

ANALIZA PROMJENE OBALNE CRTE NA PLAŽI PLOČE

TONKA AJDUK ¹, DAMJAN BUJAK ¹, LOVRO ŠTEFAN ¹, HANNA MILIČEVIĆ ¹

¹ Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Republika Hrvatska

Sažetak

Dohranjivanje plaža često se primjenjuje radi očuvanja i povećanja površina namijenjenih turizmu i rekreaciji, pri čemu dolazi do promjena izvorne obalne linije. Iako su šljunčane plaže stabilnije od pješčanih, njihova morfodinamika pod djelovanjem okolišnih čimbenika još uvijek je nedovoljno istražena. Cilj ovoga rada je analizirati utjecaj vjetrovnih valova, prvenstveno juga, na promjene oblika obalne linije i površine zapadnog dijela umjetne šljunčane plaže Ploče u Rijeci. Promjene obalne linije praćene su pomoću nadzornog sustava kamera postavljenog na krov bazena Kantrida. Analizirano je petnaest fotografija prikupljenih tijekom dviju zimskih sezona (2020./2021. i 2021./2022.). Obalna linija određena je primjenom alata CoastSnap, dok su površine plaže izračunate u programu AutoCAD. Kako bi se smanjio utjecaj oscilacija razine mora, u analizu su uključene samo fotografije snimljene pri razinama mora bliskima srednjoj vrijednosti. Rezultati pokazuju smanjenje ukupne površine plaže tijekom zimskih mjeseci zbog erozije i prijenosa šljunka djelovanjem valova juga. Istočni dio plaže bilježi najveće gubitke površine, dok se zapadni dio povećava uslijed akumulacije materijala. Zaključno, vjetrovni valovi juga imaju dominantan utjecaj na pomicanje šljunka od istoka prema zapadu, a primjena daljinskog praćenja pokazala se učinkovitom za analizu morfodinamičkih promjena i planiranje održivih strategija dohranjivanja šljunčanih plaža.

Ključne riječi

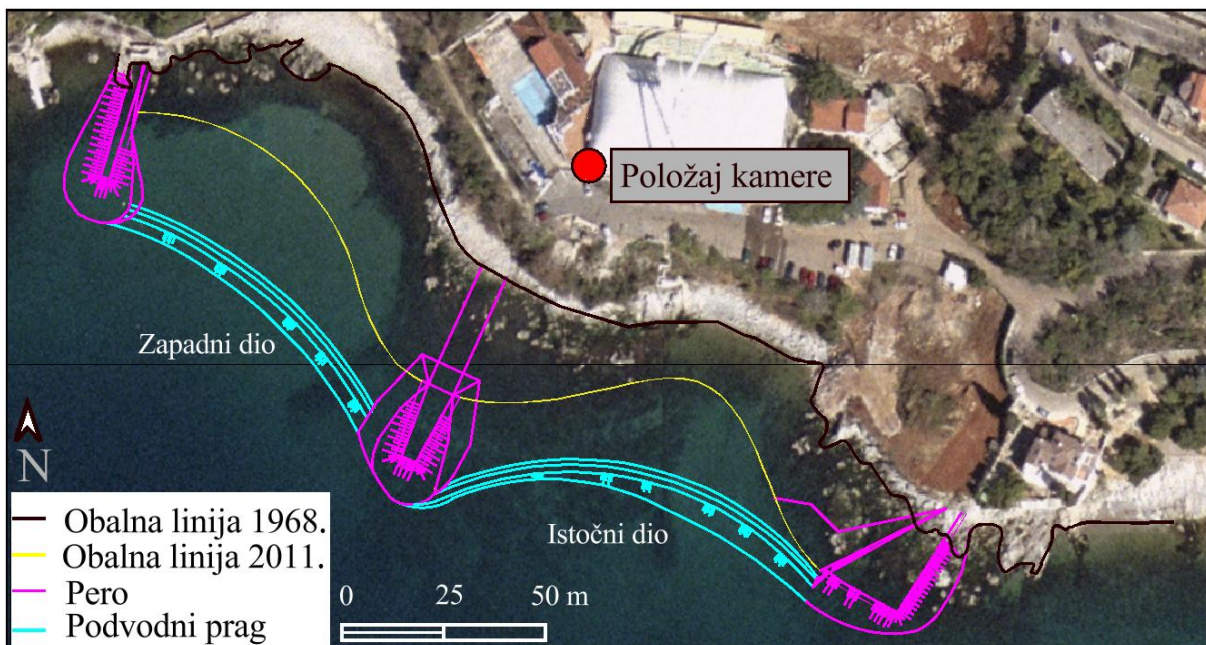
morfodinamika plaža, obalna crta, valna energija, daljinsko praćenje, erozija plaža

