

Ilija Knežević^{1*}
Pomorski fakultet Kotor, Univerzitet Crne Gore
ilija.knezevic98@live.ac.me

Snežana Dragičević²
Fakultet tehničkih nauka u Čačku,
Univerzitet u Kragujevcu
snezana.dragicevic@ftn.kg.ac.rs

Martin Čalasan³
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore
martinc@ucg.ac.me

Tatijana Dlabač⁴
Pomorski fakultet Kotor, Univerzitet Crne Gore
tanjav@ucg.ac.me

PARAMETARSKE ANALIZE FOTONAPONSKOG SISTEMA NA BRODU

KRATAK SADRŽAJ

U cilju zaštite životne sredine i smanjenja emisije štetnih gasova u pomorstvu Međunarodna pomorska organizacija (*International Maritime Organization* - IMO) je uvela zahtjeve energetske efikasnosti za brodove, koji se uglavnom odnose na smanjenje potrošnje goriva. Povećanje cijene goriva kao i primena različitih propisa koji definišu ograničenja emisija štetnih gasova u atmosferu i sankcije za njihovo nepoštovanje doveli su do intezivnije primene fotonaponskih sistema na plovilima.

Primjena fotonaponske energije na plovilima se sve više koristi kao glavni, pomoćni ili hibridni izvor energije. U ovom radu će biti data analiza primjene fotonaponskog sistema na turističkom brodu koji plovi Bokokotorskim zalivom. Parametarske analize će biti sprovedene u PVsyst softveru i pokazat će uticaj različitih faktora na efikasnost rada fotonaponskog sistema u realnim uslovima eksploatacije.

Ključne riječi: brod, energetska efikasnost, PVsyst, PV sistem

PARAMETRIC ANALYZES OF THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM ON BOARD

SUMMARY

In order to safeguard the environment and lessen the emission of dangerous gases during shipping, the International Maritime Organization (IMO) has established energy efficiency requirements for ships, most of which are aimed at reducing fuel usage. The increase in the price of fuel as well as the application of various regulations that define the limits of emissions of harmful gases into the atmosphere and impose sanctions for non-compliance have led to a more intensive application of photovoltaic systems on vessels.

Photovoltaic energy is increasingly used in vessels as the primary, secondary, or hybrid energy source. This paper will provide an analysis of the application of the photovoltaic system on a tourist ship that sails through the Bay of Kotor. The PVsyst software will be used to perform parametric analyses, which will demonstrate the influence of various factors on the solar system's efficiency under actual operating conditions.

Key words: ship, energy efficiency, PVsyst, PV system

* ilija.knezevic98@live.ac.me

1. UVOD

Sa razvojem industrije potražnja za energijom se povećava a eksploatacija i potrošnja tradicionalnih fosilnih goriva ubrzano raste, što izaziva sve veće zagađenje životne sredine. Obnovljivi izvori energije, čija primjena je sve intenzivnija u svim granama industrije, nalazi sve veću primjenu i u pomorstvu [1].

Prema podacima Svjetske trgovinske organizacije za 2020. godinu, oko 80% svjetske trgovine se odvija putem pomorskog transporta [2]. Ovo ukazuje na veliku važnost pomorske industrije u globalnoj ekonomiji i potrebu za stalnim unapređenjem pomorskih transportnih sistema kako bi se obezbijedila efikasnija i održivija trgovina. Primjena solarne energije u pomorstvu može imati značajne prednosti, kao što su smanjenje emisije štetnih gasova i troškova goriva, povećanje energetske efikasnosti i nezavisnosti od fosilnih goriva. Od malih brodova za krstarenje do velikih okeanskih transportnih brodova, primjena solarnih fotonaponskih sistema ima veliki značaj. Međutim, trenutno korišćenje solarne energije u pomorstvu nije široko rasprostranjeno, što je uglavnom posljedica tehnoloških ograničenja, visokih početnih investicija i nedovoljnog razumijevanja potencijala ove vrste obnovljive energije u pomorskoj industriji. Ipak, mnoge pomorske kompanije rade na primjeni solarnih panela na brodovima, naročito za pogon manjih sistema i uređaja, a očekuje se da će se ovaj trend nastaviti u budućnosti sa sve većim fokusom na održivost u pomorskoj industriji. Zbog toga su istraživanja primjene solarne energije na brodovima sve aktuelnija, posebno što je IMO uveo kriterijume za energetske efikasnost brodova [3]–[7].

