

ВЕШТАЧКА ИНТЕЛИГЕНЦИЈА КАО КЉУЧ ЗА ПОБОЉШАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ РАДА БРОДОВА У ЦИЉУ УНАПРЕЂЕЊА ПЛОВИДБЕ

Александар Радоњић, Данијела Пјевчевић, Владислав Мараш, Анита Абођи
Универзитет у Београду - Саобраћајни факултет,
a.radonjic@sf.bg.ac.rs, danijela@sf.bg.ac.rs,
v.maras@sf.bg.ac.rs, a.abodji@sf.bg.ac.rs

Резиме: Током протеклих неколико година, морски и речни бродови били су одговорни за приближно 3% укупних емисија CO₂. Као такви, ови бродови били су предмет доношења регулатива за смањење емисије CO₂. Развојем регулатива повећала се потреба за истраживањима, а самим тим и за прецизним подацима, заснованим на алатима за подршку енергетској ефикасности у циљу смањења емисија гасова. Једна од стратегија за смањење емисија је ограничење снаге на пропелерском вратилу и потрошње горива и обухвата традиционалне методе прорачуна. С обзиром да се традиционалне методе ослањају на поједностављене претпоставке и нису довољно прецизне у сложеним условима пловидбе, последњих година појављују се модели на бази вештачке интелигенције. У овом раду биће разматрани ови модели и резултати њихове примене.

Кључне речи: Вештачка интелигенција, Снага на пропелерском вратилу, Енергетска ефикасност, Потрошња горива

1. Увод

Поморски транспорт заједно са речним транспортом представља кичму глобалне економије, обављајући приближно 90% међународне трговине. Тренутно, дизел мотори као доминантан погон бродова учествују значајно у укупним емисијама гасова на годишњем нивоу. Погонски и помоћни мотори бродова емитују следеће најзначајније штетне гасове у атмосферу: угљен-диоксид (CO₂), оксиди азота, оксиди сумпора и честице чађи [1]. Поменути гасови представљају гасове са ефектом стаклене баште и представљају издувне гасове са брода. При сагоревању горива, у атмосферу се емитује количина штетних гасова пропорционална потрошњи горива.

Године 2018. поморски транспорт био је одговоран за приближно 1,076 милиона тона CO₂, што је око 2,9% укупних емисија од људских активности. На нивоу Европске Уније (ЕУ) током 2021. године, поморски транспорт је допринео са око 3% до 4% укупних емисија CO₂, што је еквивалентно 124 милиона тона CO₂. Због тога је од јануара 2024. године, Систем трговине емисијама Европске уније

проширио своје регулаторне оквири како би обухватио емисије CO₂ свих великих бродова који пристају у луке ЕУ. Ова иницијатива допуњује Стратегију Међународне поморске организације (МПО) за смањење гасова стаклене баште којом се предвиђа смањење за најмање 20% до 2030. и 70% до 2040. године у међународном бродском саобраћају у поређењу са 2008. годином.

Ако се погледа даље у прошлост, МПО је почетком 2000-их година почела да разматра техничке и оперативне мере за побољшање енергетске ефикасности бродова чиме је покушала да смањи емисије издувних гасова. Године 2011., МПО усвојила је амандмане на Прилог VI Међународне конвенције о спречавању загађења мора са бродова (MARPOL) како би увела обавезне техничке и оперативне мере енергетске ефикасности у циљу смањења емисије CO₂ са бродова. Од 1. јануара 2013. године ступили су на снагу Индекс енергетске ефикасности брода (EEDI) и План управљања енергетском ефикасношћу брода (SEEMP).

Директивом из 2022. године за развој SEEMP-а дају се смернице за економичан рад брода и, између осталог, оне обухватају План управљања бродом ради побољшања енергетске ефикасности. Заједно са Директивом за ограничавање снаге вратила/мотора ради усклађивања са захтевима Индекса енергетске ефикасности постојећих бродова (EEXI) и употребе резервне снаге, поменути регулаторни оквири повећали су потребу за прецизним, на подацима заснованим алатима за подршку енергетској ефикасности у поморству, укључујући моделе за планирање рута, управљање потрошњом горива (PG) и смањење емисија гасова стаклене баште. Такође, овим прописима Међународне поморске организације ограничење снаге на пропелерском вратилу је уврштено као метод за смањење емисија CO₂.

