

MORFODINAMIKA ŠLJUNČANOG ŽALA PLOČE U UVJETIMA JAKOG JUGA

prof. dr. sc. Goran Lončar,
dipl. ing. građ.

Sveučilište u Zagrebu,
Građevinski fakultet,
Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska

izv.prof. dr. sc. Dalibor Carević,
dipl. ing. građ.

Sveučilište u Zagrebu,
Građevinski fakultet,
Kačićeva 26, 10000 Zagreb, Hrvatska

izv.prof. dr. sc. Suzana Ilić,
dipl. ing. građ.

University of Lancaster,
Lancaster Environment Centre,
LA1 4YQ Lancaster, United Kingdom

doc. dr. sc. Nino Krvavica,
dipl. ing. građ.

Sveučilište u Rijeci,
Građevinski fakultet,
Ul. Radmile Matejčić 3,
51000 Rijeka, Hrvatska

Filip Kalinić, mag. ing. aedif.

Tehničko veleučilište u Zagrebu,
Graditeljski odjel,
Avenija Većeslava Holjevca 15,
10000 Zagreb, Hrvatska

Provedena je analiza morfodinamike umjetno nasutog šljunčanog žala Ploče u Rijeci. Prvotno su provedene numeričke simulacije valnih deformacija i pronosa šljunčanog sedimenta za hipotetske situacije valovanja s incidentnim smjerovima SSE (157.5°), S (180°), SSW (202.5°) i SW (225°), te varijacijom značajnih valnih visina ($H_s = 1.0$ m, 1.5 m i 2.0 m) i odgovarajućih vršnih valnih perioda. Parametrizacija numeričkog modela oslanja se na rezultate empirijskog obrasca za dužobalnu komponentu pronosa šljunčanog sedimenta i rezultate laboratorijskih istraživanja za poprečnu komponentu pronosa šljunčanog sedimenta. Nakon toga je provedena numerička simulacija morfodinamike za jednu situaciju jakog juga (6. 3. 2020.), s primjenom realnih uvjeta valova snimljenih na valografskoj postaji smještenoj u neposrednoj blizini žala Ploče i dinamikom morskih razina snimljenom na mareografskoj postaji Bakar. Verifikacija rezultata modelske simulacije za realno stanje okolišnih uvjeta provedena je kroz usporedbu pozicija i količina erodiranog/akumuliranog materijala uzduž lica žala sa obradom snimke terena u vidu oblaka točaka. Ukupni volumeni erodiranog i akumuliranog šljunčanog sedimenta temeljem obrade snimaka u suglasju su sa sa modelskim vrijednostima.

Ključne riječi: šljunčano žalo, morfodinamika, numerički model

1. UVOD

Kako bi se pružio kvalitetni rekreacijski sadržaj plaže, ili se proširio njezin postojeći kapacitet, često se izvodi nasipavanje šljunčanim materijalom. Trenutno ne postoje smjernice za izbor odgovarajućeg nasipnog materijala lica žala. Sama izvedba nasipavanja treba biti racionalna u smislu minimizacije trajnog odnošenja nasipnog materijala u dubinu i degradacije pridnene biocenoze. Nakon nasipavanja (dohrane) žala formira se inicijalni profil koji tijekom vremena, primarno uslijed djelovanja valova, postaje morfološki aktivan. Dok se kod prirodnih šljunčanih žala nakon situacija intenzivnog valovanja pojavljuju razdoblja s umjerenijom valnom klimom, u kojoj se prethodno erodirani i akumulirani materijal ponovno izvlači na

lice žala (Ruiz de Alegria-Arzaburu i Masselink, 2010.), kod umjetno nasipanih šljunčanih žala postoji opasnost trajnog odnošenja nasipnog materijala.

Po Udden-Wentworth klasifikaciji šljunčani materijal podrazumijeva prevladavanje šljunkovitog sedimenta u rasponu promjera zrna 2 - 64 mm. Nagib lica šljunčanih žala je uobičajeno veći od pješčanih, s nagibima koji nerijetko premašuju 10° (Buscombe i Masselink, 2006.).