Postoje dva osnovna tipa brodova na solarni pogon, a to su solarni brodovi sa direktnim i hibridnim pogonom. Solarni brodovi sa direktnim pogonom koriste solarnu energiju direktno za pokretanje motora i propulziju broda i koriste se za manje plovne objekte i čamce koji ne zahtijevaju velike brzine ili rastojanja [8], [9]. Solarni brodovi sa hibridnim pogonom koriste kombinaciju solarnih panela, baterija i tradicionalnih izvora energije, poput goriva ili generatora, kako bi se obezbijedilo dovoljno energije za pokretanje motora i potrebnih sistema na brodu. Solarni brodovi sa hibridnim pogonom se koriste za veća plovila gdje se zahtijeva veća brzina i duže putovanje, kao što su teretni brodovi ili brodovi za prevoz putnika [5], [10]. Oba tipa brodova na solarni pogon imaju potencijal za smanjenje emisije gasova staklene bašte i troškova goriva, a dalji razvoj solarnih tehnologija i baterija može dovesti do njihove šire upotrebe.

Impelemnacija fotonaponskih sistema moguća je kako na novim, tako i na postojećim brodovima. Primjena solarnih sistema na postojećim brodovima zavisi od različitih faktora, kao što su veličina broda, vrsta pogona i energije koja se koristi, kao i namjena broda. Na postojećim brodovima solarni paneli se najčešće instaliraju na krovu ili palubi broda kako bi se obezbijedila dodatna snaga za pogon određenih sistema, kao što su navigacijski i komunikacijski sistemi, pri čemu se mora voditi računa o opterećenju konstrukcije broda, estetskom izgledu i njegovoj funkcionalnosti.

U ovom radu je prikazana mogućnost primjene fotonaponskog sistema na turističkom brodu. Za analizu parametara fotonaponskog sistema korišćen je softver PVsyst [11], u okviru koga su sprovedena ispitivanja uticaja različitih faktora na efikasnost rada fotonaponskog sistema u realnim uslovima rada.

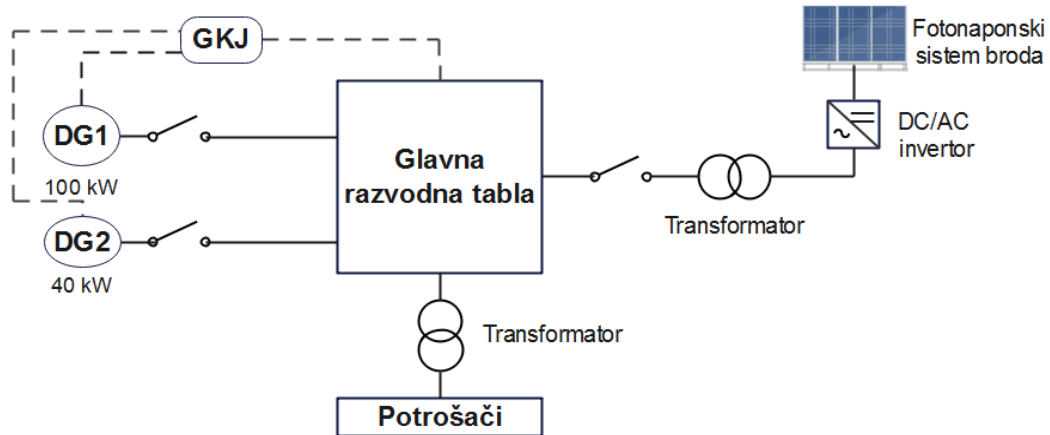
2. RADNI I KONSTRUKTIVNI PARAMETRI SIMULACIONOG MODELA

Simulacioni model razvijen na aplikaciji fotonaponskih panela na postojećem turističkom brodu "Katica" čija se plovidba odvija po Bokokotorskom zalivu i namijenjen je za jednodnevne izlete i kraća krstarenja (Slika 1). Brod ima tri palube, dugačak je 35 m i širok 8 m, a gaz iznosi 2.35 m. Brod pogone dva dizel motora MAN ukupne snage 630 kW i može razviti brzinu do 25 km/h [12].



