

## Morfodinamika i održivost nasipane šljunčane plaže – primjer plaže Ploče u Rijeci

Filip Kalinić<sup>1</sup>, prof. dr. sc. Goran Lončar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tehničko veleučilište u Zagrebu, fkalinic@tvz.hr

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, goran.loncar@grad.unizg.hr

### Sažetak

Tijekom nekoliko ekstremnih valnih situacija u prosincu 2019. i siječnju 2020. godine došlo je do erozije velike količine nasipanog šljunčanog materijala plaže Ploče u Rijeci. Za potrebe analize morfodinamike nasipnog materijala plaže Ploče u uzdužnom smjeru (longshore transport) primijenjen je numerički model koji sadrži dva spregnuta modula. Prvi tretira valne deformacije u akvatoriju plaže, a drugi morfodinamiku u uzdužnom profilu plaže. Za rubne uvjete modela valnih deformacija korišteni su podaci o valovima s polusatnom rezolucijom iz valografske postaje smještene u neposrednoj blizini plaže.

*Ključne riječi: numerički model, pronos šljunka, plaža Ploče, grad Rijeka*

## Morphodynamics and sustainability of the artificial gravel beach - the example of Ploče beach in Rijeka

### Abstract

A large amount of gravel material eroded from Ploče Beach in Rijeka during several extreme wave situations in December 2019 and January 2020. The analysis of morphodynamics of gravel material from Ploče Beach in longitudinal direction (longshore transport) was performed by numerical model containing two coupled modules. The first is related to wave deformations in the water area of the beach, and the second one concerns morphodynamics in the longshore profile of the beach. Half-hour wave data from a wave motion sensor located near the beach was used for boundary conditions of the wave deformation model.

*Key words: numerical model, gravel transport, Ploče beach, City of Rijeka*

## 1 Uvod

Kako bi se postigla željena kvaliteta rekreacijske usluge na plažama, često se prirodna obalna linija dodatno nasipava šljunčanim materijalom. S obzirom na visoku cijenu dohrane plaže sa šljunčanim materijalom, potrebno je racionalno odabrati samu poziciju nasipavanja i odgovarajući nasipni materijal. Djelovanje valova uzrokuje morfološku aktivnost u obliku erozije i sedimentacije (akumulacije) nasipnog materijala. Pronos nasipnog materijala (morfodinamika) se odvija u poprečnom i uzdužnom smjeru, pri čemu su najintenzivnije poprečne promjene u zoni svoša vala [1]. Erodირani materijal se odnosi u veće dubine, gdje se trajno zadržava (akumulacija) ili nastavlja svoje potpovršinsko kretanje u uzdužnom smjeru plaže [2]. Kod umjetnih (nasipanih) šljunčanih plaža moguć je izostanak daljnjih valnih situacija u kojima se pridneno istaloženi (akumulirani) nasipni materijal ponovno izvlači na lice plaže [3]. Valne situacije koje uzrokuju regeneraciju materijala uobičajeno su vezane uz dulje valne periode i manje valne visine, a što izostaje u slučaju poluzatvorenog akvatorija riječkog zaljeva. Inicijalni nagib lica plaže i izabrane fizikalne karakteristike nasipnog plažnog materijala primarno određuju morfodinamičku senzibilnost pojedine plaže [4]. Tako je morfodinamika plaže od kompozitnog materijala (npr. pijeska i šljunka) različita od morfodinamike plaža od čistog šljunka [6]. Također je potrebno napomenuti da univerzalna kvantifikacija pronosa sedimenta šljunka na načelima temeljne fizike do danas još uvijek nije dana [5]. Važan napredak ostvaren je prepoznavanjem i uspješnim opisom infiltracijsko-eksfiltracijskog procesa procjeđivanja u tijelu šljunčane plaže [6]. Recentni programi monitoringa morfodinamičkih karakteristika šljunčanih plaža uobičajeno se oslanjaju na primjenu optičkih i akustičkih mjerenja. Time se prate kratkoročne [7] i dugoročne [8] promjene profila plaža. Do sada su izvedeni i empirijski modeli ravnotežnog poprečnog profila pješćane ili šljunčane plaže [9]. Međutim, usporedba rezultata primjene empirijskih obrazaca i izmjerenih prirodnih profila šljunčanih plaža pokazala je da primjena empirijskih obrazaca ima uporište samo u slučaju homogenih okolišnih uvjeta [10]. Za analizu morfodinamike plaže s mješovitim ili pretežito šljunčanim materijalom razvijen je relativno mali broj numeričkih modela [11, 12, 13].