1 Uvod

Dohranjivanje plaža jedna je od najčešće primjenjivanih mjera za očuvanje i povećanje obalnih površina namijenjenih turizmu i rekreaciji, kako u svijetu tako i u Republici Hrvatskoj (Pikelj i dr., 2018). Takvim zahvatima mijenja se izvorni oblik obalne linije. Preduvjet za pravilno projektiranje, odnosno osiguranje dugoročne stabilnosti i funkcionalnosti dohranjenih plaža je istraživanje utjecaja okolišnih čimbenika. U tom kontekstu posebno je važno ispitati utjecaj valova. Istraživanja je moguće provesti u laboratorijskim uvjetima ili analizom podataka dobivenih terenskim mjerenjem (Van der Meer i Stam, 1992). Dosadašnji znanstveni radovi vezani na morfodinamiku plaža uglavnom su bili usmjereni na pješčane plaže, dok su šljunčane plaže, unatoč sve široj primjeni u praksi, znatno slabije zastupljene u literaturi (Anthony i dr., 2011). Šljunčane plaže se u posljednje vrijeme sve češće izvode jer su stabilnije od pješčanih i šljunčano-pješčanih, zahtijevaju manje količine materijala te je njihovo održavanje jednostavnije (Austin i Masselink, 2006). Također, šljunčane plaže funkcioniraju pri strmijem nagibu, što je prednost u uskim, prostorno ograničenim obalnim područjima. Unatoč navedenim prednostima, nedostatak pouzdanih podataka o ponašanju šljunka izloženog prirodnim čimbenicima otežava primjenu postojećih empirijskih modela razvijenih za pješčane plaže te vodi do proračunske nesigurnosti.

U ovom radu analizirana je umjetna šljunčana plaža Ploče (Slika 1), smještena u zapadnom dijelu grada Rijeke. Plaža je izgrađena dohranjivanjem izvorno stjenovite obale šljunkom frakcije $D_{50} = 16 - 32$ mm dopremljenim iz pozajmišta na Dravi (Bujak i dr., 2023a). Time je dobivena nova obalna linija te je osigurana nova korisna

površina za turističku i rekreativnu aktivnost. Na zapadnom i istočnom kraju plaže izveden je po jedan mol za osiguranje stabilnosti šljunka, dok središnje pero duljine 30 m služi za sprječavanje prijenosa materijala duž plaže koju dijeli na zapadni i istočni dio (Bujak i dr., 2023a). Ovaj rad fokusiran je na zapadni dio plaže Ploče.



Slika 1. Promjena položaja obalne linije plaže Ploče (1968. - 2011.) i prikaz izvedenih obalnih građevina (Prilagođeno prema Bujak i dr., 2023a)

Valovi su dominantni uzrok pomicanja obalne linije na promatranj lokaciji. Prosječne visine valova u Kvarnerskom zaljevu su zbog njegove zatvorenosti relativno male, oko 40 cm, a najizraženiji utjecaj imaju valovi koje generira vjetar jugo, koji puše sa smjera jugoistoka i najčešće u zimskom razdoblju (Bujak i dr., 2023b). U kombinaciji s povišenom razinom mora takvi valovi imaju povećan doseg u unutrašnjost plaže što može rezultirati poplavlivanjem plaže i intenzivnijim pomicanjem šljunka (Bujak i dr., 2023b). S druge strane, jake oborine mogu šljunak pomicati prema moru i povećati površinu plaže. Antropogeni utjecaj također je prisutan kroz izravnavanje nanosa i dohranjivanje erodiranog dijela plaže, što utječe na praćenje prirodnih promjena i pouzdanost prikupljenih podataka.

