

METODOLOGIJA MONITORINGA I PROCJENA UČINKOVITOSTI NASUTIH LUKOBRANA U IČIĆIMA

IVONA PETKOVIĆ¹, NINO KRVAVICA¹, IVAN ŽIGO², IVAN MAROVIĆ¹, IGOR RUŽIĆ¹

¹ Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Hrvatska

² MareCon d.o.o., Hrvatska

Sažetak

U radu je predstavljena metodologija monitoringa i procjena učinkovitosti nasutih lukobrana koja objedinjuje brzo snimanje izvedenog stanja i kvantitativnu hidrauličku analizu. Analizirana su dva lukobrana u akvatoriju Ičića različitih projektnih koncepata, ACI Marina Opatija i luka Ičići. Izvedena geometrija rekonstruirana je mobilnim LiDAR snimanjem uz primjenu SLAM postupka, pri čemu su iz oblaka točaka izdvojeni reprezentativni presjeci te su vrednovani ključni pokazatelji djelovanja valova: prelijevanje, transmisija i refleksija za odabrane projektne scenarije. Dobiveni rezultati upućuju da konstrukcija s većom slobodnom visinom, širim profilom krune i stabilnijim zaštitnim slojem ostvaruje znatno niže prelijevanje i transmisiju, dok su refleksijski učinci između promatranih lokacija usporedivi. Time se potvrđuje da je hidraulička učinkovitost lukobrana određena slobodnom visinom i konfiguracijom krune, uz važan doprinos stanja zaštitnog sloja. Predložena LiDAR metodologija omogućuje ponovljivo praćenje promjena geometrije lukobrana kroz vrijeme te predstavlja operativno pouzdan alat za prikupljanje terenskih podataka i donošenje odluka o održavanju, sanacijama i upravljanju obalnom infrastrukturom.

Ključne riječi

nasuti lukobrani, LiDAR, SLAM, oblak točaka, 3D monitoring, hidraulički parametri

1 Uvod

Projektiranje nasutih lukobrana u pravilu je višekriterijski postupak u kojem se geometrija presjeka i svojstva zaštitnog sloja (kota i širina krune, nagibi pokosa, hrapavost i propusnost) određuju usklađivanjem više projektnih ciljeva. Pritom se postiže optimalno rješenje u pogledu hidrauličke učinkovitosti, sigurnosti uporabe i ekonomičnosti tijekom životnog vijeka konstrukcije (USACE, 2002).

U praksi, učinkovitost lukobrana određena je izvedenom i kroz vrijeme promjenjivom geometrijom presjeka. Ulegnuće krune, lokalne promjene nagiba pokosa, preraspodjela elemenata zaštitnog sloja i degradacija nožice mogu u kratkom razdoblju promijeniti intenzitet prelijevanja i transmisije te posljedično povećati operativni rizik i zahtjeve održavanja (Punte i sur., 2014).

U suvremenom upravljanju obalnim građevinama sve veći naglasak stavlja na sustavno i ponovljivo praćenje izvedenog stanja. U tom kontekstu lasersko skeniranje omogućuje kvantifikaciju promjena geometrije, identifikaciju zona progresije oštećenja zaštitnog sloja te izdvajanje mjerljivih pokazatelja promjene (npr. promjene visina, volumetrijske bilance i lokalizirane deformacije) kao podloge za održavanje (Petković i sur., 2025; Lague i sur., 2013; Vos i sur., 2022). Uz stacionarne TLS uređaje, sve se češće primjenjuju i mobilni (ručni) LiDAR (engl. *Light Detection and Ranging*) sustavi temeljeni na algoritamskom postupku SLAM (engl. *Simultaneous Localization and Mapping*) koji istodobno procjenjuje položaj i orijentaciju senzora te rekonstruira 3D model okoline. Dosadašnja istraživanja dodatno potvrđuju da LiDAR-SLAM sustavi imaju visoku primjenjivost u obalnom području pri snimanju geomorfološki i konstruktivno složenih prostora, poput plaža, strmih stjenovitih obala i različitih priobalnih zona. Postupak omogućuje prikupljanje gustih oblaka

točaka, vjerodostojnu trodimenzionalnu rekonstrukciju topografije te ponovljivo praćenje promjena geometrije i volumena duž kontinuiranih dionica lukobrana, uz kraće vrijeme terenske akvizicije i veću operativnu učinkovitost (Sofonia i sur., 2019). Recentni razvoj specijaliziranih *LiDAR-SLAM* rješenja prilagođenih uvjetima pojačanih refleksija i gibanja vodene površine upućuje na rastuću metodološku prilagodljivost tih sustava za primjene u obalnom inženjerstvu (Garcia-Williams i sur., 2025; Ruzgienė i sur., 2025; Chen i sur., 2025).