U ovom radu prezentirani su rezultati provedbe numeričkih simulacija za morfodinamiku šljunčane plaže Ploče (Rijeka) pri djelovanju gravitacijskih vjetrovnih valova. Implementacija numeričkog modeliranja ostvarena je kroz dva koraka. U prvom je uspostavljen numerički model valnih deformacija za akvatorij uokolo plaže, te su njime izračunana polja značajnih valnih visina  $H_s$ , vršnih valnih perioda  $T_p$  i incidentnog smjera valovanja za ekstremnu situaciju valovanja u razdoblju 20. do 22. prosinca 2019. Na otvorenim granicama prostorne domene numeričkog modela (rubni uvjeti) primijenjeno je forsiranje s izmjerenim vrijednostima  $H_s$  i  $T_p$  na obližnjoj valografskoj postaji. U drugom koraku primijenjen je numerički model morfodinamike u

uzdužnom smjeru šljunčane plaže s ciljem prepoznavanja zona erozije i akumulacije nasipnog materijala plaže.

Detaljna geodetska snimka terena obavljena je 16. siječnja 2020. U tom danu zamijećene su izraženije zone lokalne erozije/akumulacije materijala uzduž plaže. Dana 1. veljače 2020. izvedena je dohrana plaže sa  $50 \text{ m}^3$  šljunčanog materijala frakcije  $d_{50} = 20 \text{ mm}$ , a nakon toga (7. veljače 2020.) ponovljena je i detaljna geodetska snimka terena. Budući da autori nisu na raspolaganju imali detaljnu snimku terena neposredno prije nastupa ekstremne epizode valovanja (20. do 22. prosinca 2019.), pretpostavili smo da detaljna snimka plaže od 7. veljače 2020., nakon dohrane plaže 1. veljače 2020., približno opisuje i stanje koje je prethodilo pojavi ekstremnog valovanja. Stoga je geodetska snimka napravljena 7. veljače 2020. usvojena za opis početnog stanja, a geodetska snimka od 16. siječnja 2020. pretpostavljena za opis konačnog stanja nakon ekstremne situacije valovanja.

U poglavlju 2 dan je uvid u korištene podloge pomoću kojih je omogućena provedba numeričkih simulacija te su dane najosnovnije informacije o početnim/rubnim uvjetima i odgovarajućoj parametrizaciji primijenjenog numeričkog modela. Rezultati provedbe numeričkih simulacija prikazani su u poglavlju 3, a u četvrtom poglavlju navode se zaključni komentari.

## 2 Materijali i metode

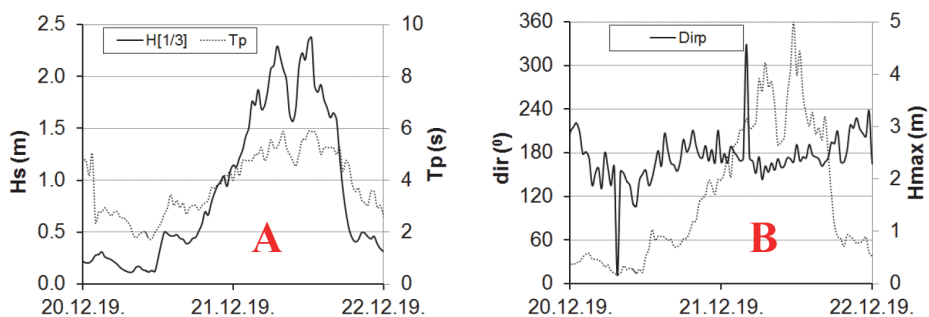
### 2.1 Raspoložive podloge

Plaža Ploče nalazi se u središnjem dijelu obalne linije grada Rijeke (slika 1.a). Plaža je srednjim perom izvedenim kao školjera podijeljena na “zapadni” i “istočni” dio. Ukupna duljina kupališnog dijela plaže je 210 m, pri čemu je zapadna plaža duga 120 m, a istočna 90 m. Širina nadmorskog dijela plaže varira između 8 i 15 m.