Ponašanje dohranjenih plaža često se analizira na temelju empirijskih formula, koje zbog pojednostavljenja ne opisuju u potpunosti fizikalne procese i vremenski promjenjivu morfologiju plaže, što može dovesti do odstupanja u procjeni poplavnog dosega (Didier i dr., 2015). Takva odstupanja su osobito izražena na obalama s većim nagibima i složenom topografijom (Ramirez i dr., 2016; Vousdoukas i dr., 2016) što je karakteristično za šljunčane plaže. Numerički modeli, poput SWASH-a ili FUNWAVE-a, omogućuju detaljniji opis interakcije valova i obale, no zahtijevaju složeno definiranje graničnih uvjeta i kvalitetne ulazne podatke (Gomes da Silva i dr., 2020). Dok se prethodno navedeni modeli bave hidrodinamikom valova, modeli poput XBeach i XBeach-G se bave i morfološkim odzivom plaže na valove. Zato se u istraživanju dohranjenih plaža, pogotovo u uvjetima ograničenih mjerenja, naglašava važnost analize temeljene na stvarnim opažanjima i terenskim podacima.

U ovom radu primijenjen je pristup praćenja promjene površine umjetno formiranog dijela plaže Ploče pomoću sustava za video-nadzor, s ciljem analize utjecaja vjetrovnih valova na promjene oblika obalne linije i površine plaže. Analiza je provedena za odabrane uvjete mirne površine mora i razine mora unutar ± 5 cm od srednje vrijednosti određene na temelju podataka Copernicus Marine Service, dok je obrada snimaka provedena korištenjem alata CoastSnap (Harley i dr., 2019).

2 Metode

Analiza promjene obalne linije na plaži Ploče provedena je na temelju snimaka dobivenih sustavom za video-nadzor postavljenim u neposrednoj blizini istraživane lokacije. Istraživanje je obuhvatilo isključivo zapadni dio plaže. Odabir zapadnog dijela plaže temelji se na njegovoj prostornoj izdvojenosti i jasno definiranim granicama, budući da je odvojen središnjim i zapadnim rubnim molom. To omogućuje praćenje promjena obalne linije bez značajnijeg utjecaja uzdužnog prijenosa materijala s istočnog dijela plaže. U analizu su uključeni podaci prikupljeni tijekom zimskih razdoblja, dok su razdoblja sezonskog održavanja plaže isključena.

Kako bi se umanjio utjecaj oscilacija razine mora na položaj obalne linije, analizirani su samo zapisi kod kojih je razina mora bila blizu srednje vrijednosti. Podaci o razinama mora preuzeti su iz sustava Copernicus Marine Service, koji pruža satne razine mora za područje Sredozemnog mora. Utvrđena je prosječna razina mora na lokaciji plaže Ploče od $-0,463$ m (unutar vertikalnog koordinatnog sustava prema Copernicus Marine Service), a kao mjerodavni odabrani su zapisi snimljeni kada je razina bila unutar ± 5 cm odstupanja od srednje razine, odnosno u rasponu od $-0,413$ i $-0,513$ m. Time je ograničen utjecaj plime i oseke te osigurana usporedivost snimaka u vremenu. Procijenjena pogreška određivanja razine mora iznosi $3,24$ cm što je prihvatljivo s obzirom na male dnevne oscilacije razine mora u Jadranskom moru.

Sustav za video-nadzor sastoji se od dvije kamere visoke rezolucije (4096×3000 piksela) postavljene na krov bazena Kantrida (Slika 2), na visinu od $13,75$ m iznad razine mora, čime je osiguran stabilan i neometan pogled na zapadni dio plaže (Bujak i dr., 2023a). Kamere kontinuirano snimaju zapadni dio plaže Ploče. Iz videozapisa su izdvojene pojedinačne fotografije pogodne za daljnju obradu, pri čemu su odabrane samo snimke s povoljnim vremenskim uvjetima, bez oborina i s jasno vidljivom obalnom linijom. Analizirano je 15 fotografija prikupljenih tijekom dviju zimskih sezona, 2020./2021. i 2021./2022.