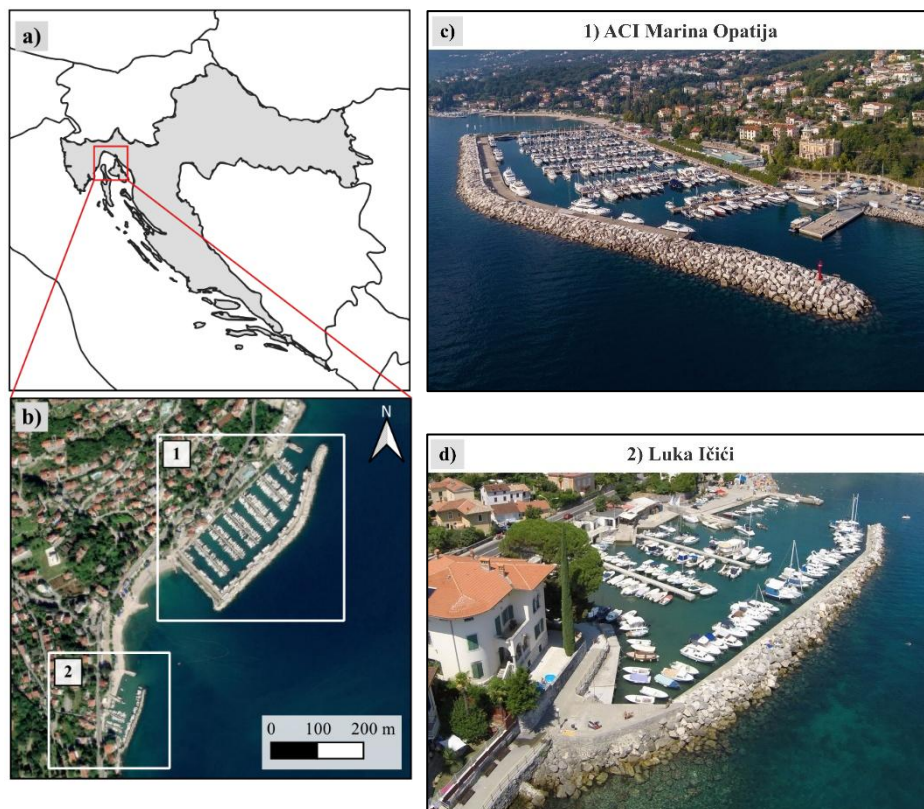
U akvatoriju Ičića izvedena su dva nasuta lukobrana razvijena prema različitim funkcionalnim, sigurnosnim i ekonomskim zahtjevima. Lukobran ACI Marine Opatija koncipiran je kao strukturno stabilna i hidraulički robusna konstrukcija komercijalne nautičke luke, s ciljem postizanja mirnoće akvatorija, djelovanja valova u zaštićenom akvatoriju sukladno standardima nautičkih marina, kontrolirane izmjene morske vode i cjelogodišnje operativne sigurnosti priveza (Bujak i sur., 2018). Suprotno tome, lukobran luke Ičići projektiran je kao troškovno optimizirano, no lokalno hidraulički osjetljivije rješenje, čija je osnovna funkcija zaštita plovila domicilnih korisnika. Navedeni pristupi odražavaju različite inženjerske strategije planiranja luka izloženih valnim opterećenjima karakterističnima za uvjete sjevernog Jadrana, koje obilježavaju ograničena privjetrišta, kratke valne duljine, strmi obalni profili te povremeni, ali intenzivni naleti bure i juga (Cushman-Roisin i sur., 2001).

Cilj ovoga rada je komparativna analiza dvaju koncepta izvedenih lukobrana, temeljena na visokorezolucijskom mobilnom *LiDAR* snimanju, pri čemu je terensko prikupljanje podataka provedeno uređajem *Ligrip OI Lite*. Budući da su oba lukobrana smještena unutar istog akvatorija te izložena istim valnim parametrima (valnoj visini, periodu i smjeru djelovanja), njihova usporedba omogućuje procjenu učinkovitosti različitih projektnih pristupa. Predstavljena metodologija monitoringa omogućuje detaljnu rekonstrukciju stvarne geometrije lukobrana te procjenu učinkovitosti njihovih operativnih svojstava, uključujući očekivani intenzitet održavanja, funkcionalnost priveza i vizualni utjecaj u obalnom prostoru.

2 Metode

2.1 Područje istraživanja

Područje istraživanja obuhvaća akvatorij Ičića u Kvarnerskom zaljevu (sjeverni Jadran), unutar kojeg su analizirana dva postojeća nasuta lukobrana: lukobran ACI Marine Opatija i lukobran komunalne luke Ičići. Lokacije i osnovni vizualni prikazi objekata dani su na slici 1. S obzirom na to da se oba lukobrana nalaze u neposrednoj prostornoj blizini unutar istog priobalnog akvatorija, izložena su usporedivim meteorološkim i valnim uvjetima na razini lokacije, što omogućuje izravnu usporedbu njihove izvedene geometrije i zatečenog stanja.



Slika 1. Položaj istraživanih lukobrana u akvatoriju Ičića: (a) regionalni kontekst lokacije, (b) ortofoto s označenim obuhvatom i položajem dvaju lukobrana (kartografska podloga: *Bing Satellite*, *QGIS*), (c) nasuti lukobran ACI Marine Opatija (ACI d.d., n.d.), (d) nasuti lukobran luke Ičići (Županijska lučka uprava Opatija – Lovran – Mošćenička Draga, 2023).

2.2 Rekonstrukcija izvedene geometrije

Izvedeno stanje oba lukobrana rekonstruirano je mobilnim *LiDAR* snimanjem, pri čemu je na obje lokacije korišten ručni mobilni *LiDAR* sustav *Ligrip O1 Lite* (GreenValley International, n.d.). Svaki od lukobrana snimljen je zasebno u okviru jednog kontinuiranog snimanja, iz kojeg je generiran pripadni georeferencirani oblak točaka. *SLAM* postupkom osigurano je da su sve točke snimljene tijekom kretanja senzora geometrijski usklađene unutar jedinstvenog koordinatnog sustava. Obrada podataka obuhvatila je inicijalnu *SLAM* rekonstrukciju, registraciju i georeferenciranje, filtriranje šuma te osnovnu klasifikaciju i segmentaciju oblaka točaka u softveru *LiDAR360MLS*. Naknadno su podaci uvezeni u softver *CloudCompare*, gdje je provedena homogenizacija i kontrola kvalitete, uključujući uklanjanje preostalog šuma i izdvajanje konstrukcijskih elemenata relevantnih za analizu. Iz konačnih trodimenzionalnih modela izdvojeni su reprezentativni poprečni presjeci koji su korišteni kao ulazni geometrijski podaci za hidrauličke proračune. Geometrija lukobrana ACI Marine određena je iz *LiDAR* modela te potom uspoređena s projektnom dokumentacijom, dok je geometrija lukobrana luke Ičići u cijelosti rekonstruirana iz snimljenog oblaka točaka. Na temelju izdvojenih poprečnih presjeka određeni su parametri potrebni za izračun hidrauličkih parametara, pri čemu je izvedba zaštitnog sloja interpretirana sukladno preporukama za nasute obalne konstrukcije od prirodnog kamena.

2.3 Valni scenariji i kriteriji hidrauličke učinkovitosti

Valno opterećenje definirano je za dominantni dolazni smjer valova iz sektora jugo-jugoistoka (engl. *South-southeast - SSE*; azimut 160°) za povratna razdoblja 5 i 100 godina, određenih na temelju numeričke analize vjetrovalne klime za dubokovodnu referentnu točku ispred Opatije (Hydroexpert d.o.o., 2015). Povratno razdoblje od pet godina usvojeno je kao mjerodavno za ocjenu operativnosti luke, dok je 100 godina primijenjeno za provjeru stabilnosti lukobranskih konstrukcija. Za svaki povratni period usvojene su

vrijednosti značajne visine vala H_s i vršnog perioda T_p , koje su zatim korištene za definiranje ulaznih parametara u procjeni prelijevanja, transmisije i refleksije. Zbog izravne usporedivosti konstrukcija, valni parametri u ovoj su fazi razmatrani u okviru dubokovodnih pretpostavki, odnosno nije modelirana transformacija valova od duboke vode do nožice lukobrana pa se dobiveni hidraulički pokazatelji tumače kao indikativni i međusobno usporedni pokazatelji. Uz valne parametre definirana je i referentna razina morske površine (MR) bez valnih oscilacija, koja se koristi pri određivanju slobodne visine krune R_c . Prema tablici 1, za proračun pri PP = 5 godina usvojena je visina vode na koti +0,23 m n.m., koja odgovara srednjoj višoj visokoj živoj razi (SVVŽR), a za PP = 100 godina usvojena je visina vode na koti +1,15 m n.m., koja odgovara ekstremnom razu vode povratnog perioda 10 godina (Marecon d.o.o., 2024).