Slika 1. Turistički brod "Katica"

Da bi se integrisao fotonaponski sistem u elektrotenergetski sistem turističkog broda "Katica" predloženo je redizajniranje sistema kao što je prikazano na Slici 2. Fotonaponski sistem za proizvodnju energije koristio bi se zajedno sa postojećim dizel generatorima. Na brodu se nalaze dva dizel generatora, od kojih jedan ima snagu od 100 kW, a drugi 40 kW. Ovi generatori su primarni za obezbjeđivanje energije, a integracijom fotonaponskog sistema u elektrotenergetski sistem postiže se značajna ušteda u potrošnji goriva i smanjenje emisije štetnih gasova. Generatorska kontrolna jedinica (GKJ) na brodu služi za kontrolu i upravljanje generatorskim sistemom. Ova jedinica omogućava praćenje i upravljanje radom generatora, kontrolu napona i struje, kao i zaštitu generatora od preopterećenja, kratkih spojeva i drugih problema koji bi mogli uzrokovati oštećenje ili prekid rada generatora.



Slika 2. Predlog redizajniranog elektroenergetskog sistema broda

Za simulaciju rada fotonaponskog sistema i analizu uticaja radnih i konstruktivnih parametara na efikasnost rada solarnog sistema korišćen je softver PVsyst. Njegova osnovna primjena je za računarsko projektovanje i optimizaciju fotonaponskih sistema, a korisnicima omogućava optimizaciju dizajna sistema sa ciljem dobijanja maksimalne efikasnosti i proizvodnje električne energije [13].

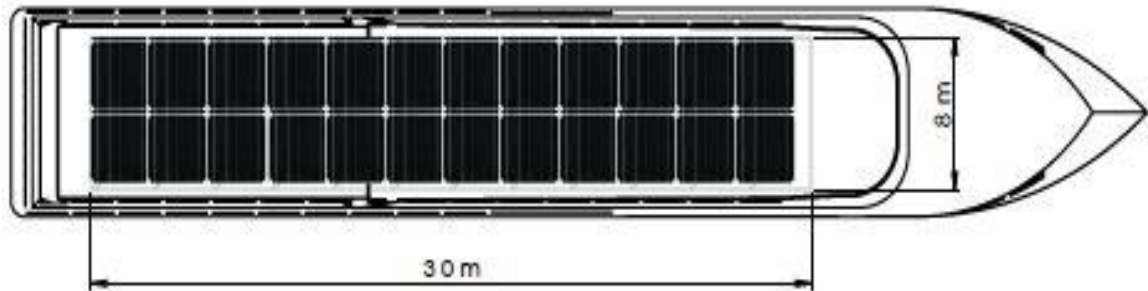
Meteorološki podaci, kao što su prosječne mjesečne vrijednosti inteziteta solarnog zračenja, temperature okoline i brzina vjetra, koji su korišćeni u simulaciji za lokaciju Bokokotorskog zaliva (42.4297° N, 18.6532° E) dati su u Tabeli I. Podaci su dobijeni korišćenjem softvera za prikupljanje meteoroloških podataka Meteonorm 8.1, koji je integrisan u softver PVsyst.