Осим ових директива, за одређивање снаге на пропелерском вратилу од 2015. године постоји, и употребљава се, међународни стандард ISO 15016 Међународне организације за стандардизацију. Према овом стандарду примарна сврха експерименталних испитивања јесте да се утврде перформансе новог брода у погледу брзине, снаге и броја обртаја пропелерског вратила у прописаним условима рада брода и тиме верификује брзина брода прописана EEDI регулативом.

Током експерименталних испитивања брзине и снаге на пропелерском вратилу, не мери се само снага на пропелерском вратилу и брзина брода, већ и релевантни утицајни фактори везани за пропелерску брзину и услове пловидбе. Резултат експерименталних испитивања по овом стандарду је крива односа снаге пропелерског вратила и брзине кретања брода. Током вишегодишње експлоатације брода, ипак, долази до промене односа снаге пропелерског вратила и брзине кретања брода и због тога је Међународна организација за стандардизацију увела стандард ISO 19030 2016. године којим се прописују практичне методе за мерење промена у перформансама трупа и пропелера. Такође, дефинишу се битни показатељи одржавања, поправке и реконструкције трупа и пропелера.

Поред експерименталних испитивања, у оквиру стандарда и стратегија, предлажу се традиционалне методологије које обухватају коришћење емпиријских образаца сваки пут када се услови експерименталних испитивања не слажу са прописаним условима. Традиционалне методе ослањају се на поједностављене претпоставке и често нису довољно тачне у сложеним условима пловидбе и због тога се последњих десетак година све више појављују методе засноване на

вештачкој интелигенцији. Ове методе су прилагодљивије и дају прецизније резултате од традиционалних чиме, у ствари више доприносе напорима за смањење емисија [2]–[5].

Такође, уколико се у резолуцијама МПО за прорачун EEDI индекса погледа како изгледа израз за прорачун јасно је да се већа енергетска ефикасност, између осталог, може постићи смањивањем губитака у пропулзији брода и применом савремених решења против обраштања трупа брода.

Уколико се примене све наведене процедуре и методологије, јасно је да методе вештачке интелигенције за предвиђање снаге на пропелерском вратилу брода имају значајну улогу како у повећању енергетске ефикасности брода, тако и у развоју SEEMP-а.

У овом раду акценат ће бити на снази на пропелерском вратилу и потрошњи горива као кључним показатељима помоћу којих је могуће смањити емисије издувних гасова и повећати енергетску ефикасност брода. Разлог за то је не мали број радова у стручној и научној литератури, као и експериментална испитивања које је обавила Лабораторија за испитивање бродова и пловних путева при Саобраћајном факултету.

Током протеклих десетак година, објављено је доста радова који се баве предвиђањем снаге на пропелерском вратилу и потрошње горива помоћу метода вештачке интелигенције. Циљеви њихових истраживања били су усредсређени на откривање веза између измерених података тј. утицајних фактора и снаге на пропелерском вратилу, односно потрошње горива и на откривање функционалних зависности између промена услова под којима се одигравају експериментална испитивања те самим тим и промена утицајних фактора и услова задатих поменутих прописима.

Овај рад пружа преглед примењених метода вештачке интелигенције за прорачун снаге на пропелерском вратилу и потрошње горива и самим тим повећање енергетске ефикасности и смањење емисија гасова стаклене баште са бродова. Циљ рада је да се прикажу узрочно-последичне везе између утицајних фактора унапред одређених при експерименталним мерењима и метода и модела вештачке интелигенције и да се резултати прорачуна повежу са енергетском ефикасношћу бродова и смањењем емисија гасова стаклене баште са бродова.