Prirodna šljunčana žala generalno imaju dva dijela, gornji izgrađen od šljunčanog materijala, i donji dio u dubljem podmorskom dijelu koji sadrži veće učešće pijesaka. Kod nekih je žala udio pješčanog materijala posebice izražen u zoni uokolo mirne morske razine. Kod dominantno šljunčanog materijala pijesak se pojavljuje kao

pomoćna međupukotinska (intersticijska) komponenta. Oblikovanje valutičaste forme šljunka je ekstremno dugi proces uzrokovan transportom čestica uslijed valovanja, pri čemu uslijed međusobne kolizije krupnijih čestica dolazi do njihovog lomljenja ili „brušenja“. Najsitniji produkti pulverzacije odnose se u dublje slojeve te predstavljaju gubitak u bilanci materijala (Carter i Orford, 1993.).

Pronos šljunčanog sedimenta odvija se pretežito u zoni loma vala i u zoni zapljuskivanja vala (eng: swash zone). U zoni zapljuskivanja vala pojavljuju se relativno velike brzine strujanja tijekom dizanja i spuštanja vala uzduž lica žala (cikličko ovlaživanje). Procesi u zoni zapljuskivanja vala su posebno složeni zbog međudjelovanja kratkih i dugih valova, infiltracijskog/eksfiltracijskog procesa i same morfodinamike (Masselink i Russell, 2006. ; Barnes i sur., 2009.).

Pronos šljunka na žalima odvija se dominantno pod djelovanjem gravitacijskih vjetrovnih valova (asimetrično valno gibanje) i valova nastalih njihovom nelinearnom interakcijom, dok je strujanje generirano vjetrom, plimom i osekom ili razlikom u gustoći mora znatno manje važnosti na pronos šljunčanog sedimenta u toj zoni Van Rijn (2014.). Pri podizanju vala uzduž lica žala krupnije čestice pomiču se do razine uspinjanja, dok je u fazi silaska vala zbog jače perkolacije vode smanjen intenzitet pronosa prema donjem dijelu profila žala. Detaljniji pregled o transportnim procesima u zoni zapljuskivanja vala može se naći u radu Van Rijn (2009.).

Pri pojavi uplićavanja i loma valova pronos šljunčanog sedimenta odvija se pretežito u vidu vučene faze. Budući da je vršna pridnena orbitalna brzina strujanja u smjeru obale veća od brzine u smjeru pučine, tijekom svake valne periode pojavljuje se ukupni pomak čestice šljunčanog sedimenta prema obali. Za vrijeme ekstremno jakih situacija valovanja pojavljuje se i lom vala na samom licu žala, a čime se značajno mijenja slika strujanja uzduž lica žala, te dolazi do obratnog procesa u kojem je pronos šljunčanog sedimenta dominantno usmjeren prema pučini.

Istraživanje morfodinamike šljunčanih žala poduzeto je kroz laboratorijska i in-situ ispitivanja, te korištenjem tehnika optičkog i akustičnog mjerenja, a dobiveni rezultati poslužili su u pokušajima uspostave odgovarajućih numeričkih i statističkih modela. Prvo veliko istraživanje na fizikalnom modelu (181 eksperiment) bilo je provedeno u valnom kanalu na HR Wallingford u mjerilu 1:17 (Powell, 1990.). Za modelski materijal sedimenta žala koristio se antracit. Fizikalna modelska istraživanja morfodinamike poprečnog šljunčanog profila inicijalnog nagiba od 1:1 do 1:5 provedena su i od strane nizozemskih istraživača (Deltares/Delft Hydraulics, 1989.), pri čemu je korišten šljunčani materijal obilježja $d_{50} = 0.0048$ m i $d_{50} = 0.021$ m. Primijenjeni modelski valni kanal imao je duljinu 200 m, širinu 5 m i dubinu 7 m. U valnom kanalu GWK (Hannover) provedena su opsežna modelska istraživanja morfodinamike šljunčanog materijala $d_{50} = 0.021$ m pri inicijalnim nagibima poprečnog profila u rasponu od 1:1 do 1:9, a rezultati provedenog istraživanja objavljeni su u radu López i sur.