Tablica 1. Morske razine (Marecon d.o.o., 2024)

Morska razina	HVRS71 [m n.m.]
VR ^{100god.}	+1,35
VR ^{10god.}	+1,15
VR ^{1god.}	+0,80
SVVŽR	+0,23
SR	+0,01
Geodetska 0	±0,00
SNNŽR	-0,32
NR ^{1god.}	-0,55
NR ^{10god.}	-0,77
NR ^{100god.}	-0,85

Hidraulička učinkovitost analizirana je trima standardnim pokazateljima koji obuhvaćaju ključne mehanizme odziva nasutih lukobrana: srednjim protokom prelijevanja po metru krune q , kojim se kvantificira razina izloženosti krune prelijevanju, koeficijentom transmisije C_t , koji opisuje udio valne energije prenesen u zaštićeni akvatorij, te koeficijentom refleksije C_r , koji određuje intenzitet reflektiranog valnog polja ispred konstrukcije. Odabirom ovih pokazatelja i primjenom jednakih valnih scenarija osigurana je metodološki konzistentna i izravno usporediva ocjena hidrauličke učinkovitosti stvarno izvedenih profila.

Prelievanje je procijenjeno prema *EurOtop* preporukama za hrapave, djelomično propusne nasute pokose pri okomitom nailasku vala (van der Meer i sur., 2018). Srednji protok prelijevanja po metru duljine krune, q [m³/s/m], izračunat je izrazom:

$$q = \sqrt{g \cdot H_s^3} \cdot 0,1035 \cdot \exp \left[- \left(1,35 \frac{R_c}{H_s \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1,3} \right] \text{ za strme pokose nagiba 1:2 do 1:4/3} \quad (1)$$

gdje je g gravitacijsko ubrzanje, H_s [m] značajna visina upadnog vala očitana na nožici konstrukcije koja je za potrebe ove analize usvojena kao dubokovodni značajni val, a R_c [m] slobodna visina krune definirana kao vertikalna razlika između kote krune i usvojene razi vode. Redukcijski faktor γ_f odražava utjecaj hrapavosti zaštitnog sloja te je određen sukladno tipu i izvedbi zaštitnog sloja. U ovom radu usvojene su vrijednosti γ_f za kameni nabačaj s propusnom jezgrom. Za ACI Marinu gdje je zaštitni sloj izveden u dva sloja 2 sloja, primijenjeno je $\gamma_f = 0,4$, dok je za lukobran luke Ičići izvedenog od jednog sloja primijenjeno $\gamma_f = 0,45$. Faktor γ_β opisuje utjecaj kuta nailaska vala, pri čemu je za okomit nailazak usvojeno $\gamma_\beta = 1$.

Transmisija valova opisana je koeficijentom C_t , definiranim kao omjer karakteristične visine transmitiranih

valova i dolazne značajne visine vala (CIRIA, CUR and CETMEF, 2007). Za konstrukcije s relativno malom slobodnom visinom krune i relativno uskom krunom ($B/H_s < 10$), C_t je u ovom radu procijenjen izrazom koji su Briganti i sur. (2004) kalibrirali na temelju baze podataka DELOS, polazeći od odnosa koji su prethodno predložili d'Angremond i sur. (1997). Odgovarajući izraz dan je u nastavku:

$$C_t = -0,4 \frac{R_c}{H_s} + 0,64 \left(\frac{B}{H_s} \right)^{-0,31} (1 - \exp(-0,5\xi)) \quad (2)$$

gdje je R_c [m] slobodna visina krune, B [m] širina krune, H_s [m] značajna visina upadnog vala, a ξ Iribarrenov parametar. Iribarrenovim parametrom se obuhvaća utjecaj nagiba pokosa i strmine vala, a definiran je izrazom:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s_0}} \quad (3)$$

pri čemu je α [°] kut nagiba pokosa konstrukcije u odnosu na horizontalu, a s_0 strmina vala određena izrazom:

$$s_0 = \frac{2\pi H_s}{gT_p^2} \quad (4)$$

Za nasute konstrukcije uobičajeno se primjenjuju empirijski odnosi koji koeficijent refleksije C_r povezuju s Iribarrenovim parametrom ξ , uz izbor koeficijenata ovisno o hrapavosti i propusnosti pokosa (CIRIA, CUR and CETMEF, 2007). Temeljni oblik takvog odnosa predložio je Battjes (1974), dok je Postma (1989), na temelju ponovne analize eksperimentalnih podataka Allsopa i Channella (1989), potvrdio njegovu primjenjivost uz prilagođene vrijednosti empirijskih koeficijenata:

$$C_r = 0,125 \cdot \xi^{0,73} \quad (5)$$

2.4 Postupak vizualno-krajobrazne procjene lukobrana

Vizualni utjecaj lukobrana razmotren je kao dopunski kriterij radi procjene njihove integracije u obalni prostor. Prostorna osnova uspostavljena je u GIS okruženju integracijom podloge *Google Satellite (QGIS)*, digitalnog modela terena te fotodokumentacije, uz terenski obilazak lokacije. Reprezentativni pravci i točke promatranja odabrani su, kao što i Heritage (2012) preporučuje, tako da obuhvate dominantne korisničke koridore i mjesta zadržavanja (obalna šetnica, zona plaže te priobalne javne površine). Za svaku vizuru analizirani su položaj i kontinuitet linije krune u odnosu na horizont, stupanj vizualnog zatvaranja prema otvorenom moru, odnos mjerila konstrukcije i okolne izgradnje te kontrast prema prirodnom krajoliku. Procjena je provedena u skladu sa smjernicama krajobrazne i vizualne procjene utjecaja (Landscape Institute and IEMA, 2013).