Tabela I. Meteorološki podaci za Bokokotorski zaliv

Mjesec	Globalno zračenje na horizontalnu površinu (kWh/m ²)	Temperatura vazduha (°C)	Brzina vjetra (m/s)
Januar	48.3	5.3	1.10
Februar	67.7	7.0	1.30
Mart	114.0	10.7	1.29
April	134.8	14.5	0.81
Maj	178.4	19.2	1.50
Jun	204.4	23.3	1.50
Jul	212.7	26.1	0.59
Avgust	189.7	25.4	1.49
Septembar	130.2	19.8	1.49
Oktobar	93.8	15.4	1.49
Novembar	51.7	11.1	0.80
Decembar	40.8	7.0	1.09
Godišnje	1466.5	15.4	1.20

Ukupno godišnje globalno zračenje na horizontalnu površinu iznosi 1466.5 kWh/m², a mjesečne vrijednosti su veće od 40 kWh/m². Od aprila do oktobra prosječno mjesečno sunčevo zračenje je veće od 90 kWh/m², što pokazuje da postoje značajni resursi solarne energije koji su pogodni za fotonaponsku proizvodnju energije.

Snaga fotonaponskog sistema je proporcionalna broju instaliranih panela, a u zavisnosti od njihove redne i paralelne veze definiše se izlazna snaga sistema. Na slici 3 prikazan je prostor na brodu "Katica" na kome se mogu instalirati solarni paneli. U simulacijama je usvojeno da su solarni paneli na krovnu konstrukciju površine 240 m² postavljeni horizontalno, bez nagiba [14].



Slika 3. Fotonaponski sistem instaliran na brodu "Katica"

Za izradu solarnih ćelija najčešće se koristi silicijum zbog svoje efikasnosti u pretvaranju sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Analiza efikasnosti fotonaponskog sistema na brodu "Katica" izvršiće se za različite vrste tehnologija solarnih ćelija napravljenih od monokristalnog silicijuma, polikristalnog silicijuma i amornog silicijuma.

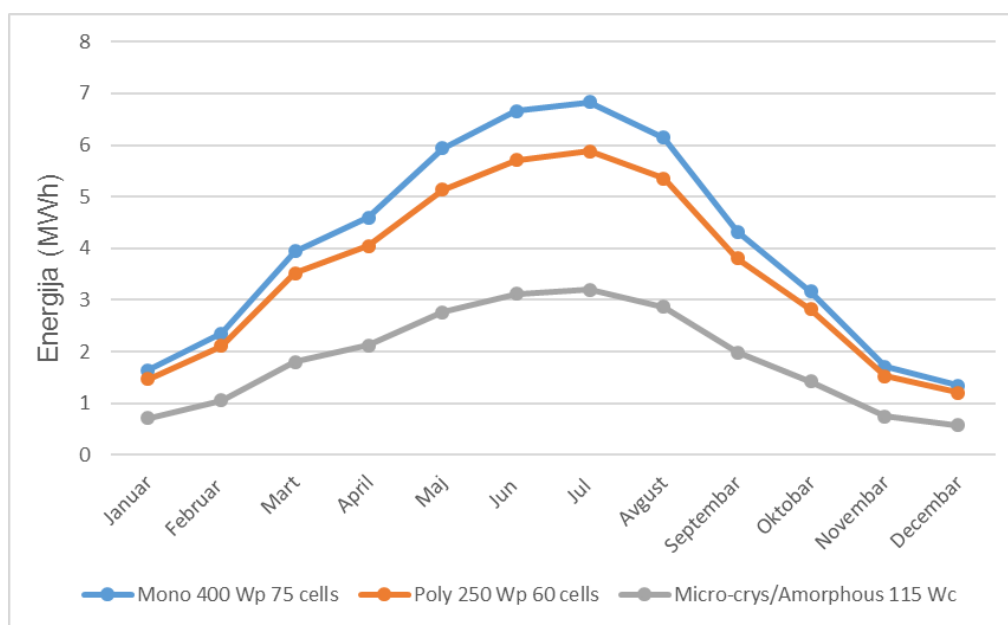
Monokristalne solarne ćelije se prave od jednog velikog kristala silicijuma što omogućava efikasnost od 15-24 % u pretvaranju sunčeve svjetlosti u električnu energiju. Imaju duži radni vijek (preko 30 godina) ali i višu cijenu proizvodnje. Polikristalne solarne ćelije se prave od više manjih kristala silicijuma, pri čemu je proizvodnja jeftinija u odnosu na monokristalne ćelije a efikasnost im je do 20%. Amorfni silicijum se koristi za proizvodnju tankoslojnih solarnih ćelija, koje se sastoje od tanke, neprozirne ploče koja se nanosi na staklo, plastiku ili drugi materijal. Amorfni solarni paneli su fleksibilniji i lakši od drugih solarnih panela, ali imaju nižu efikasnost u poređenju sa kristalnim solarnim ćelijama koja iznosi oko 12 % [15]. U Tabeli II. je dat prikaz karakteristika solarnih ćelija od silicijuma koji su korišćeni u simulaciji.