(2006.). Tijekom 2008. godine u valnom kanalu Deltares analizirano je djelovanje valova na šljunčane barijere ($d_{50} = 0.011$ m) uz vremensku promjenu mirne razi s ciljem prepoznavanja utjecaja plime na prelijevanje i destrukciju profila barijere (Williams i sur., 2012.a.).

Za praćenje putanje pojedinačnih zrnaca šljunka pri njihovom poprečnom i dužobalnom pronosu uslijed valovanja koriste se traserski eksperimenti, no dobiveni rezultati imaju više kvalitativni, nego kvantitativni karakter zbog relativno malog postotka uspješno praćenih zrnaca šljunka (< 5%). Za traserske čestice korišten je obojani originalni sediment profila žala ili čestice s radioaktivnim izotopima, te čestice izrađene od aluminija ili plastike s metalnom ispunom. Rezultati ovakvih ispitivanja mogu dati vrlo važne informacije o karakteristikama transporta šljunka uzrokovanog djelovanjem valova i strujanja na pojedinačnoj lokaciji.

Procjena dužobalne komponente pronosa šljunka je također od praktične važnosti za obalno inženjerstvo, poglavito u domeni odlučivanja o primjerenosti izvedbe struktura (npr. hidrauličkih pera) za smanjenje procesa dužobalnog pronosa šljunka. Dosadašnja istraživanja dužobalnog pronosa bila su većinom fokusirana na pjeskoviti sediment, dok su istraživanja dužobalne morfodinamike šljunčanog materijala vrlo rijetke. Glavni razlog tomu je nedostatak pouzdanih terenskih podataka i mjerne opreme za praćenje hidrodinamičkog i morfodinamičkog procesa na šljunčanim žalima (Van Wellen i sur., 2000.). Glavni problem je u instrumentu za skupljanje šljunčanog sedimenta u pronosu, obzirom da njegova implementacija značajno mijenja polje strujanja i dovodi do pojave lokalne erozije u njegovoj okolini.

Pouzdati podatci terenskog istraživanja u uvjetima približno stacionarnog valovanja (valna visina, vršna perioda i incidnetni kut) i intenziteta dužobalnog pronosa uzduž šljunčanih žala različitih poprečnih nagiba i granulacije prezentirani su u radovima Chadwick (1989.) i Nicholls i Wright (1991.). U sklopu in-situ istraživanja od strane Chadwick (1989.) valne visine bile su u rasponu od 0.3 do 0.8 m, vršne valne periode između 2 s i 4 s, a nailazni kutovi valne propagacije u odnosu na obalnu liniju od 20° do 40°. Nagibi poprečnih profila žala bili su u rasponu $\tan\beta = 0.10 - 0.12$. Nicholls i Wright (1991.) su dužobalni pronos analizirali na jednom žalu (Hurst Castle Spit, Engleska) kroz praćenje aluminijskih traserskih čestica.

Učestalo korišteni empirijski obrazac za procjenu intenziteta dužobalnog transporta je tzv. CERC jednadžba (Shore Protection Manual, US Army Corps of Engineers, 1984.). U jednadžbi se ne pojavljuju članovi s kojima se izražava konkretna veličina materijala i nagib žala, a uspostava same jednadžbe je dobivena temeljem in-situ istraživanja pješćanih žala. Utjecaj promjera zrna šljunčanog sedimenta i nagiba poprečnog profila žala je obuhvaćen u empiričkoj jednadžbi predloženoj od Kamphuis (1991.), no primjena te jednadžba je validirana samo za pješćane žale. U radu Van Wellen i sur. (2000.) evaluirani su različiti podatci mjerenja i empiričke formulacije za

dužobalni pronos šljunčanog sedimenta, te je predložena i odgovarajuća empirička jednadžba. Bitan doprinos u vidu dimenziono homogene empirijske jednadžbe za procjenu dužobalog pronosa pijeska i šljunka dao je Van Rijn (2014.). Primjena te jednadžbe je opravdana za vrlo široki raspon veličine sedimenta, od 0.1 mm do 100 mm. Obzirom da su van Wellenova mjerenja bila provedena u okolini s puno većim plimnim rasponom, te na žalima gdje je prevladavao pljosnati sediment izmiješan s pijeskom van Rijn formulacija je odabrana za verifikaciju rezultata numeričkih simulacija prezentiranih u nastavku ovog rada.