Slika 2. Položaj nadzornog sustava na krovu bazena Kantrida

Na odabranim fotografijama provedene su kalibracija i georektifikacija kako bi se omogućilo određivanje stvarnog položaja obalne linije u prostoru. Georektifikacija je provedena u programskom alatu CoastSnap, koji omogućuje pridruživanje stvarnih prostornih koordinata pikselima slike na temelju unaprijed definiranih fiksnih točaka čiji se položaj u prostoru ne mijenja (Harley i dr., 2019). Položaj fiksnih točaka određen je geodetskim mjerenjima, a procijenjena dopuštena pogreška georektifikacije iznosi približno $3,8$ piksela, što je prihvatljivo s obzirom na razmjere promatranih promjena.

Nakon georektifikacije, na svaku fotografiju postavljeni su linijski presjeci (transekti) u razmacima od 2 m, približno okomiti na smjer obalne linije. Na promatranom, zapadnom dijelu plaže postavljeno je 59 transekata. Obalna linija određena je spajanjem točaka presjeka transekata i obale primjenom CCD algoritma, uz mogućnost ručne korekcije u slučajevima smanjene vidljivosti obalne linije zbog vremenskih ili povremenih antropogenih utjecaja.

Dobivene koordinate obalne linije unesene su u AutoCAD, gdje su izračunate širine i površine plaže te njihove promjene u vremenu. Kao mjerodavna površina definirano je područje prekriveno šljunkom frakcije $D_{50} = 16 - 32$ mm koje se nalazi izvan mora i koristi u rekreativne i turističke svrhe, dok su krupniji kameni elementi promjera većeg od 0,2 m isključeni iz analize. Duljina svakog transekta pomnožena je njihovim razmakom, a zbroj dobivenih vrijednosti predstavlja ukupnu površinu plaže u određenom trenutku. Na temelju promjena površine i oblika obalne linije analiziran je smjer i intenzitet pomicanja šljunka tijekom promatranih razdoblja.

3 Rezultati

Analiza promjena položaja obalne linije i površine plaže provedena je za dvije uzastopne zimske sezone, 2020./2021. i 2021./2022., pri čemu su uspoređene pozicije obalne linije na početku i kraju svakog razdoblja. Promjene su analizirane na temelju georektificiranih snimaka i pripadajućih izračuna površina dobivenih primjenom transekata. Razmatran je zapadni dio plaže, od istočnog dijela odvojen središnjim molom. Radi lakšeg uočavanja prostornih promjena, analizirani zapadni dio dodatno je podijeljen na tri segmenta: zapadni, središnji i istočni, te se svi rezultati u nastavku odnose na takvu podjelu površine plaže.

Tablica 1. Prikaz površina 2020. / 2021.

Datum i vrijeme	Zapadni dio (m ²)	Središnji dio (m ²)	Istočni dio (m ²)	Ukupna površina (m ²)
08.10.2020., 08:04	485	402	259	1146
18.11.2020., 09:13	478	400	257	1135
01.12.2020., 08:03	506	403	255	1164
07.01.2021., 07:13	465	404	207	1076
02.02.2021., 16:02	554	441	218	1213
13.03.2021., 15:02	579	468	214	1261
07.04.2021., 14:02	535	448	227	1210

Tablica 2. Prikaz površina 2021. / 2022.

Datum i vrijeme	Zapadni dio (m ²)	Središnji dio (m ²)	Istočni dio (m ²)	Ukupna površina (m ²)
10.09.2021., 10:02	494	445	315	1254
01.10.2021., 10:02	508	461	283	1252
01.11.2021., 08:02	503	436	271	1210
14.12.2021., 09:02	512	458	250	1220
03.01.2022., 09:14	516	458	257	1231
01.02.2022., 10:02	535	453	266	1254
03.03.2022., 08:02	515	442	255	1212
02.04.2022., 13:02	515	456	260	1231

Tablica 1 i Tablica 2 prikazuju promjene ukupne površine plaže kao i promjene površina pojedinih dijelova plaže u odabranim vremenskim trenucima. Položaj obalne linije na početku i kraju obje promatrane zimske sezone prikazani su na slikama (Slika 4 i Slika 5).