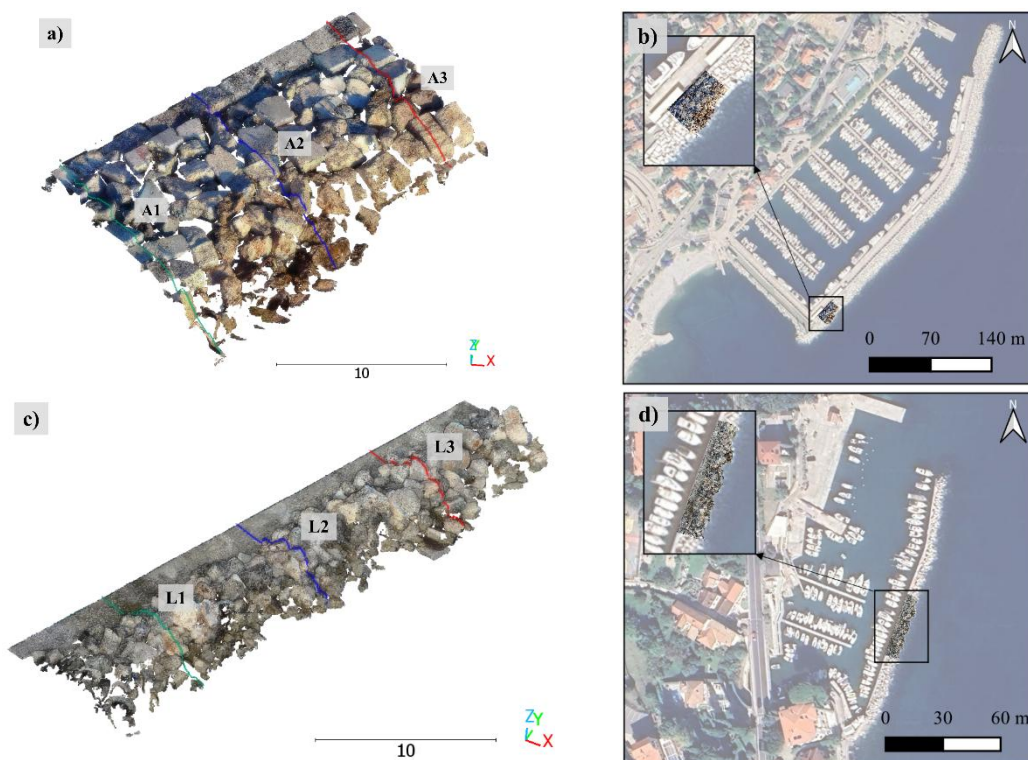
2.5 Procjena održavanja i višekriterijski okvir usporedbe

Očekivani intenzitet održavanja procijenjen je kvalitativno, prema hidrauličkim pokazateljima i zatečenom stanju zaštitnog sloja (van der Meer i sur., 2018; CIRIA, CUR and CETMEF, 2007). Rezultati su interpretirani u okviru pristupa upravljanju životnim ciklusom, pri čemu se potreba za sanacijama razmatra s obzirom na vjerojatnost oštećenja tijekom ekstremnih događaja te ukupne troškove gradnje i održavanja kroz uporabni vijek (Burcharth i sur., 2016; Galiatsatou i sur., 2018). Na temelju navedenog, svaki odlukobrana je svrstan u jedan od tri razreda očekivanog intenziteta održavanja (niski, umjereni, povišeni), koji odražavaju očekivanu učestalost lokalnih sanacija, potrebu za korekcijama geometrije presjeka te vjerojatnost zahvata većeg opsega tijekom projektiranog vijeka. U završnoj fazi analize provedena je komparativna analiza koja razmatra hidrauličke pokazatelje, procijenjeni intenzitet održavanja, funkcionalnost priveza te vizualno-krajobrazni utjecaj u obalnom prostoru.

3 Rezultati

3.1 Geometrija i stanje konstrukcija

Rekonstrukcija izvedenog stanja mobilnim *LiDAR* snimanjem rezultirala je georeferenciranim trodimenzionalnim modelima pomoću kojih su uspoređene izvedene geometrije presjeka. Analiza je provedena na reprezentativnim dionicama lukobrana duljine 25 m u ACI Marini Opatija te 30 m u luci Ičići. Nakon filtriranja i provedene kontrole kvalitete analizirani su oblaci točaka visoke gustoće. Za lukobran ACI Marine Opatija obrađen je oblak koji obuhvaća 14.067.487 točaka, dok oblak točaka lukobrana luke Ičići sadrži 33.841.757 točaka. Prosječna gustoća oblaka točaka određena je u softveru *CloudCompare* primjenom alata *Surface Density* ($r = 0,56$ m). Za lukobran ACI Marine dobivena je srednja vrijednost gustoće $\rho = 32.581 \pm 11.916$ točaka/m², što odgovara prosječnom razmaku točaka od približno 5,5 mm. Za lukobran luke Ičići izračunata srednja vrijednost gustoće iznosi $\rho = 127.888 \pm 66.853$ točaka/m², uz prosječni razmak točaka od 2,8 mm. Ostvarena razina uzorkovanja omogućila je izdvajanje tri reprezentativna poprečna presjeka u razmaku od 10 m za svaki lukobran (ACI Marina: A1–A3; luka Ičići: L1–L3), što je prikazano na slici 2.



