EEDI_{operativni} \cdot DWT \cdot \text{Prijeđeni put po danu}$$

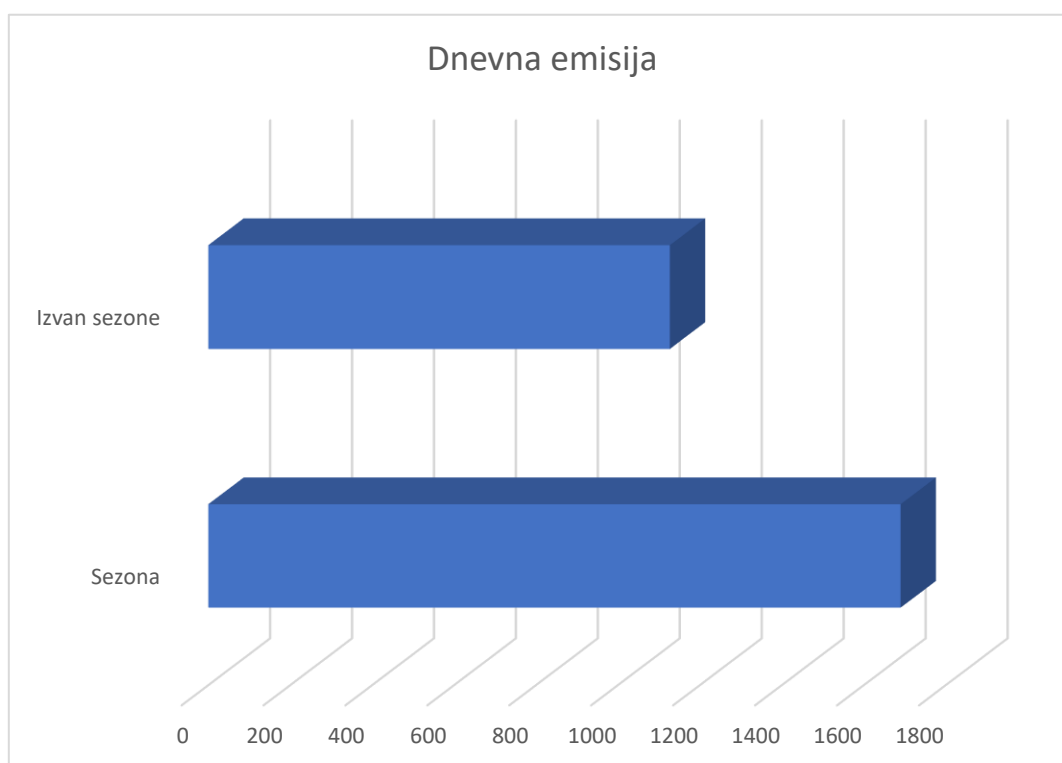
$$Emisija CO_{2_{sez}} = 12,083 \cdot 804 \cdot 174$$

$$Emisija CO_{2_{sez}} = 1690 \text{ kg CO}_2/\text{dan}$$

$$Emisija CO_{2_{van-sez}} = 12,083 \cdot 804 \cdot 116$$

$$Emisija CO_{2_{van-sez}} = 1127 \text{ kg CO}_2/\text{dan}$$

Dnevna emisija ugljikovog dioksida značajno je veća za vrijeme sezone što je grafički prikazano na Slici 12.

**Slika 12** Usporedba dnevne emisije ugljikovog dioksida tijekom i izvan sezone

5.8. Inovativne tehnologije

Globalni trend zbog ekološki prihvatljivijeg statusa i brodovlasnicima isplativije varijante jest elektrifikacija putničkih brodova. Električna propulzija pogodnija je za primjenu na kraćim rutama na brodovima koji izrazito često mijenjaju operativni profil, što ne ide u prilog brodu Petar Hektorović sa prosječnim vremenom plovidbe po ruti od 2h 08 min [4]. Naime, u vansezonskom režimu rada, brod bi imao dovoljno vremena nakon što pristane u luku za punjenje prije kretanja na sljedeću plovidbu, ali u sezoni sa šest plovidba dnevno, to nije izvedivo zbog nedostatka vremena.

Iskorištavanje snage vjetra postavljanjem jedra ili vjetroturbina ne bi bilo efikasno iz jednostavnog razloga što je ruta plovidbe u takvom podneblju gdje jaki vjetrovi nisu česta pojava pa bi stoga takva instalacija bila potpuno besmislena. Primjer ro-ro putničkog broda sa implementiranim krilima u svrhu iskorištavanje snage vjetra prikazan je na Slici 13.



Slika 13 Rro-ro brod tvrtke VPLP [14]

Prikazani brod služi za transport raketnih dijelova od Europe do Francuske Gvajane, propulzija je hibridnog tipa i također posjeduje solarne panele radi minimiziranja štetnog utjecaja na okoliš [15].