Tijekom sezone 2020./2021. ukupna površina plaže promijenila se s 1146 m² u listopadu 2020. godine na 1210 m² u travnju 2021. (Tablica 1). Unatoč povećanju ukupne površine na kraju promatranog razdoblja, podaci ukazuju na izražene gubitke tijekom zimskih mjeseci, osobito na istočnom dijelu plaže, koji se smanjio s 259 na 227 m², što je gubitak više od 30 m². Promjena položaja obalne linije u toj sezoni prikazana je na Slici 4, gdje je vidljivo povlačenje obalne linije na istočnom dijelu i istodobno pomicanje prema moru na zapadnom dijelu plaže. Valja napomenuti kako se i tijekom zimske sezone znaju provoditi građevinske intervencije koje utječu na promjene obalne linije unutar ove studije, kao što se to dogodilo 8.1.2021. u 9 sati (Slika 3). Navedeno je također vidljivo iz Tablice 1 gdje između 7.1.2021. i 2.2.2021. postoji skok u raspoloživoj površini plaže.

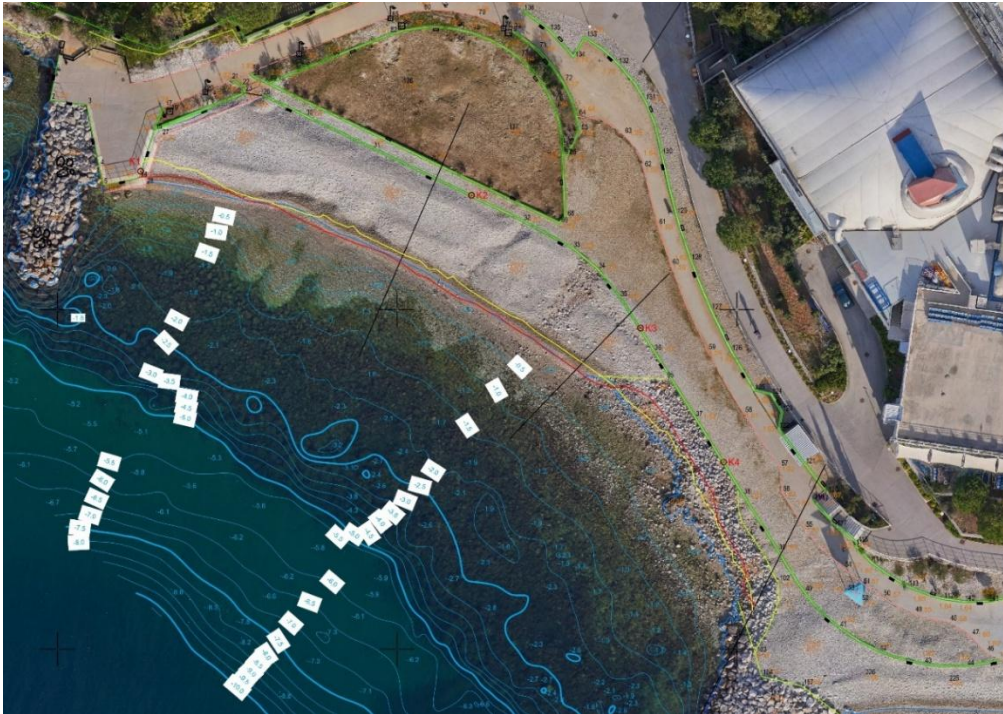


Slika 3. Građevinska intervencija na plaži Ploče (8.1.2021.)