Поред тога, циљ у овом раду је и да се истакну предности и ограничења различитих метода и модела вештачке интелигенције у одређивању снаге на пропелерском вратилу и потрошње горива, чиме се доприноси унапређењу модела вештачке интелигенције примењених за потребе пловидбе.

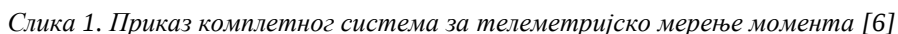
Путем синтезе приказаних истраживања, овај рад наглашава значајан допринос вештачке интелигенције енергетској ефикасности и смањењу гасова стаклене баште са брода.

Оно што спаја све приказане научне радове је измерена снага на пропелерском вратилу и потрошња горива, као и покушај да се прикаже значај ове снаге у савременом водном транспорту. С обзиром да је снага на пропелерском вратилу увек била део истраживања, у овом раду се очекује потврда да је она утицајан фактор рада брода у функцији потрошње горива, енергетске ефикасности, а самим тим и смањења емисије гасова стаклене баште са брода.

Остатак овог рада подељен је на следећи начин: у поглављу 2 дат је пример експерименталног мерења снаге на пропелерском вратилу брода и употребе вештачке интелигенције, у поглављу 3 дат је преглед научних радова у којима је вршено мерење снаге на пропелерском вратилу, док поглавље 4 даје дискусију у вези изазова и ограничења примене вештачке интелигенције у смањењу емисије гасова стаклене баште. На крају истраживања у поглављу 5 дата су закључна разматрања.

За мерење момента на пропелерском вратилу користе се сензори напрезања, познати као мерне траке. Оне раде тако што мењају свој електрични отпор када дође до напрезања површине вратила услед дејства обртног момента.

Електрични отпор мерне траке расте сразмерно деформацији [1]. Током пловидбе, снага и вибрације мотора прелазе на осовину, што изазива њено увијање и деформацију површине. Сигнал из мерне траке се затим појачава, претвара у дигитални облик помоћу импулсне кодне модулације (PCM), и преноси на стационарни пријемник. На крају, тај сигнал се поново претвара у аналогни напон који је пропорционалан моменту који делује на вратило. Приказ комплетног система за телеметријско мерење момента дат је на слици 1.



Приликом мерења снаге на пропелерском вратилу, подаци са мерења скупљају се у једну базу података, а затим се користе у моделу вештачке интелигенције за обучавање, валидацију и тестирање. По завршетку обучавања модел је у стању да прорачуна снагу на пропелерском вратилу. На основу снаге пропелерског вратила прорачунава се потрошња горива, а потом и количина издувних гасова, те оцењује енергетска ефикасност брода. На слици 2 дат је уопштени приказ како се оцењује енергетска ефикасност брода помоћу вештачке интелигенције.



Слика 2. Оцена енергетске ефикасности брода помоћу вештачке интелигенције

3. Примењене методе и модели вештачке интелигенције у смањењу гасова стаклене баште

На основу прегледане литературе, наредни корак обухватио је постављање следећег истраживачког питања: да ли снага на пропелерском вратилу и смањење потрошње горива утичу на смањење количине издувних гасова и енергетску ефикасност брода? Као одговор на ово питање постављена је следећа хипотеза: правилно израчуната снага на пропелерском вратилу и правилно употребљена током пловидбе брода може да повећа енергетску ефикасност брода и смањи количину издувних гасова.

Постављена је још једна хипотеза и она гласи: Методе вештачке интелигенције могу брже и ефикасније од традиционалних метода да допринесу откривању утицајних фактора на смањење количине издувних гасова, као и да тачније предвиде снагу на пропелерском вратилу, потрошњу горива и брзину пловидбе. Провера тачности хипотеза извршена је излиставањем добијених резултата из прегледане научне литературе.