Primjena optičkih i akustičkih mjerenja s uređajima nove generacije omogućuje kvalitetni monitoring morfodinamičkih karakteristika šljunčanih žala u dinamičkim uvjetima okoliša. Stoga se u recentnom vremenu, osim dugoročnih morfoloških promjena profila žala, (Austin i Masselink, 2006.) počinju intenzivnije pratiti i kratkoročne promjene (Ojeda i Guillen, 2008.; Curtiss i sur., 2009.; Poate i sur., 2013.). Doprinos prepoznavanju procesa morfodinamike kroz primjenu optičkih mjerenja u zoni hrvatskog priobalja prezentiran je u radovima Ružić i sur. (2014.), Ružić i sur. (2018.) i Pikelj i sur. (2018.).

Za analizu morfodinamike žala s mješovitim ili pretežito šljunčanim materijalom razvijen je relativno mali broj numeričkih modela (Jamal i sur. 2014., Williams i sur., 2012. b.). Pedrozo-Acuña i sur. (2006.) prezentirali su rezultate numeričko-empirijskog istraživanja pronosa šljunčanog sedimenta u zoni zapljuskivanja vala strmih šljunčanih žala kroz implementaciju nelinearnog Boussinesqovog modela valne hidrodinamike. Ruiz de Alegria-Arzaburu i Masselink (2010.) prikazali su rezultate istraživanja morfodinamike šljunčanog žala (jugozapadna obala Engleske) kroz provedbu in-situ mjerenja i spregu primjene numeričkog modela valnih deformacija (Mike 21/sw) s empirijskim jednadžbama dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta prema CERC (SPM, 1984.), Kamphuis (1991.) i Van Wellen i sur. (2000.).

U radu Lončar i sur. (2016.) prikazani su rezultati in-situ mjerenja i numeričkog modeliranja valnih deformacija (model Mike 21/sw, <http://www.dhigroup.com>) i morfoloških promjena (model XBeach-G, <http://oss.deltares.nl>) uzduž jednog poprečnog profila prirodnog šljunčanog žala u razdoblju od jedne godine

(Kvarnerski kanal u sjevernom dijelu Jadranskog bazena, Hrvatska). Modelski rezultati ukazali su na najizraženiju eroziju u zoni zapljuskivanja vala. Izmjerena i simulirana morfodinamika ukazala je na prirodnu težnju ka postizanju dinamički stabilnog profila.

U ovom je radu provedena numerička analiza morfodinamike šljunčanog žala Ploče (slika 1) za situaciju valovanja generiranog djelovanjem juga (6. 3. 2020.). Detaljni snimci terena u obliku oblaka točaka (4E7 točaka) ostvareni su 3. 3. 2020. i 10. 3. 2020. U implementiranim modelskim rutinama osnovna pobuda na pokretanje šljunka su gravitacijski vjetrovni valovi, dok utjecaj strujanja mora induciranog plimotvornom silom, gradijentnim strujama i strujama drifta nije uzet u obzir.