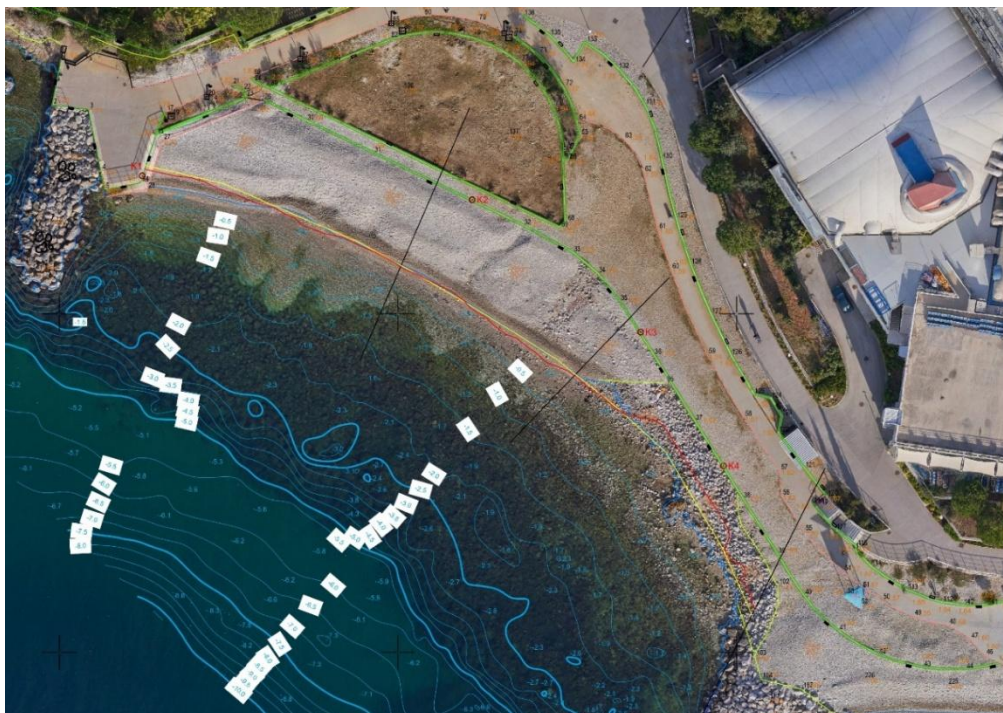
U sezoni 2021./2022. zabilježeno je smanjenje ukupne površine plaže, s 1254 m² u rujnu 2021. na 1231 m² u travnju 2022. (Tablica 2). Najveće promjene ponovno su zabilježene na istočnom dijelu plaže, čija se površina smanjila s 315 na 260 m², odnosno za više od 50 m². Položaj obalne linije na početku i kraju ovog razdoblja vidljiv je na Slici 5, gdje je uočljivo značajno povlačenje šljunka s krajnjeg istočnog dijela plaže.

Za razliku od istočnog dijela, zapadni dio plaže u obje sezone pokazuje povećanje površine. U razdoblju 2020./2021. zapadni dio povećao se za oko 50 m², a 2021./2022. za oko 20 m². Središnji dio plaže pokazuje promjenjivo ponašanje s povećanjem površine u obje sezone, što upućuje na privremeno zadržavanje materijala.

Usporedba rezultata pokazuje dosljedan prostorni obrazac promjena u obje promatrane sezone. Uočava se pomicanje šljunka s istoka prema zapadu, uz eroziju istočnog i akumulaciju zapadnog dijela plaže, što je jasno vidljivo i iz tabličnih podataka i prikaza obalne linije na slikama. Promjene površine plaže ne moraju nužno odgovarati promjenama volumena materijala koje ovise i o lokalnom nagibu plaže.



Slika 4. Pozicija obalne linije listopad 2020. (žuto) / travanj 2021. (crveno)



Slika 5. Pozicija obalne linije rujan 2021. (žuto) / travanj 2022. (crveno)

4 Zaključak

U ovom radu analizirane su promjene položaja obalne linije i površine zapadnog dijela umjetne šljunčane plaže Ploče u Kvarnerskom zaljevu, s ciljem utvrđivanja dominantnih procesa koji utječu na njezinu stabilnost. Analiza je provedena na temelju podataka prikupljenih tijekom dviju zimskih sezona (2020./2021. i 2021./2022.), kada su valni uvjeti najizraženiji, a promjene obalne linije najvidljivije.

Rezultati pokazuju da promjene obalne linije i raspodjele šljunka nisu prostorno jednolike. Najizraženije promjene zabilježene su na istočnom dijelu plaže, gdje dolazi do erozije i smanjenja korisne površine, dok se istodobno na zapadnom dijelu bilježi akumulacija materijala i povećanje površine. Središnji dio plaže pokazuje promjenjivo ponašanje s oscilacijama površine, ovisno o trenutačnim uvjetima valovanja i redistribuciji šljunka unutar sustava. Ovakav obrazac promjena ponavlja se u obje promatrane sezone, s različitim intenzitetom.