У радовима који се баве овим проблемом, постоје различити модели вештачке интелигенције. Осим разлике у моделима, постоје и разлике у циљевима радова. Када су разматрани радови у којима се прорачунавала само снага на пропелерском вратилу, а не и потрошња горива, претпостављено је да је прорачуном снаге на пропелерском вратилу омогућен и прорачун потрошње горива, а самим тим и потенцијално смањење гасова стаклене баште.

У табели 1 дат је преглед само одабраних истраживања чији је заједнички циљ био примена метода вештачке интелигенције за прорачун снаге пропелерског вратила.

Табела 1. Преглед наведених истраживања: проблеми и методе вештачке интелигенције за њихово решавање

Лите- ратура	Метода	Улазне величине	Изразне величине
[7]	Вештачке неуронске мреже (ВНМ)	$\sqrt{3}; V/L, L/B, T/B, F_r$	N_v
[8]	ВНМ	v, RPM, T_s, t, Q , ветар, море	PG
[9]	Регресија (Р), машинско учење (МУ)	$v, V, L, B, T_p, T_k, S, \zeta, \text{Error!}, \beta, \varphi, CVPR$	PG
[10]	ВНМ, Р	v, H_w, v_w, d_w, T_s, t	N_v
[11]	Р	RPM мотора, v, t, T , време	N_m
[12]	ВНМ, Р	RPM, $T_s, t, v_m, \theta, v_w, d_w, H_w, d_{wave}$	PG
[13]	ВНМ	RPM мотора, $P, d_w, v_w, \theta, v_m, t_d$	v, PG
[14]	МУ	$v, T, RPM, h, v_m, H_w, d_w$	N_v
[15]	МУ, Р	N_v, RPM, τ , параметри рада мотора	PG
[16]	Р, МУ, ВНМ	$v_t, v_w, t_{water}, t, T, F_r, H_w, t_{clean}$	N_v
[17]	ВНМ	RPM, H_w, t_w, φ	v, N_v, PG
[18]	ВНМ	v, v_w, d_w, T, t	N_v
[19]	МУ, ВНМ Р	$v_t, T_s, t, K, H_w, t_w, d_{wave}, v_w$	N_v
[20]	ВНМ	$v_t, T_s, t, t_{water}, v_w, d_w$, стање мора, $\theta, H_w, d_{wave}, t_{clean}, t_{pclean}$	N_v
[21]	ВНМ	RPM, $a, \alpha, v, v_t, T, t, v_w, H_w, t_w, d_{wave}$, струјања воде, t_{water}, t_{wind}, atm	v, N_v, PG
[22] ^{*)}	МУ	неважно	N_v

^{*)} – модели вештачке интелигенције направили су побољшање у односу на традиционалне методе

Као што се може видети, експериментална испитивања снаге на пропелерском вратилу брода представљају изузетно напоран посао у оквиру кога постоји истовремено мерење и праћење великог броја утицајних фактора, без којих анализа резултата мерења не би била остварива.

У табели 1, све улазне величине у моделе вештачке интелигенције могу се сматрати утицајним факторима и могу се разврстати у следећих неколико категорија:

1. Геометријски фактори: дужина брода (L), ширина брода (B), гажење брода (T), гажење на прамцу (T_p), гажење на крми (T_k), средње гажење (T_s), коефицијент пуноће главног ребра (β), коефицијент финоће бродског трупа (φ), коефицијент облика прамца (CVPR),
2. Навигациони фактори: Фрудов број (F_r), брзина пловидбе (v), брзина у односу на воду (v_t), курс брода (K), убрзање брода (a), угао закретања кормила (α),
3. Техничко-научички фактори: претега (t), запремина истиснине бродског трупа (V), тежиште истиснине по дужини (ζ), угао бочног нагиба брода (φ),
4. Фактори носивости: количина превезеног терета (Q),
5. Фактори погона: број обртаја пропелерског вратила у минути (RPM), оквашена површина бродског трупа (S), корак пропелера (P), снага на пропелерском