Tabela II. Karakteristike solarnih ćelija od silicijuma korišćenih u simulaciji rada fotonaponskog sistema na brodu "Katica"

Karakteristike solarnh ćelija	Monokristalni 400 Wp, 72 ćelije	Poly 250 Wp, 60 ćelije	Micro-crys/ Amorphous 115 W
Masa	29.50 kg	19.10 kg	19 kg
Maksimalna snaga	400 Wp	250 Wp	115 Wp
Maksimalni napon (Vmp)	38.40 V	30.00 V	44.50 V
Struja kratkog spoja (Isc)	11.10 A	8.630 A	3.260 A
Napon otvorenog kola (Voc)	47 V	37.40 V	58.60 V
Efikasnost ćelije	20.15 %	17.22 %	N/A %
Efikasnost modula	17.83 %	15.46 %	8.15 %
Veličina solarnog panela (dužina x širina)	2131 mm x 1052 mm	1640 mm x 992 mm	1409 mm x 1009 mm

3. REZULTATI SIMULACIJE

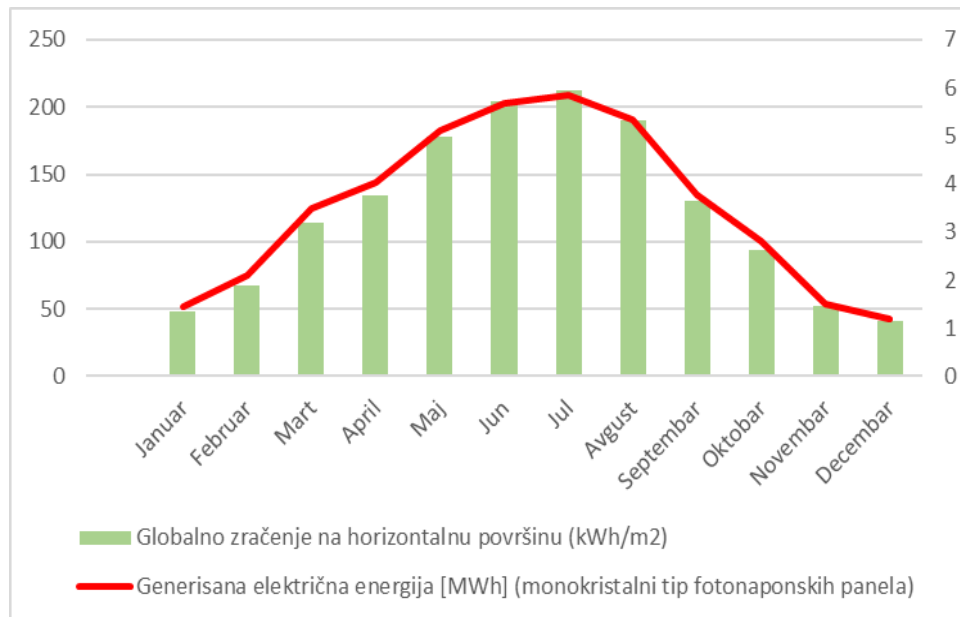
Na osnovu meteoroloških parametara i vrste tehnologije solarnih ćelija izvršena je simulacija rada fotonaponskog sistema u PVsyst softveru, koji je moguće instalirati na raspoloživoj površini od 240 m². Simulacija je izvedena za tri vrste fotonaponskih panela: monokristalne, polikristalne i amorfne koji su horizontalno postavljeni na palubi broda. Korišćenjem softvera PVsyst, simulacija je izvršena za vremenski period od godinu dana za svaki mjesec u godini. Na slici 4. prikazana je proizvodnja električne energije u posmatranom periodu od godinu dana za svaki mjesec u godini, u zavisnosti od vrste korišćenih panela. Rezultati simulacije mogu biti vrlo korisni u proračunu snage koja se može proizvesti iz fotonaponskim sistema. U zavisnosti od vrste panela i vremenskih uslova, električna energija koja bi se mogla proizvesti može varirati. Sa Slike 4. se može uočiti da je najveća proizvodnja električne energije iz fotonaponskih palena u sezonskim mjesecima (od maja do septembra).