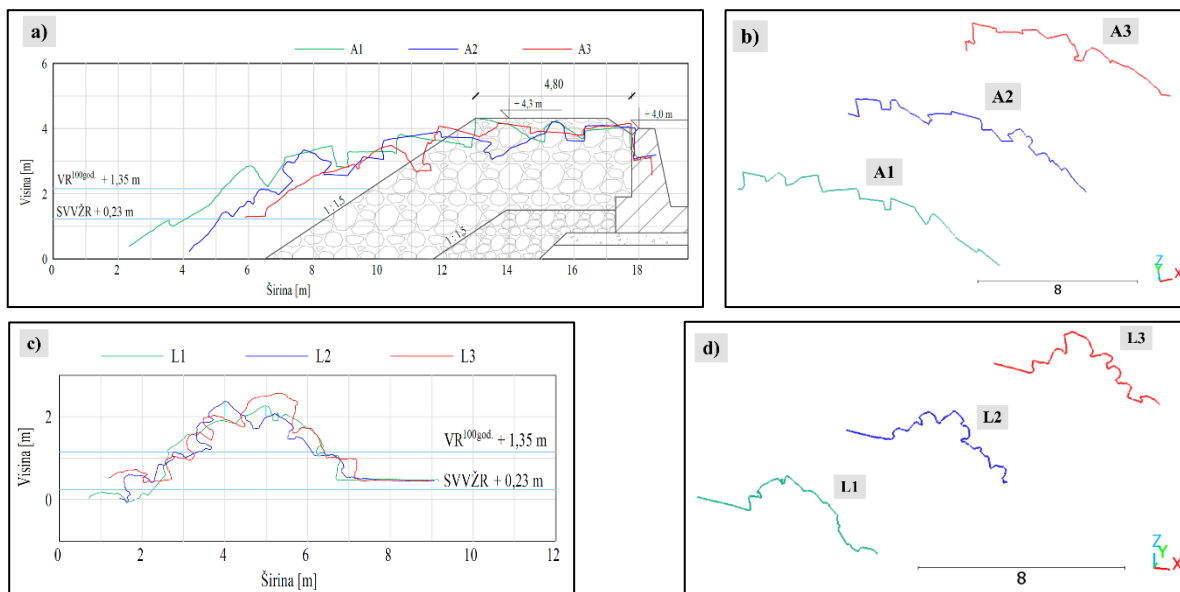
Slika 2. Lokacije i izdvojeni *LiDAR* presjeci lukobrana: (a) oblak točaka luke Ičići (L1–L3), (b) ortofoto luke Ičići, (c) oblak točaka ACI Marine Opatija (A1–A3), (d) ortofoto ACI Marine Opatija. Kartografska podloga: Google Satellite (QGIS).

Na izdvojenim poprečnim presjecima procijenjene su dimenzije kote krune, širine krune i nagiba vanjskog pokosa, pri čemu je kao reprezentativna vrijednost pojedinog parametra usvojena aritmetička sredina triju presjeka (tablica 2.). Širina krune na lukobranu ACI Marine Opatija definirana je kao širina krunskog platoa formiranog od triju uzastopnih kamenih blokova (CIRIA, CUR and CETMEF, 2007), dok lukobran luke Ičići nije izveden s oblikovanom krunom, već kao kameniti nabačaj čiju vršnu geometriju određuju diskretno položeni blokovi bez stabilne širine platoa. Iz tog razloga je za luku Ičići kota krune određena kao visina najviše točke najvišeg kamenog bloka na osi lukobrana, a širina krune kao širina bloka u vršnoj zoni promatranog presjeka. Nagib vanjskog pokosa za oba objekta izračunat je kao nagib vanjske ovojnice zaštitnog sloja od ruba krunskog kamena (početak pokosa) do nožice lukobrana. Promjer blokova primarne zaštite procijenjen je na temelju analize oblaka točaka, mjerenjem više reprezentativnih elemenata na obrađenom segmentu te usvajanjem njihove srednje vrijednosti.

Tablica 2. Geometrijski parametri lukobrana ACI Marina Opatija i luke Ičići određeni iz *LiDAR* presjeka.

Objekt	Presjek	Kota krune [m n.m.]	Širina krune [m]	Nagib vanjskog pokosa [1:n]
ACI Marina Opatija	A1	4,32	4,77	1:2,0
	A2	4,21	4,63	1:2,0
	A3	4,17	4,69	1:2,1
	<u>A</u>	4,23 \approx 4,2	4,7	1:2,0
Luka Ičići	L1	2,27	0,80	1:1,2
	L2	2,37	0,80	1:1,1
	L3	2,56	1,18	1:1,3
	<u>L</u>	2,4	0,93 \approx 0,9	1:1,2

Za ACI Marina Opatija *LiDAR* presjeci *A1–A3* prikazani na slici 3. (a-b) upućuju na pravilno oblikovane pokose i stabilnu geometriju u sva tri presjeka, bez indikacija ulegnuća krune, erozijskog ispiranja nožice ili razmještanja elemenata zaštitnog sloja. Zaštitni sloj je formiran od masivnih kamenih elemenata promjera oko 1,7 m i mase oko 6 t, što je konzistentno s uočenom stabilnošću izvedene geometrije. Pouzdanost geometrijskih parametara dobivenih *LiDAR* modelom provjerena je usporedbom s projektnom dokumentacijom na slici 3. (a) te je utvrđeno vrlo dobro podudaranje ključnih dimenzija krune: projektirana širina iznosi 4,8 m, a iz *LiDAR* presjeka očitana prosječna širina 4,7 m, dok je projektirana visina 4,3 m, a iz *LiDAR* presjeka 4,2 m. Tako mala odstupanja očekivana su i mogu se pripisati izvedbenim tolerancijama, hrapavosti i diskretnoj prirodi kamenog zaštitnog sloja te postupku očitavanja iz oblaka točaka. Izraženije odstupanje zabilježeno je kod nagiba vanjskog pokosa, pri čemu je projektiran nagib 1:1,5, a iz *LiDAR* presjeka očitana 1:2. Odstupanje je očekivano jer projektni presjek prikazuje idealiziranu geometriju, dok *LiDAR* rekonstruira stvarnu ovojnici krupnog kamenog nabačaja na koju utječu lokalni položaji pojedinih blokova i primijenjena metodologija određivanja nagiba od ruba krunskog kamena do nožice. Na lukobranu luke Ičići *LiDAR* presjeci *L1–L3* prikazani na slici 3. (c-d) prikazuju smanjenu geometrijska robusnost te nepovoljnije stanje zaštitnog sloja, na *LiDAR* modelu uočavaju se lokalni pomaci i razrjeđivanje kamenih blokova na vanjskom sloju, uz početne znakove degradacije u zoni izravnog valnog udara. Promjer blokova iznosi približno 0,9 m, uz procijenjenu masu pojedinačnih elemenata reda veličine oko 1.100 kg. Poprečni presjek luke Ičići nije uspoređen s projektnom dokumentacijom, jer ista nije bila dostupna autorima.

**Slika 3.** Usporedba *LiDAR* poprečnih presjeka: (a–b) ACI Opatija (*A1–A3*); (c–d) Ičići (*L1–L3*).

3.2 Proračun hidrauličkih parametara

Usvojeni valni parametri i pripadni scenariji korišteni u numeričkim analizama prikazani su u tablici 2., dok su izračunati hidraulički pokazatelji za stvarno izvedene profile sažeti u tablici 4.

Tablica 3. Valni scenariji za SSE (160°) korišteni u analizi.