Za mjerenje valova na poziciji V1 ( $\varphi = 45^\circ 19,588' \text{ N}$ ;  $\lambda = 14^\circ 23,738' \text{ E}$ , WGS 84, slika 1B) korišten je valograf tvrtke Datawell koji se sastoji od plutače (tipa MKIII) s ugrađenim GPS prijemnikom i digitalnim uređajem za registriranje podataka. Valografski bilježeni podaci sadržavaju standardne valne statistike za periode od 30 minuta (slika 2.). U promatranoj situaciji izmjereni maksimum značajne valne visine iznosio je  $H_s = 2,37 \text{ m}$  (21. prosinca 2019. 12:30), s pripadnom maksimalnom visinom vala  $H_{MAX} = 4,44 \text{ m}$ , pripadnim vršnim spektralnim periodom  $T_p = 5,88 \text{ s}$ , pri incidentnom smjeru valovanja  $Dir = 168.8^\circ$ . Treba napomenuti da je maksimalna valna visina iz cijele situacije registrirana nešto ranije, istog dana u 11:30, te je iznosila  $H_{MAX} = 5,0 \text{ m}$ .

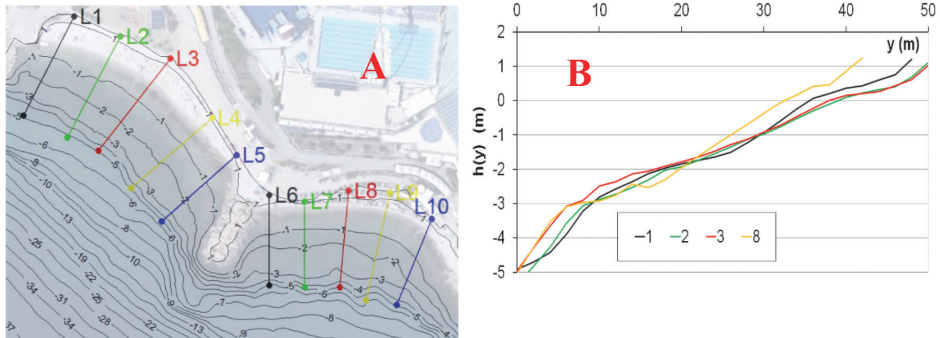


Slika 1. a) Pregledna karta šireg područja s naznakom lokacije provedenog istraživanja; b) Pozicija valografske postaje V1; c) Prikaz plaže prije pojave ekstremnih epizoda valovanja



Slika 2. Vremenske serije  $H_s$  (A) i  $T_p$  (A), te  $Dirp$  (B) i  $H_{max}$  (B) u polusatnoj rezoluciji za razdoblje ekstremne situacije 20. do 22. prosinca 2019. (registrirano na valografskoj postaji V1)

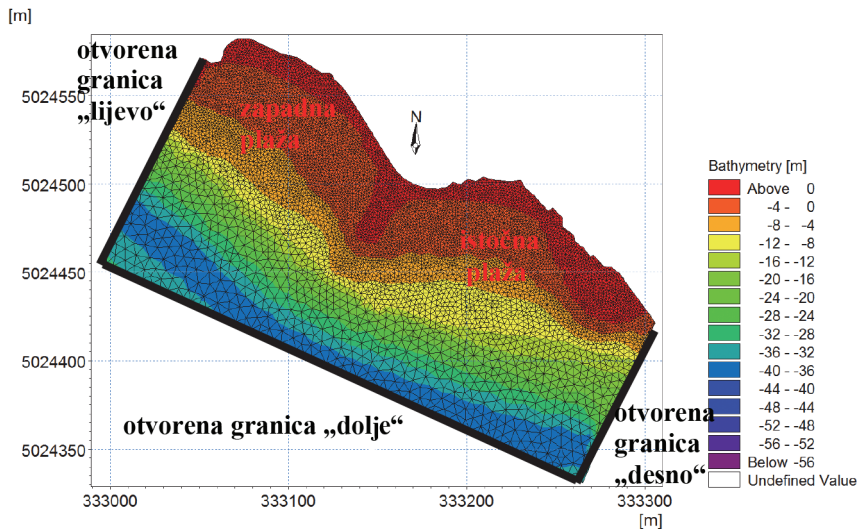
Prva geodetska situacija izmjerena je 16. siječnja 2020. (slika 3.). Laboratorijskim ispitivanjem granulometrijskog sastava plažnog materijala dobiven je  $d_{50} = 20$  mm (promjer zrna 50 % učešća iz granulometrijske krivulje ispitnog uzorka)