Slika 4. Mjesečna proizvodnja električne energije za različite vrste tehnologija solarnih ćelija

Takođe, rezultati pokazuju da najveći dio generisane električne energije dolazi od monokristalnih fotonaponskih panela (ukupno 68.64 MWh godišnje), što je očekivano jer su oni poznati po svojoj visokoj efikasnosti. Korišćenjem polikristalnih panela je ostvarena manja proizvodnja električne energije (42.53 MWh godišnje). Amorfni tip fotonaponskih panela pokazao se kao loš izbor jer je proizvedeno oko 50% manje električne energije u odnosu na fotonaponski sistem sa polikristalnim panelom (22.35 MWh godišnje).

Globalno horizontalno zračenje igra važnu ulogu u proizvodnji električne energije kod fotonaponskih panela. Solarni paneli pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju pomoću fotoelektričnog efekta. Međutim, količina energije koju paneli mogu pretvoriti u električnu energiju zavisi od intenziteta sunčevog zračenja koji pada na njih. Što je intenzitet zračenja veći to će fotonaponski paneli proizvesti više električne energije. Takođe, vremenski uslovi poput oblačnih dana i magle takođe mogu smanjiti količinu zračenja koja stiže do panela, što direktno utiče na njihovu proizvodnju električne energije. Sa Slike 5 se može uočiti veza između globalnog sunčevog zračenja na horizontalnu površinu i proizvodnje električne energije kod fotonaponskih panela. Što je količina zračenja veća to će solarni paneli proizvesti više električne energije. Obzirom da na količinu električne energije koja se može proizvesti utiču i drugi parametri fotonaponskog sistema, kao što su ugao nagiba panela i orijentacija, važno je pažljivo projektovati i instalirati fotonaponski sistem kako bi se obezbijedila maksimalna efikasnost proizvodnje električne energije.



Slika 5. Veza između globalnog horizontalnog zračenja i proizvodnje električne energije

4. ZAKLJUČAK

Zbog sve manjih zaliha nafte u svijetu, rastućih troškova transporta i strožijih ograničenja emisija štetnih gasova u atmosferu intezivirana su istraživanja u pomorstvu sa ciljem primjene obnovljivih izvora energije koji bi mogli zadovoljiti sve ili dio energetske potrebe broda. U ovom radu je prikazano moguće rješenje redizajniranog elektroenergetskog sistema turističkog broda "Katica" integracijom fotonaponskih panela. Na osnovu meteoroloških podataka za različite tehnologije izrade solarnih ćelija izvršena je simulacija rada fotonaponskog sistema na brodu korišćenjem PVsyst softvera. Rezultati simulacije prikazuju mjesečnu količinu električne energije koja se može dobiti korišćenjem fotonaponskog sistema površine 240 m² sa panelima koji su postavljeni horizontalno. Simulacija je pokazala da je najveći dio generisane električne energije dobijen korišćenjem monokristalnih fotonaponskih panela koji na godišnjem nivou omogućavaju 68.64 MWh električne energije. Rezultati prikazuju i vezu između globalnog sunčevog zračenja na horizontalnu površinu i proizvodnje električne energije. Fotonaponski paneli će proizvesti više električne energije ukoliko je količina zračenja koju primaju veća. Metoda predložena u ovom radu primijenljiva je i za analizu sličnih nezavisnih fotonaponskih sistema za proizvodnju električne energije na brodovima koji plove u drugim regionima.