T [god]	H_s [m]	T_p [s]	MR [m n.m.]	s_0 [1]	ξ_{ACI} [1]	ξ_{Luka} [1]
5	3,15	5,80	+ 0,23	0,0600	2,04	3,40
100	3,65	6,20	+ 1,15	0,0608	2,03	3,38

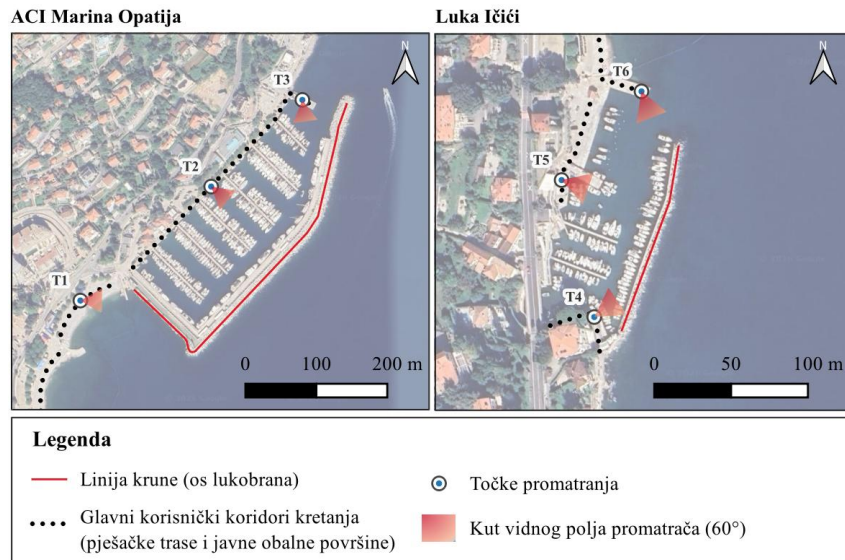
Tablica 4. Hidraulički parametri na osnovi izvedenog stanja lukobrana.

T [god]	Objekt	R_c [m]	q [l/s/m]	C_t [1]	C_r [1]
5	ACI Marina Opatija	3,97	3	0,00	0,21
100		3,05	48	0,04	0,21
5	Luka Ičići	2,17	139	0,47	0,31
100		1,25	802	0,64	0,30

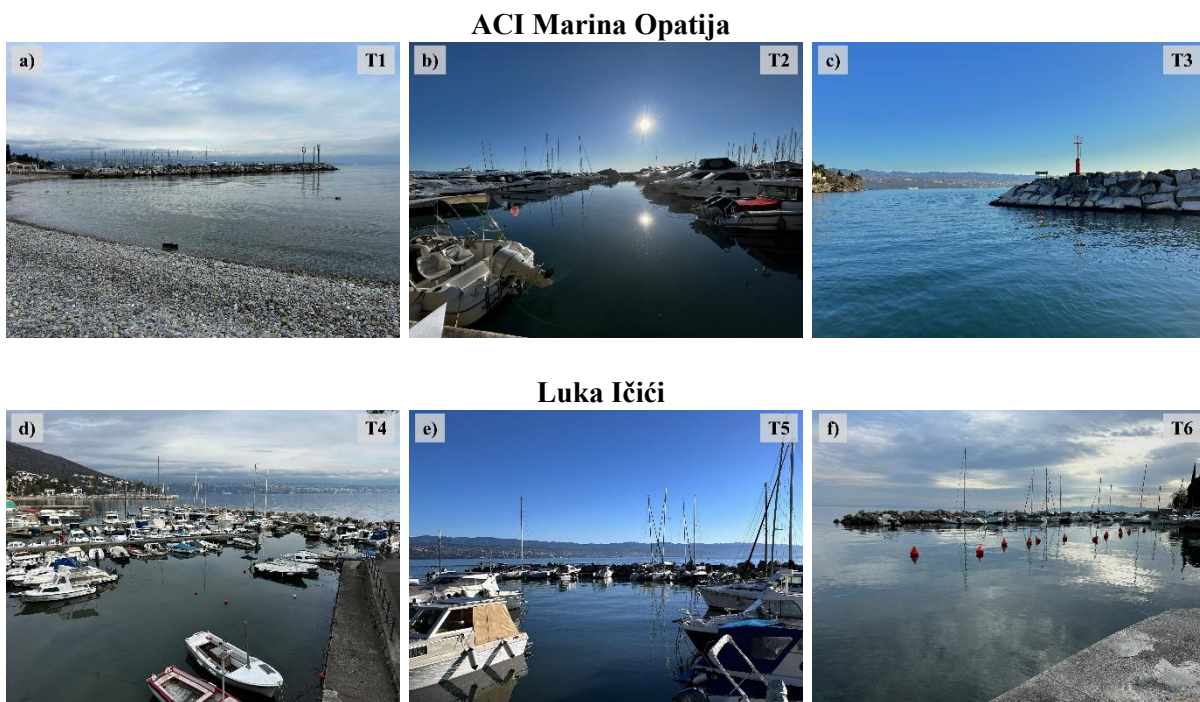
Profil ACI Marine Opatija zadržava prelijevanje na niskoj razini u operativnom scenariju, pri čemu je za $T = 5$ godina dobiveno 3 l/s/m uz zanemarivu transmisiju, dok se pri ekstremnom opterećenju $T = 100$ godina prelijevanje povećava na 48 l/s/m, uz i dalje nisku transmisiju. Nasuprot tome, lukobran luke Ičići već pri $T = 5$ god pokazuje višestruko nepovoljniji režim prelijevanja s 139 l/s/m, a pri $T = 100$ god dostiže vrlo visoke protoke prelijevanja od 802 l/s/m, praćene dodatnim porastom transmisije. Procjena prelijevanja provedena je uz pretpostavku dubokovodnog valnog opterećenja, bez numeričkog modeliranja transformacije valova od referentne dubokovodne točke do nožice lukobrana, pa dobivene apsolutne vrijednosti q imaju prvenstveno komparativnu svrhu. Budući da su koeficijenti refleksije gotovo jednaki za oba profila, razlike u odzivu prvenstveno proizlaze iz geometrije izvedenih presjeka, osobito manje slobodne visine i nepovoljnije konfiguracije krune u luci Ičići, čime se smanjuje sposobnost disipacije energije i povećava osjetljivost na povišenu razinu mora. Takav odziv ima izravne operativne posljedice jer implicira učestalo zapljuskivanje i plavljenje zaleđa.