Slika 3. a) Izmjerena geodetska situacija 16. siječnja 2020.; b) Izmjereni poprečni profili plaže 1, 2, 3 i 8

## 2.2 Model valnih deformacija

Prostorna domena numeričkog modela valnih deformacija i primijenjena modelska diskretizacija s konačnim volumenima prikazane su na slici 4.



Slika 4. Prostorna domena numeričkog modela valnih deformacija i diskretizacija modelske prostorne domene s nestrukturiranom mrežom konačnih volumena na batimetrijskoj podlozi

Udaljenost između numeričkih čvorova, smještenih u težište površine svakog konačnog volumena, varijabilna je i proteže se od 9 m u dubokovodnom području do 0,5 m u zoni same obalne crte. Provedbom numeričkih simulacija za situacije 1 i 2 dobivaju se polusatno usrednjena polja značajnih valnih visina  $H_s$ , vršnih perioda  $T_p$  i incidentnih smjerova valne propagacije. Izmjerene vremenske serije značajnih valnih visina  $H_s$ , vršnih valnih perioda  $T_p$  i pripadnih incidentnih smjerova valne propagacije na valografskoj postaji V1 s polusatnom rezolucijom podataka upotrijebljene su za modelsko forsiranje na otvorenim granicama numeričkog modela valnih deformacija (rubni uvjeti). Početni uvjeti su definirani nultim valnim spektrom (odsutnost inicijalnog valnog gibanja). Hod morskih razina uzet je u obzir putem sedam osnovnih konstituenata plimnog signala za analizirani akvatorij [14].

Numeričke simulacije valnih deformacija provedene su sa spektralnim numeričkim modelom Mike 21sw ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)). Diskretizacija spektralne frekvencijske domene provedena je kroz logaritamsku skalu, uz usvajanje minimalne frekvencije 0,1 Hz (valni period 10 s) i maksimalne frekvencije 1,75 Hz (valni period 0,57 s). Korišteno je 30 diskretnih koraka. Model proračunskim procedurama obuhvaća procese međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije, difrakcije, oplicavanja i loma valova u području malih dubina, te utjecaja pridnenog trenja.

### 2.3 Model uzdužnog transporta (long shore transport model)

Model morfodinamike proračunava promjenu pozicije obalne linije s obzirom na usvojenu referentnu liniju. Model je baziran na “teoriji jedne linije”, u kojoj jednadžba kontinuiteta za volumen šljunčanog sedimenta plaže glasi:

$$\frac{\partial y_c}{\partial t} = -\frac{1}{h_{act}} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{q_{sou}}{h_{act} \Delta x} \quad (1)$$

gdje je:  $y_c$  pozicija obale u poprečnom smjeru,  $t$  vrijeme,  $Q$  intenzitet dužobalnog transporta,  $x$  pozicija obale u uzdužnom smjeru,  $Q_{sou}$  član izvora sedimenta,  $h_{act}$  aktivna visina poprečnog profila.