Perspektivna ideja iskorištavanja inovativnih obnovljivih izvora energije na brodu Petar Hektorović bila bi postavljanje solarnih panela s ciljem pokrivanja energetske potrebe na brodu, dok bi propulzijski sustav bio pogonjen isključivo dizelskim motorom. Na Slici 14 prikazan je ro-ro brod sa postavljenim solarnim pločama, izgrađen 2009.



Slika 14 brod za prijevoz automobila hibridnog tipa sa solarnim panelima [16]

6. ZAKLJUČAK

Staklenički plinovi kao ključni uzrok globalnog zatopljenja, među kojima je CO₂ glavni predstavnik, postali su veliki ekološki problem današnjice. Primarni izvor stakleničkih plinova je izgaranje fosilnih goriva, stoga se povećanjem energetske učinkovitosti i korištenjem obnovljivih izvora energije nastoji reducirati njihova emisija. U cilju poticanja razvoja suvremenih rješenja, koja doprinose poboljšanju i unaprjeđenju zaštite okoliša, IMO odgovarajućim rezolucijama donosi izmjene koje se odnose na obavezu uključivanja pravila za utvrđivanje i kontrolu energetske učinkovitosti. U završnom radu su analizirane zahtijevana, projektna i operativna vrijednost indeksa energetske učinkovitosti te je također uspoređen operativni režim tijekom i izvan sezone.

Osnovni cilj ovog rada bio je pokazati kako je operativni indeks energetske učinkovitosti nepovoljniji, odnosno veći od projektnog. Razlog tome je što uzimanje maksimalne brzine koja se može postići pri 75 % trajne maksimalne snage koju daje porivni stroj može navesti na krive zaključke. Analizom je pokazano da je za brod Petar Hektorović, operativna vrijednost indeksa energetske učinkovitosti 7,2 % veća od projektne, što je i dalje unutar granica zahtijevane vrijednosti. Ruta na kojoj plovi brod Petar Hektorović, Split – Vis, najduža je linija kojom plove brodovi Jadrolinije. Moguće je da na kraćim rutama srednja brzina plovidbe ima još veće odstupanje od maksimalne brzine pri 75 % MCR, što bi rezultiralo značajnijim odstupanjem od projektnog indeksa energetske učinkovitosti. S aspekta iskorištavanja sunčeve energije, postavljanje solarnih panela bio bi dobar početak implementacije inovativnih tehnologija, pri čemu je svakako potrebno provesti odgovarajuću tehno-ekonomsku analizu.

LITERATURA

- [1] Ančić, I.; Šestan, A.; Vladimir, N.: EEDI kao mjera energetske učinkovitosti broda, CD Zbornik radova 20. SORTA Simpozija Teorija i praksa brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [2] Ančić, I.; Šestan, A.; Vladimir, N.: EEDI Calculation for Passenger and Ro-ro Passenger Ships, RINA Design & Operation of Passenger Ships Conference, London, 2013.
- [3] MEPC.203(62): Amendments to the Annex of Protocol of 1997 to amend the International convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto (Inclusion of regulations on energy efficiency for ships in MARPOL Annex VI), 2011.
- [4] https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:209027/mmsi:238160000/imo:8702446/vessel:PETAR_HEKTOROVIC/:466106275b904e0a46caa7cf5b86f4b7
(pristup: 20.08.2020.)
- [5] IMO: The International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), V. izdanje, London, 2009.
- [6] <https://www.walleniuswilhelmsen.com/what-we-do/ocean-transportation/our-vessels>
(pristup 20.08.2020.)
- [7] MEPC.245(66): Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, London, UK, 2014.
- [8] MEPC.213(63): Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan, 2012.
- [9] MEPC.214(63): Guidelines on the survey and certification of energy efficiency design index (EEDI), 2012.
- [10] MEPC.215(63) Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI), 2012.
- [11] Ančić, I.; Perčić, M.; Vladimir, N.: Alternative power options to reduce carbon footprint of ro-ro passenger ship fleet: a case study of Croatia, Journal of Cleaner Production 271, 122638, 2020.
- [12] Ančić, I.; Šestan, A.; Vladimir, N.: Projektni indeks energetske učinkovitosti (EEDI) i brodski plan upravljanja energetskom učinkovitošću (SEEMP), prezentacija (https://bib.irb.hr/datoteka/932212.EEDISEEMP-materijali_sa_seminara.pdf), Zagreb, 2013.

- [13] <https://www.jadrolinija.hr/docs/default-source/lokalne-linije-2020---aktualno/st/602-vis---split.pdf?sfvrsn=8> (pristup 12.09.2020.)
- [14] <https://vplp.fr/> (pristup 13.09.2020.)
- [15] <https://safety4sea.com/vplp-launches-vessel-equipped-with-four-oceanwings/> (pristup 13.09.2020.)
- [16] <http://maritime-connector.com/news/environment-and-technology/press-release-world%E2%80%99s-first-hybrid-car-carrier-emerald-ace-completed/> (pristup 13.09.2020.)

PRILOZI

I. CD-R disc