3.3 Vizualno-krajobrazna analiza lukobrana

Vizure su analizirane za oba promatrana lukobrana na temelju kartografskog prikaza prostornog rasporeda točaka promatranja i standardiziranog kuta vidnog polja (60°). Za ACI Marinu Opatija definirane su točke $T1-T3$, a za luku Ičići točke $T4-T6$ (slika 4.). Procjena je dodatno potkrijepljena terenskom fotodokumentacijom snimljenom iz istih točaka (slika 5.). Rezultati upućuju da se lukobran ACI Marine Opatija u većini promatranih pravaca percipira kao prostorno dominantan element lučke infrastrukture, pri čemu povišena kota krune (4,2 m) i kontinuirana linija krune uzrokuju izraženije vizualno zatvaranje akvatorija i smanjenje vizualne povezanosti s otvorenim morem. Suprotno tome, lukobran komunalne luke Ičići, zbog niže kote krune (2,4 m), ima manji utjecaj na liniju horizonta i zadržava veću otvorenost vizura, pa je stupanj vizualnog zatvaranja slabije izražen čak i u neposrednoj blizini plaže i obalne šetnice.



Slika 4. Točke promatranja (T1–T6) i koridori kretanja. Kartografska podloga: Google Satellite (QGIS).



Slika 5. Reprezentativne terenske vizure iz točaka promatranja: (a–c) ACI Marina Opatija (T1–T3); (d–f) luka Ičići (T4–T6).

3.4 Procjena održavanja i usporedba rezultata

Na temelju objedinjene interpretacije *LiDAR*-om utvrđenog stanja zaštitnog sloja i hidrauličkih pokazatelja procijenjen je očekivani intenzitet održavanja analiziranih lukobrana. ACI lukobran razvrstan je u razred niskog do umjerenog održavanja, dok se za lukobran luke Ičići očekuje povišeni intenzitet održavanja zbog učestalijeg dosezanja nepovoljnih stanja prelijevanja i pomaka kamenih blokova zaštitnog sloja (CIRIA, CUR and CETMEF, 2007).

Usporedna interpretacija pokazuje dvije različite strategije upravljanja valnim opterećenjem. U prvom slučaju naglasak je na visokoj strukturnoj stabilnosti i dugoročnom zadržavanju projektirane geometrije bez vidljivih znakova degradacije. U drugom slučaju koncept je baziran na prihvaćanju kontroliranog hidrauličkog

propuštanja i ograničenih lokalnih oštećenja zaštitnog sloja, uz održavanje funkcionalnosti priveza. Ključni parametri usporedbe oba lukobrana sažeti su u tablici 5.

Tablica 5. Usporedba osnovnih parametara dvaju lukobrana.

Objekt	Masa blokova [kg]	Visina krune	Očekivani režim održavanja	Vizualni utjecaj u obalnom prostoru
ACI Marina Opatija	≈ 6.000	4,2 [m] - povišena (predimenzionirano rješenje)	Nizak do umjeren; rutinski pregledi i lokalne sanacije	Izražen (visoka kruna/školjera)
Luka Ičići	≈ 1.100	2,4 [m] - niža	Povišen; povremene lokalne sanacije i češće praćenje	Nizak do umjeren; lokalno izražen uz plažu/šetnicu

4 Zaključak

U ovome radu mobilno *LiDAR* snimanje visoke prostorne razlučivosti, izvedeno ručnim sustavom *LiGrip OI Lite*, potvrđeno je kao operativno učinkovit pristup za rekonstrukciju izvedene geometrije dvaju nasutih lukobrana u akvatoriju Ičića (ACI Marina Opatija i luka Ičići). Metoda se pokazala brzom, terenski primjerenom i ponovljivom, pri čemu omogućuje izradu preciznog 3D modela izvedenog stanja te pouzdano izdvajanje reprezentativnih poprečnih presjeka. Tako dobivena geometrija omogućuje izravno i kvantitativno povezivanje ključnih morfoloških parametara lukobrana, prije svega kote i širine krune te nagiba pokosa, s dominantnim hidrauličkim procesima koji određuju ponašanje konstrukcije u valnim uvjetima, odnosno prelijevanjem, transmisijom i refleksijom valova. Time se uspostavlja jasna veza između stvarno izvedenog stanja i očekivanog hidrauličkog odziva, što predstavlja pouzdanu osnovu za objektivnu procjenu učinkovitosti, usporedbu alternativnih rješenja i planiranje održavanja.

Lukobran ACI Marine Opatija, zahvaljujući većoj slobodnoj visini i stabilnijoj kruni, zadržava povoljne razine prelijevanja u oba razmatrana povratna perioda. U operativnom scenariju ($T = 5$ godina) specifični protok prelijevanja iznosi približno 3 l/s/m uz praktički zanemarivu transmisiju, dok u ekstremnom scenariju ($T = 100$ godina) raste na oko 48 l/s/m, pri čemu transmisija ostaje niska. Takav odziv upućuje na veću raspoloživost luke i manji operativni rizik. Suprotno tome, lukobran luke Ičići pokazuje znatno nepovoljnije stanje već pri $T = 5$ godina, kada specifični protok prelijevanja doseže približno 139 l/s/m, a u scenariju $T = 100$ godina raste do oko 802 l/s/m, uz izraženu transmisiju. To implicira učestala zapljuskivanja i povišenu vjerojatnost lokalnih pomaka zaštitnog sloja, što posljedično povećava potrebe za održavanjem i intervencijama. Budući da su koeficijenti refleksije usporedivi između konstrukcija, razlike u odzivu dominantno proizlaze iz geometrije krune i slobodne visine te iz karakteristika zaštitnog sloja, tj. iz sposobnosti konstrukcije da disipira energiju i ograniči prelijevanje pri povišenim razinama mora. Rezultati dodatno potvrđuju inženjerski kompromis između robusnosti i krajobraznog otiska: masivniji koncept ACI Marine postiže veću sigurnost i niže troškove održavanja u životnom vijeku, ali uz izraženiji vizualni utjecaj; troškovno optimizirani koncept luke Ičići zadržava otvorenije vizure, no zahtijeva sustavnije praćenje i češće lokalne sanacije.