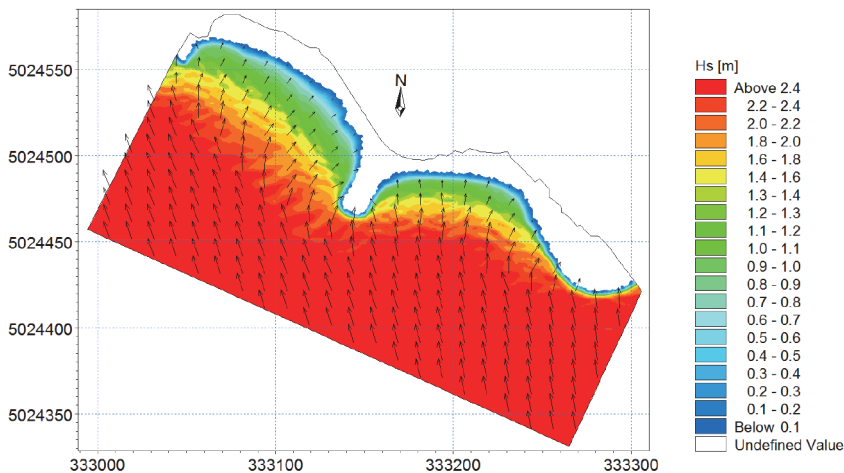
S obzirom na to da središnje pero (slika 1C) predstavlja granicu koja fizički razgraničuje “zapadnu” i “istočnu” plažu, one se mogu promatrati kao dvije odvojene cjeline. Jednadžba 1 rješava se u sklopu softvera okruženja Mike/LPFM (<http://www.dhigroup.com>). Udio inercijalnih sila i utjecaj nagiba plaže interpretirano je prema radu Engelunda i Fredsøea [15]. Za opis nestacionarnih pridnenih naprezanja korištena je formulacija valnog turbulentnog graničnog sloja [16], a orbitalne brzine vala izračunane su prema metodologiji predloženoj u radovima Doeringa i Bowena [17]. Produkcija turbulentne kinetičke energije pri lomu neregularnih valova izračunana je na temelju primjene modela turbulencije od autora Battjesa i Janssena



[18]. Važna komponenta uspostave morfodinamičkog modela je izbor vrijednosti konstanti (parametrizacija modela). U okviru provedenih simulacija usvojene su sljedeće vrijednosti: poroznost 0.4, dinamički koeficijent trenja 0.7, statički koeficijent trenja 1.4, bezdimenziojski koeficijent  $\alpha$  4.6, koeficijent povlačenja 1.4, hidrodinamički koeficijent mase 0.5. Rješavanje sustava jednačbi provodi se implicitnom Crank-Nicholsonovom shemom. Rubni uvjeti ovog modela ( $H_s$ ,  $T_p$  i  $\alpha$ ) dobivaju se ekstrakcijom rezultata u početnim točkama poprečnih profila 1-10 na dubini 5m (slika 3).

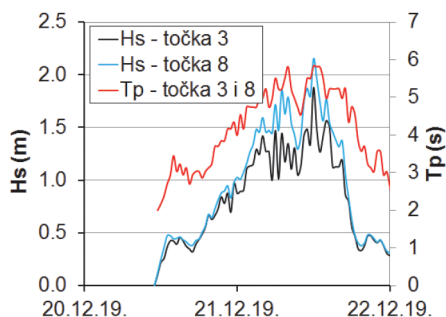
### 3 Rezultati numeričkih simulacija

Slika 5 prikazuje modelsko polje  $H_s$  u terminu registriranja maksimalne vrijednosti  $H_s$  tijekom ekstremne situacije (21. prosinca 2019 12:30). Prikazano polje upozorava na difrakciju oko središnjeg pera i refrakciju valova ispred lica zapadne plaže. Zbog refrakcije dolazi do povećanja kuta  $\beta$  između smjera propagacije valova i obalne linije u zoni poprečnih profila 1 - 5 ( $\beta \approx 0^\circ \rightarrow \beta \approx 45^\circ$ ). Treba napomenuti da u uvjetima  $\beta = 0^\circ$  nema uzdužnog ni poprečnog pronosa sedimenta, pri  $\beta = 45^\circ$  uzdužni (longshore) pronos sedimenta je maksimalan, a u slučaju  $\beta = 90^\circ$  pronos sedimenta se odvija samo u poprečnom smjeru. Valno polje ispred istočne plaže ima malo drugačija obilježja. Difrakcija oko desnog pera nema izraženi utjecaj, a refrakcija djeluje na način da se povećava kut  $\beta$  od početnog  $\approx 45^\circ$  do krajnjeg  $\approx 90^\circ$ . U ovakvim uvjetima valovanja očekuje se smanjenje pronosa šljunka u uzdužnom smjeru i povećanje pronosa u poprečnom smjeru.