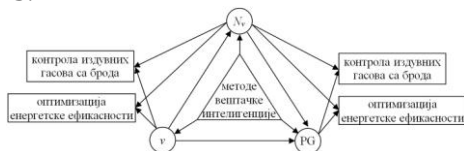
вратилу (N_v), обртни момент пропелерског вратила (τ), подаци о вибрацијама вратила, коефицијент смањеног потиска (t_p),

6. Спољни фактори (ветар и таласи): висина таласа (H_w), брзина ветра (v_w), брзина струјања мора (v_m), угао струјања мора (θ), угао под којим таласи ударају у брод (d_{wave}), дубина воде (h), температура воде (t_{water}), температура ваздуха (t_{wind}), атмосферски притисак (atm), време од последњег доковања брода (t_d), број дана од последњег чишћења трупа (t_{clean}), број дана од последњег чишћења пропелера ($t_{p_{clean}}$),

Пажљивим проучавањем категорија улазних величина, може се закључити да највећи број утицајних фактора спада у техничко-експлоатационе карактеристике брода, а да мањи број њих припада погонским карактеристикама брода.

4. Изазови и ограничења примене вештачке интелигенције у смањењу емисије гасова стаклене баште

Објашњење целокупног процеса примене вештачке интелигенције на повећање енергетске ефикасности и смањење количине издувних гасова са брода приказано је на слици 3.



Слика 3. Потенцијална примена метода вештачке интелигенције код повећања енергетске ефикасности бродова и смањења количине издувних гасова са брода

Као што се са слике 3 може видети, уобичајени пут то повећања енергетске ефикасности и смањења издувних гасова води преко потрошње горива. Што је потрошња горива мања, енергетска ефикасност је већа и мања је количина издувних гасова. Међутим, модели вештачке интелигенције у приказаним радовима доказали су да и сама примена прорачунате снаге на пропелерском вратилу и брзине пловидбе доводи до повећања енергетске ефикасности и смањења издувних гасова, без обзира да ли је прорачунавана потрошња горива.

На основу прегледаних радова може се издвојити неколико изазова и ограничења. Изазови су следећи: направити модел са најмањом могућом грешком [10], отклонити тешкоће у одабиру праве архитектуре ВНМ [12], [20], обавити правилан избор модела вештачке интелигенције на задати проблем [14] и укључити конкуритивност различитих модела вештачке интелигенције [21].

Ограничења су следећа: дискретне вредности утицајних фактора [13], недовољан број утицајних фактора [10], [14], препознавање утицајних фактора и тумачења резултата [10], [15], примена модела у другачијим условима пловидбе [16], број података [16], верификација модела [17], ограниченост података са експерименталних мерења [19], актуелност података [19], дужина периода сакупљања података [19], пресликавање података са једног на други брод [18], [20], [22], прекиди у прикупљањима података [10], екстраполација резултата [18], [21].

На основу приказаних радова и резултата до којих су дошли аутори истраживања (видети поглавље 3 и табелу 1), прорачуната снага на пропелерском вратилу помоћу метода вештачке интелигенције и употребљена током пловидбе брода повећава енергетску ефикасност брода и смањује количину издувних гасова чиме је потврђена прва хипотеза. Истраживања Зикаса и др. [23] показала су да методе вештачке интелигенције брже и ефикасније доприносе откривању утицајних фактора на смањење количине издувних гасова, тачније предвиђају снагу на пропелерском вратилу, и потрошњу горива, што представља побољшање у односу на традиционалне методе. Тиме је извршена провера тачности и друге хипотезе.

5. Закључак

Резултати приказаних истраживања показују да у поређењу са традиционалним методама, предложене методе вештачке интелигенције засноване на експерименталним подацима нуде већу прилагодљивост, прецизност и општу применљивост приликом доношења одлука везаних за снагу на пропелерском вратилу, потрошњу горива и брзину пловидбе. Традиционални модели имају тенденцију да буду крути и да претпостављају константне услове рада, док модели вештачке интелигенције обухватају промене и догађаје приликом пловидбе на пловном путу, укључујући временске услове, оперативне режиме и деградацију уређаја и конструктивних елемената током времена.