Buduća istraživanja trebaju obuhvatiti vremenske serije *LiDAR* snimanja kako bi se kvantificirale stope deformacija, volumetrijske bilance i prostorna dinamika promjena zaštitnog sloja, uz uspostavu longitudinalnog monitoringa kao osnovu za njihovo pouzdano vremensko praćenje. Nadalje, primjena pretpostavki dubokovodnih valova ograničava apsolutnu točnost procjene lokalnih valnih uvjeta te budući radovi trebaju uključiti proširenje valnih analiza na širi raspon smjerova uz dosljedno modeliranje

transformacije valova do promatrane lokacije. U cjelini, periodično mobilno *LiDAR* praćenje pruža pouzdanu i primjenjivu osnovu za upravljanje obalnom infrastrukturom, omogućujući rano prepoznavanje degradacije, objektivno rangiranje rizika te ciljano i pravovremeno planiranje intervencija i sanacija.

Zahvala

Ovo istraživanje financirano je sredstvima Europske unije – NextGenerationEU, temeljem ugovora između Sveučilišta u Rijeci i Ministarstva znanosti, obrazovanja i mladih, u okviru projekta „Istraživanje mogućnosti prilagodbe i razvoj metodološkog okvira za prilagodbu obalnih građevina (OG) klimatskim promjenama“ i “Unaprjeđenje procjene rizika i prognoziranja složenih poplava u Hrvatskoj” te projektom 4SeaFlood (IP-2022-10-7598) Hrvatske zaklade za znanost.

Literatura

- ACI marina Opatija (n.d.). Dostupno na: <https://aci-marinas.com/marina/aci-opatija/> (Preuzeto: 29. siječnja 2026.).
- Allsop, N.W.H. and Channell, A.R. (1989) Wave reflections in harbours: reflection performance of rock armoured slopes in random waves. Report OD 102. Wallingford: HR Wallingford.
- Battjes, J.A. (1974) Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves. Report 74-2. Delft: Committee on Hydraulics, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.
- Briganti, R., van der Meer, J.W., Buccino, M. and Calabrese, M. (2004) ‘Wave transmission behind low-crested structures’, in Melby, J.A. (ed.) Proceedings of the 4th International Conference on Coastal Structures, Portland, OR, 26–30 August 2003. Reston, VA: ASCE.
- Burcharth, H.F., Sørensen, J.D. and Kim, S.-W. (2016) ‘Optimum breakwater safety levels based on life-cycle cost optimization’, DCE Technical Report No. 204. Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- Bujak, D., Carević, D. and Gilja, G. (2018) ‘The influence of the natural generators on discharge through the flushing culverts’, in Proceedings of the 7th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab18), Santander, Spain, 22–26 May 2018.
- CIRIA, CUR and CETMEF (2007) The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering. 2nd edn. C683. London: CIRIA.
- Chen, X., Lin, Y., Yang, X. and Zhao, S. (2025) ‘The tight-coupled SLAM system based on LiDAR and improved VGICP method for waterfront environments’. *Ocean Engineering*, 326, 120934.
- Cushman-Roisin, B., Gačić, M., Poulain, P.-M. and Artegiani, A. (2001) ‘Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future’. Dordrecht: Springer.
- d’Angremond, K., van der Meer, J.W. and de Jong, R.J. (1997) ‘Wave transmission at low-crested structures’, in Edge, B.L. (ed.) Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, FL, 2–6 September 1996, pp. 2418–2427. New York: ASCE.
- Galiatsatou, P., Makris, C. and Prinos, P. (2018) ‘Optimized reliability based upgrading of rubble mound breakwaters in a changing climate’. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(3), 92.
- Garcia-Williams, I.A., Starek, M.J., Williams, D.D., Tissot, P.E., Berryhill, J. and Gibeaut, J.C. (2025) ‘Application of MLS and UAS-SfM for Beach Management at the North Padre Island Seawall’. *Remote Sensing*, 17(23), 3908.
- Heritage, S. N. (2012). Offshore Renewables—guidance on assessing the impact on coastal landscape and seascape. SNH, Edinburgh, Scotland.
- Hydroexpert d.o.o. (2015) Analiza hidrodinamike mora za dogradnju luke Opatija: Knjiga 1 – Vjetrovalna klima i morske razine. Zagreb: Hydroexpert d.o.o. (interni elaborat).

- Lague, D., Brodu, N., and Leroux, J. (2013). 'Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ)'. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 82, 10-26.
- Landscape Institute and Institute of Environmental Management and Assessment (IEMA) (2013) *Guidelines for Landscape and Visual Impact Assessment*. 3rd edn. London: Routledge.
- Marecon d.o.o. (2024). *Popuna školjere na riječkom lukobranu – Izvedbeni projekt (građevinski projekt)*, Broj projekta: 46G/24. Rijeka, prosinac 2024.
- Petković, I., Šuput, N., Žigo, I., Krvavica, N. and Ružić, I. (2025) 'Application of remote sensing in the design and monitoring of coastal structures', *Coastal and Offshore Science and Engineering* (in press).
- Postma, G.M. (1989) *Wave reflection from rock slopes under random wave attack*. MSc thesis. Delft: Delft University of Technology.
- Puente, I., Sande, J., González-Jorge, H., Peña-González, E., Maciñeira, E., Martínez-Sánchez, J., and Arias, P. (2014). 'Novel image analysis approach to the terrestrial LiDAR monitoring of damage in rubble mound breakwaters'. *Ocean engineering*, 91, 273-280.
- Ruzgienė, B., Kuklienė, L., Kuklys, I., Jankauskienė, D. and Lousada, S. (2025) 'The use of kinematic photogrammetry and LiDAR for reconstruction of a unique object with extreme topography: a case study of Dutchman's Cap, Baltic seacoast, Lithuania'. *Frontiers in Remote Sensing*, 6, 1397513.
- Sofonia, J., Phinn, S., Roelfsema, C., and Kendoul, F. (2019). 'Observing geomorphological change on an evolving coastal sand dune using SLAM-based UAV LiDAR'. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2(4), 273-291.
- USACE (2002) *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual EM 1110-2-1100. Washington, DC: U.S. Army Corps of Engineers.
- van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. (2018) *Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: An Overtopping Manual Largely Based on European Research, but for Worldwide Application*. 2nd edn.
- Vos, S., Anders, K., Kuschnerus, M., Lindenbergh, R., Höfle, B., Aarninkhof, S., and de Vries, S. (2022). 'A high-resolution 4D terrestrial laser scan dataset of the Kijkduin beach-dune system, The Netherlands'. *Scientific Data*, 9(1), 191.
- Županijska lučka uprava Opatija – Lovran – Mošćenička Draga (2023). Dostupno na: <https://portopatija.hr/luka-opatija-icici/> (Preuzeto: 29. siječnja 2026.).