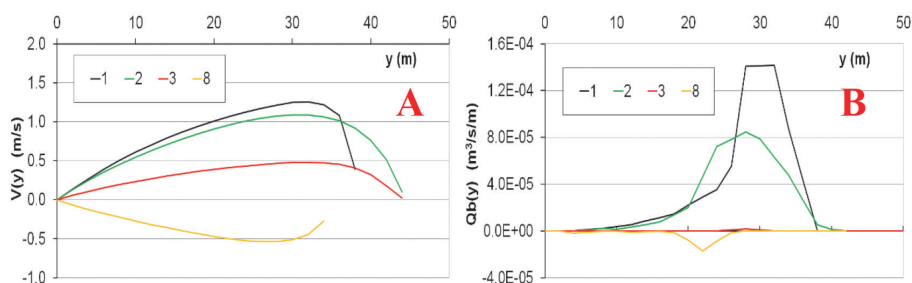
Slika 5. Polja značajnih valnih visina  $H_s$  u terminu registriranja maksimalnog  $H_s$  na valografu V1 (21. prosinca 2019. 12:30)

Rezultati numeričkog modela valnih deformacija ( $H_s$ ,  $T_p$  i  $\alpha$  - srednji smjer valne propagacije) u točkama na početku poprečnih profila 3 i 8 (slika 3) prikazani su na slici 6. (nestacionarni rubni uvjeti modela morfoloških promjena).



Slika 6. Vremenske serije  $H_s$  i  $T_p$  u razdoblju analizirane situacije za početne točke profila 3 i 8 sa slike 3

Na slici 7. prikazani su profili brzine uzdužnog (dužobalnog) strujanja generiranog valovanjem i intenziteta uzdužnog (dužobalnog) pronosa šljunka u poprečnim profilima 1, 2, 3 i 8 za termin pojave maksimalne značajne valne visine (21. prosinca 2019. 12:30) u analiziranoj ekstremnoj situaciji.

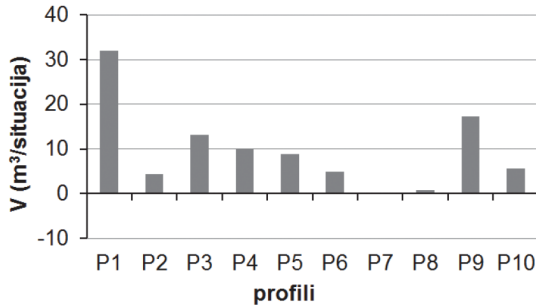


Slika 7. Raspodjela brzine uzdužnog strujanja  $v$  (A) i intenziteta uzdužnog pronosa šljunka  $Q_b$  (B) u profilima 1, 2, 3 i 8 za termin pojave maksimalne značajne valne visine (21.12.2019. 12:30) u analiziranoj ekstremnoj situaciji

Ako se dužobalni protok nasipnog materijala  $Q_b$  plaže integrira po cijeloj duljini profila 1-10, te za cijelo simulacijsko razdoblje (20. prosinca 2019. 11:00 – 22. prosinca 2019. 11:00), dobivaju se ukupni volumeni materijala plaže koji su protekli kroz pojedini profil (slika 8). Pozitivni predznak ima smisao pronosa materijala u smjeru E→W i obratno. Sa slike 8. se može uočiti da je kroz profile 7 i 8 tok sedimenta minimalan, primarno kao posljedica ortogonalnog nailaska valova u odnosu na konturu