Резултати, надаље, показују да модели вештачке интелигенције могу служити не само као алат за процену перформанси брода, већ и као систем подршке у доношењу одлука у вези са оперативном оптимизацијом, управљањем флотом и усаглашавањем са прописима о смањењу емисија гасова стаклене баште. Увођењем методологија тумачења резултата добијених коришћењем модела вештачке интелигенције, гради се поверење корисника услуга вештачке интелигенције и отварају могућности за практичну примену приказаних метода вештачке интелигенције и на броду и у копненим оперативним центрима за надзор пловидбе.

Предложени модели вештачке интелигенције могу се користити приликом оптимизације бродских рута у делу који се односи на прорачун снаге на пропелерском вратилу у различитим временским условима и при различитим носивостима бродова, што омогућава планерима путовања да минимизују потрошњу горива.

Будућа истраживања у овој области могу се проширити на стварање доступне базе података власницима бродова, чиме би се створио оквир за примену модела вештачке интелигенције и код бродова који не учествују у експерименталним испитивањима у реалним условима пловидбе.

У јеку дигиталне трансформације у поморском и речном саобраћају, показано је да вештачка интелигенција представља моћан алат за постизање еколошких, економских и оперативних циљева.

Литература

- [1] Симић, А. (2012) „Енергетска ефикасност речних самоходних теретних бродова“, Универзитет у Београду, Машински факултет, стр. 272.

- [2] Gupta, P.; Rasheed, A.; Steen, S. (2022) „Ship performance monitoring using machine-learning“. *Ocean Engineering*, 254, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111094.
- [3] Fahrholz, S.F.; Caprace, J.D. (2022) „A machine learning approach to improve sailboat resistance prediction“. *Ocean Engineering*, 257, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111642.
- [4] Aizpurua, J.I.; Knutsen, K.E.; Heimdal, M.; Vanem, E. (2023) „Integrated machine learning and probabilistic degradation approach for vessel electric motor prognostics“. *Ocean Engineering*, 275, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114153.
- [5] Panagiotakopoulos, T.; Filippopoulos, I.; Filippopoulos, C.; Filippopoulos, E.; Lajic, Z.; Violaris, A.; Chytas, S.P.; Kiouvrekis, Y. (2022) „Vessel’s trim optimization using IoT data and machine learning models“. In *Proceedings of the 2022 13th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)*, Крф, Грчка, 18–20 Јул; стр. 1–5, DOI: 10.1109/IISA56318.2022.9904361.
- [6] Костић, Д., Чолић, В., Јевтић, Н., Радоњић, А. (2013) „Студија о испитивању снаге, обртних момената и торзионих вибрација на пропелерским вратилу пловног самоходног багера рефулера САВА ИИИ“, Београд, Наручилац Студије: Предузеће „РАПИД“, Д.О.О. Рума, стр. 17.
- [7] Радоњић, А., Вукадиновић, К. (2014) „Application of Ensemble Neural Networks to Prediction of Towboat Shaft Power“, *Journal of Marine Science and Technology*, 20, 64–80, DOI: 10.1007/s00773-014-0273-2.
- [8] Bal Beşikçi, E., Arslan, O., Turan, O., Ölçer, A., (2016). „An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations“, *Computers & Operations Research*, 66, 393–401, DOI: 10.1016/j.cor.2015.04.004.
- [9] Coraddu, A.; Oneto, L.; Baldi, F.; Anguita, D. (2017) „Vessels Fuel Consumption Forecast and Trim Optimisation: A Data Analytics Perspective“, *Ocean Engineering*, 130, 351–370, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.058.
- [10] Parkes, A.I., Sobey, A.J., Hudson, D.A., (2018). „Physics-based shaft power prediction for large merchant ships using neural networks“. *Ocean Engineering*, 166, 92–104, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.060.
- [11] Yoo, B., Kim, J., (2019). „Probabilistic modeling of ship powering performance using full-scale operational data“. *Applied Ocean Research*, 82, 1–9, DOI: 10.1016/j.apor.2018.10.013.
- [12] Hu, Z.; Jin, Y.; Hu, Q.; Sen, S.; Zhou, T.; Osman, M.T. (2019) „Prediction of fuel consumption for enroute ship based on machine learning“, *IEEE Access*, 7, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2933630.
- [13] Tarelko, W., Rudzki, K. (2020) „Applying artificial neural networks for modelling ship speed and fuel consumption“, *Neural Computing & Application*, 32, 17379–17395, DOI: 10.1007/s00521-020-05111-2.
- [14] Kim, D.-H.; Lee, S.-B.; Lee, J.-H. (2020) „Data-Driven Prediction of Vessel Propulsion Power Using Support Vector Regression with Onboard Measurement and Ocean Data“, *Sensors*, 20, DOI: 10.3390/s20061588.
- [15] Uyanık, T.; Karatug, Ç.; Arslanoglu, Y. (2020) „Machine learning approach to ship fuel consumption: A case of container vessel“, *Transportation Research Part D Transportation. Environment*, 84, DOI: 10.1016/j.trd.2020.102389.