Analiza podataka upućuje na to da dominantni utjecaj na stabilnost plaže imaju vjetrovni valovi uzrokovani vjetrom jugo, koji puše iz smjera jugoistoka. Ti valovi potiču prijenos šljunka duž obale od istoka prema zapadu, što vodi do erozije istočnog i akumulacije zapadnog dijela plaže. Tijekom jačih olujnih događaja moguće je i privremeno formiranje nanosa na središnjem i zapadnom dijelu, što lokalno mijenja položaj obalne linije. Takve promjene često su praćene antropogenim intervencijama kojima se obalna linija vraća u željeni položaj prije početka turističke sezone.

Za točnost analize pokazalo se važnim odabrati razdoblja s mirnom površinom mora i razinom mora bliskom srednjoj vrijednosti, čime se smanjuje utjecaj oscilacija razine mora na položaj obalne linije. Time je omogućeno jasnije razdvajanje promjena uzrokovanih valovima od ostalih utjecaja.

Predložena metodologija, koja se temelji na praćenju pomoću sustava kamera u kombinaciji s programskim alatom CoastSnap, omogućuje jednostavno i ekonomično praćenje morfodinamike šljunčanih plaža tijekom olujnih razdoblja. Takav pristup podupire kvalitetnu provedbu planova upravljanja pomorskim dobrom, posebno u segmentu plaža. Rezultati dugotrajnih terenskih kampanja mogu poslužiti kao pouzdana osnova za projektiranje hidrotehničkih zahvata na obali i povećanje stabilnosti plaža, s ciljem dugoročnog smanjenja operativnih troškova kontinuiranog dohranjivanja.

Literatura

- Austin, M.J. and Masselink, G. (2006) 'Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach', *Marine Geology*, 229, pp. 59–77.
- Anthony, E.J., Cohen, O. and Sabatier, F. (2011) 'Chronic offshore loss of nourishment on Nice beach, French Riviera: A case of over-nourishment of a steep beach?', *Coastal Engineering*, 58, pp. 374–383.
- Bujak, D., Miličević, H., Carević, D. and Ilić, S. (2023a) 'Beach area evolution of an artificial gravel pocket beach using video monitoring systems', *Coastal and Offshore Science and Engineering*. doi: 10.53256/COSE_230104.
- Bujak, D., Ilić, S., Miličević, H. and Carević, D. (2023b) 'Wave runup prediction and alongshore variability on a pocket gravel beach under fetch-limited wave conditions', *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, p. 614.
- Copernicus Marine Service (n.d.) *Mediterranean Sea Physical Reanalysis Product*. Available at: https://data.marine.copernicus.eu/product/MEDSEA_MULTIYEAR_PHY_006_004/description
- Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R. and Van-Wiersts, S. (2015) 'Coastal flood assessment based on field debris measurements and wave runup empirical model', *Journal of Marine Science and Engineering*, 3, pp. 560–590.
- Harley, M.D., Kinsela, M.A., Sanchez-Garcia, E. and Vos, K. (2019) 'Shoreline change mapping using crowd-sourced smartphone images', *Coastal Engineering*, 150, pp. 175–189.
- Pikelj, K., Ružić, I., Ilić, S., James, M.R. and Kordić, B. (2018) 'Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia', *Ocean & Coastal Management*, 156, pp. 223–238.
- Ramirez, J.A., Lichter, M., Coulthard, T.J. and Skinner, C. (2016) 'Hyper-resolution mapping of regional storm surge and tide flooding: Comparison of static and dynamic models', *Natural Hazards*, 82, pp. 571–590.

- Van der Meer, J.W. and Stam, C.J.M. (1992) 'Wave runup on smooth and rocky slopes of coastal structures', *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 118, pp. 534–550.
- Vousdoukas, M.I., Voukouvalas, E., Mentaschi, L., Dottori, F., Giardino, A., Bouziotas, D., Bianchi, A., Salamon, P. and Feyen, L. (2016) 'Developments in large-scale coastal flood hazard mapping', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, pp. 1841–1853.