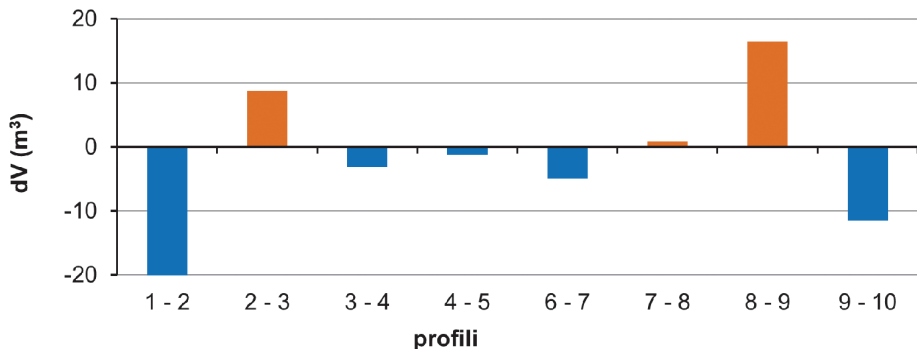


izobata i linije obale (minimalni uzdužni pronos sedimenta). Ovi rezultati upućuju na pojavu erozije s rubnih dijelova "istočne" plaže prema središnjem dijelu, u kojem se pojavljuje akumulacija materijala.



Slika 8. Volumeni materijala plaže koji su protekli kroz pojedini profil tijekom simulacijskog razdoblja (20. prosinca 2019. 11:00 – 22. prosinca 2019. 11:00)

S obzirom na rezultate dužobalnog pronosa ukupne količine sedimenta kroz usvojene profile 1-10, također je moguće odrediti i dijelove plaže u kojima se pojavljuje erozija i akumulacija. Razlika u intenzitetu ukupnog uzdužnog pronosa između dva susjedna profila rezultira erozijom (veći pronos kroz izlazni nego kroz ulazni profil) ili akumulacijom (veći pronos na ulaznom profilu nego pronos na izlaznom profilu). Na slici 9. prikazani su ukupni volumeni erozije/akumulacije uzduž plaže, između korištenih profila 1 – 10.



Slika 9. Ukupni volumeni erozije/akumulacije uzduž plaže između korištenih profila 1 – 10

Sa slike 9. se može uočiti da je u istočnom dijelu zapadne plaže (profili 3 – 5) prevladavala erozija koja rezultira prebacivanjem materijala prema središnjem dijelu zapadne plaže (profili 2 – 3). Najizraženija erozija događa se između profila 1 i 2,

a akumulacija materijala registrirana je između profila 2 i 3. Proračun ukupne bilance sedimenta za zapadnu plažu pokazuje da ukupna erozija premašuje ukupnu akumulaciju za  $23,7 \text{ m}^3$ , odnosno da je destruktivni učinak analizirane ekstremne situacije kvantificiran gubitkom materijala od  $23,7 \text{ m}^3$ . S druge strane, ukupna bilanca sedimenta za istočnu plažu upućuje na minornu akumulaciju materijala od  $0,7 \text{ m}^3$ , odnosno da su morfološke promjene izražene samo prebacivanjem materijala s rubnih dijelova istočne plaže prema središnjem dijelu.

## 4 Zaključak

Morfodinamika nasutog materijala na plaži Ploče u Rijeci modelirana je implementacijom dvaju numeričkih modela. Prvi je numerički model valnih deformacija u kojem se na temelju podataka s valografa u blizini plaže izračunavaju značajne valne visine, periodi i smjerovi nailaska valova na samoj plaži (udaljenost 5 m). Drugi numerički model predstavlja model morfodinamike kojim se izračunava promjena pozicije obalne linije s obzirom na usvojenu referentnu liniju. Treba naglasiti kako model morfodinamike uzima u obzir samo dužobalni transport materijala. Rezultati modela valnih deformacija predstavljaju rubne uvjete za model morfodinamike za promatranu situaciju. Rezultati provedenih proračuna upućuju na izraženu eroziju na rubnim dijelovima zapadne plaže, a akumulacija materijala uočena je između profila 2-3. Ukupna promjena volumena materijala za zapadnu plažu pokazuje neuravnoteženost odnosa erozije i akumulacije budući da erozija znatno premašuje akumulaciju. Na istočnoj plaži također dolazi do erozije uz srednje i desno pero, ali je ona manje izražena. Akumulacija materijala na središnjem dijelu istočne plaže odgovara eroziji na rubnim dijelovima te je sumarna količina promjene volumena približno ista.