- [16] Laurie, A.; Anderlini, E.; Dietz, J.; Thomas, G. (2021) „Machine learning for shaft power prediction and analysis of fouling related performance deterioration“, Ocean Engineering, 234, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108886.
- [17] Moreira, L.; Vettor, R.; Guedes Soares, C. (2021) „Neural network approach for predicting ship speed and fuel consumption“, Journal of Marine Science and Engineering, 9, DOI: 10.3390/jmse9020119.
- [18] Parkes, A.I.; Sobey, A.J.; Hudson, D.A.; Savasta, T.D., (2022) „Power prediction for a vessel without recorded data using data fusion from a fleet of vessels“, Expert Systems with Applications, 187, DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115971.
- [19] Lang, X.; Wu, D.; Mao, W. (2022) „Comparison of supervised machine learning methods to predict ship propulsion power at sea“, Ocean Engineering, 245, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110387.
- [20] Zwart RH, Bogaard J, Kana AA. (2023) „A Grey-box model approach using noon report data for trim optimization“, International Shipbuilding Progress, 70(1):41-63, DOI:10.3233/ISP-220009.
- [21] Kim, H.S.; Roh, M.I. (2024) „Interpretable, data-driven models for predicting shaft power, fuel consumption, and speed considering the effects of hull fouling and weather conditions“, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 16, DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2024.100592.
- [22] Zikas, S.; Gkirtzou, K.; Filippopoulos, I.; Kalatzis, D.; Panagiotakopoulos, T.; Lajic, Z.; Papathanasiou, D.; Kiouvrekis, Y. (2025) „Explainable AI Models for IoT-Based Shaft Power Prediction and Comprehensive Performance Monitoring“, Electronics, 14, 2561. DOI: 10.3390/electronics14132561.

Abstract: *Over the past few years, ships have been responsible for approximately 3% of total CO₂ emissions. As such, they have become the subject of regulations aimed at reducing CO₂ emissions. With the development of such regulations, the need for research has increased, and consequently, so has the demand for precise, data-driven tools to support energy efficiency with the goal of reducing gas emissions. One of the strategies for emission reduction is the limitation of propeller shaft power and fuel consumption, which involves traditional calculation methods. Since traditional methods rely on simplified assumptions and are not sufficiently accurate under complex navigating conditions, artificial intelligence-based models have emerged in recent years. This paper will examine these models and the results of their application.*

Keywords: *Artificial intelligence, Propeller shaft power, Energy efficiency, Fuel consumption*

ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS A KEY TECHNOLOGY FOR IMPROVING SHIP OPERATIONAL EFFICIENCY IN ENHANCED NAVIGATION SITUATIONS

Aleksandar Radonjić, Danijela Pjevčević, Vladislav Maraš, Anita Abodi