5. LITERATURA

- [1] T. Peša, M. Krčum, G. Kero, and J. Šoda, 'Retrofitting Vessel with Solar and Wind Renewable Energy Sources as an Example of the Croatia Study-Case', *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 10, p. 1471, 2022.
- [2] 'Review of Maritime Transport'. <https://www.un-ilibrary.org/content/periodicals/22253459> (accessed Mar. 18, 2023).
- [3] Ç. Karatuğ and Y. Durmuşoğlu, 'Design of a solar photovoltaic system for a Ro-Ro ship and estimation of performance analysis: A case study', *Solar Energy*, vol. 207, pp. 1259–1268, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.037.
- [4] Z. Ma, Y. Zhang, and H. Li, 'Energy efficiency analysis of inland ship photovoltaic system based on PVsyst', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 242, p. 022057, Mar. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/242/2/022057.
- [5] Y. Sun *et al.*, 'The application of hybrid photovoltaic system on the ocean-going ship: engineering practice and experimental research', *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 56–66, Jan. 2019, doi: 10.1080/20464177.2018.1493025.

- [6] M. Kalajdzic, M. Vasilev, and N. Momčilović, 'Assessment of Energy Efficiency for the Existing Cargo Ships', *Časopis Pomorskog fakulteta Kotor - Journal of Maritime Sciences*, vol. 23, pp. 33–46, Jun. 2022, doi: 10.56080/jms220502.
- [7] M. Kalajdžić, M. Vasilev, and N. Momčilović, 'Power Reduction Considerations for Bulk Carriers With Respect to Novel Energy Efficiency Regulations', *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, vol. 73, no. 2, pp. 79–92, Apr. 2022, doi: 10.21278/brod72205.
- [8] D. Tamunodukobipi, N. Samson, and A. Sidum, 'Design Analysis of a Lightweight Solar Powered System for Recreational Marine Craft', *World Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, no. 02, p. 441, 2018.
- [9] W. Kapuścik, J. Maraszek, M. Borowicz, and K. Sornek, 'AGH Solar Boat—the analysis of energy and ecological parameters of the solar powered boat', presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 214, no. 1, p. 012143.
- [10] C. Ghenai, M. Bettayeb, B. Brdjanin, and A. K. Hamid, 'Hybrid solar PV/PEM fuel Cell/Diesel Generator power system for cruise ship: A case study in Stockholm, Sweden', *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 14, p. 100497, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100497.
- [11] 'PVsyst – Logiciel Photovoltaïque'. <https://www.pvsyst.com/> (accessed Mar. 18, 2023).
- [12] I. Knežević, S. Dragičević, D. Kovač, and N. Pudar, 'Energy Efficiency Analysis of Solar Powered Ship - The Case of Bay of Kotor', in *1th International Conference „Conference on Advances in Science and Technology“*, May 2022.
- [13] J. Song, Y. Xie, W. Wang, X. Lu, and M. Gong, 'Design and simulation of solar photovoltaic parking shed based on PVsyst', *Electronics Quality*, vol. 8, 2017.
- [14] H. Lan, J. Dai, S. Wen, Y.-Y. Hong, D. Yu, and Y. Bai, 'Optimal Tilt Angle of Photovoltaic Arrays and Economic Allocation of Energy Storage System on Large Oil Tanker Ship', *Energies*, vol. 8, pp. 11515–11530, Oct. 2015, doi: 10.3390/en81011515.
- [15] K. E. Sarah, U. Roland, and O. E. N. C, 'A Review of Solar Photovoltaic Technologies', *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 9, no. 7, Jul. 2020, doi: 10.17577/IJERTV9IS070244.