Ovaj proračun predstavlja prvi korak u istraživanju elemenata mehanizma pronosa nanosa na umjetno nasutim plažama. U budućnosti je planirana instalacija "smart pebbles" oblutaka na plažu čijim bi se monitoringom bilježili pomaci oblutaka te se na taj način jasno definirao trend pomicanja plažnog materijala. Nastavak istraživanja temeljit će se na razvijanju numeričkih modela koji će biti verificirani geodetskim snimkama u kojima će se, usporedbom oblaka točaka, moći odrediti promjena volumena između sukcesivno snimljenih situacija. Kao rezultat cjelokupnog istraživanja autori će odrediti matematičku formulaciju kojom će prikazati ovisnost promjene volumena sedimenta o glavnim parametrima valovanja na plažama.

## Literatura

- [1] Almeida, L., Masselink, G., Russell, P., Davidson, M., Poate, T., McCall, R., Blenkinsopp, C. & Turner, I.: Observations of the swash zone on a gravel beach during a storm using a laser-scanner, *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, Proceedings 12<sup>th</sup> International Coastal Symposium, Plymouth*, pp. 636–641, 2013.
- [2] Masselink, G., Russell, P., Blenkinsopp, C., Turner, I.: Swash zone sediment transport, step dynamics and morphological response on a gravel beach, *Marine Geology* 274 (2010), pp. 50–68.
- [3] Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Masselink, G.: Storm response and beach rotation on a gravel beach, *Slapton Sands, U.K., Marine Geology* 278 (2010), pp. 77–99.
- [4] Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Chadwick, A.J., Silva, R.: A numerical–empirical approach for evaluating morphodynamic processes on gravel and mixed sand–gravel beaches, *Marine Geology* 241 (2010), pp. 1–18.
- [5] Van Rijn, L.C. (1993.): *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, Aqua Publications, The Netherlands, 1993.
- [6] Buscombe, D., Masselink, G.: Concepts in gravel beach dynamics, *Earth Sci. Rev.* 79 (1–2) (2006), pp. 33–52.
- [7] Ojeda, E. & Guillen, J.: Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches, *Mar. Geol* 253 (2008) 1-2, pp. 51–62.
- [8] Forbes, D.L., Orford, J.D., Carter, R.W.G., Shaw, J. & Jennings, S.C.: Morphodynamic evolution, self-organisation and instability of coarse clastic barriers on paraglacial coasts, *Mar. Geol* 126 (1995) 1-4, pp. 63–85.
- [9] USACE: *Coastal Engineering manual, Part III, EM 1110-2-1100*, 2008.
- [10] Cope, S.: Predicting overwashing and breaching of coarse - clastic barrier beaches and spits — application to Medmerry, West Sussex, Southern England, *Proc. 5th International Coastal Dynamics Conference, Barcelona*, pp 1-14, 2005.
- [11] Williams, J., de Alegría-Arzaburu, A.R., McCall, R.T. & van Dongeren, A.: Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: laboratory and field results, *Coast. Eng.* 63 (2012), pp. 62–80.
- [12] Pedrozo-Acuña, A., Simmonds, D.J., Otta, A.K., Chadwick, A.J. (2006.): On the cross-shore profile change of gravel beaches, *Coastal Engineering* 53(4) (2006), pp. 335–347.
- [13] Lončar, G.; Bekić, D.; Carević, D.; Mostečak, H.; Babić, M.; Grbić, N. & Pranjić, V.: Numeričko modeliranje morfodinamike poprečnog profila na šljunčanom žalu Medveja”, *Hrvatske vode* 24 (2016) 95, pp. 29-38.

- [14] Janeković, I., Kuzmić, M.: Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents, *Ann. Geophys.* 23 (2005), pp. 3207–3218.
- [15] Engelund, F. and Fredsoe, J.: A sediment transport model for straight alluvial channels, *Nordic Hydrology* 7 (1976), pp. 296-306
- [16] Fredsoe, J.: The turbulent boundary layer in combined wave-current motion, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (HY8) (1984), pp. 1103-1120
- [17] Doering, J.C.; Bowen, A.J.: Parametrisation of orbital velocity asymmetry of shoaling and breaking waves using bispectral analyses, *Coastal engineering* 26 (1-2) (1995), pp.15-33.
- [18] Battjes J.A.; Janssen J.P.F.M.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16 th Int.Coastal Eng.Conf.Am.Soc.Civ.Eng*, pp. 569-587, 1978.