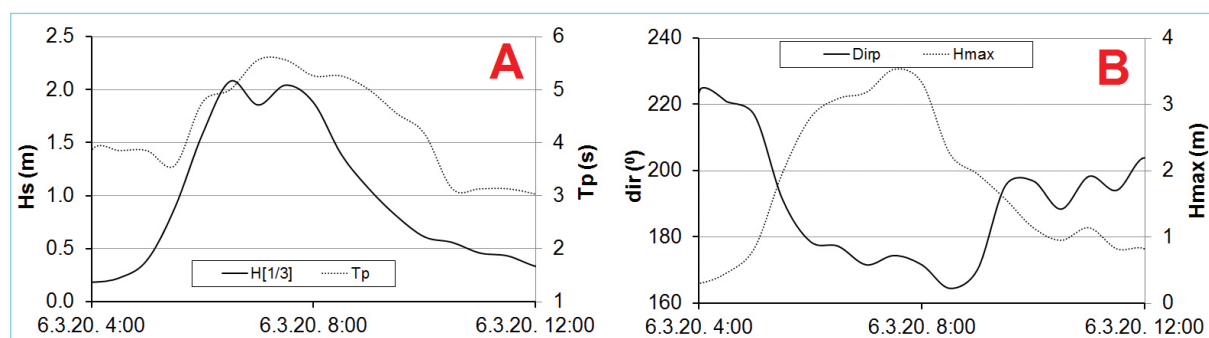


Slika 1: Pregledna karta šireg akvatorijalnog područja (A) i predmetno žalo Ploče (B)

2. MATERIJALI I METODE

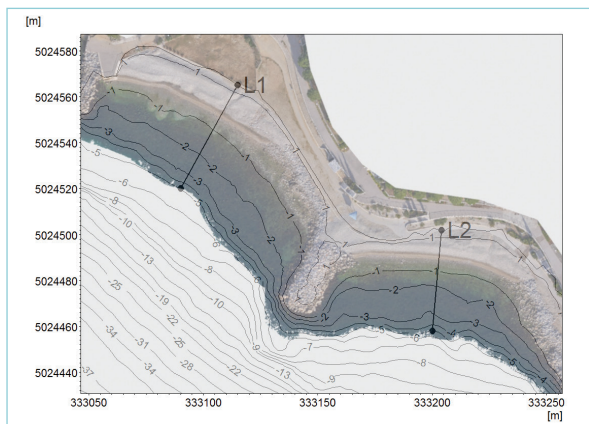
2.1. Mjerenje valova, razine mora i terena

Mjerenje valova provedeno je valografom tvrtke Datawell na poziciji V1 u neposrednoj blizini samog žala Ploče ($\varphi = 45^\circ 19.588' N$; $\lambda = 14^\circ 23.738' E$, WGS 84). Bilježeni podatci sadržavaju standardne valne statistike za periode od 30 minuta (slika 2). U promatranoj situaciji izmjereni maksimum značajne valne visine iznosio je $H_s = 2.08$ m (6.3.2020. 6:30), s pripadnom maksimalnom visinom vala $H_{MAX} = 3.08$ m i pripadnim vršnim spektralnim periodom $T_p = 5.04$ s, pri južnom incidentnom smjeru valovanja $Dir = 177^\circ$. Za dinamiku morskih razina u ovom radu preuzeti su podatci izmjereni na mareografskoj postaji Bakar.



Slika 2: Vremenske serije H_s (A) i T_p (A), te Dir (B) i H_{MAX} (B) u polusatnoj rezoluciji tijekom analizirane situacije (registrirano na valografskoj postaji V1)

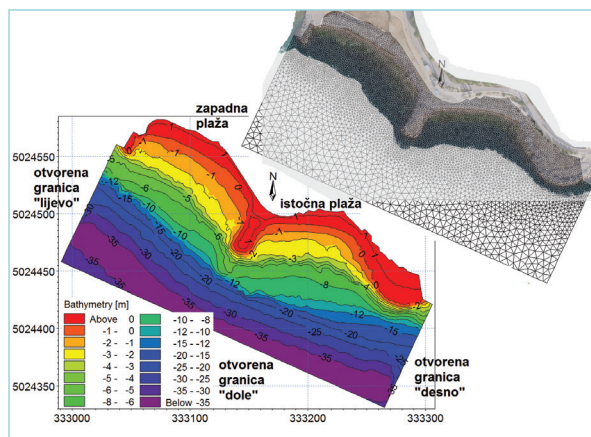
Detaljni geodetski premjer izrađen je 16. 1. 2020 (slika 3). Oblaci točaka za predmetnu lokaciju snimljeni su 3. 03. 2020. i 10. 03. 2020. (slika 3). Svaki oblak sadrži $4E^7$ točaka. Na slici 3 prikazana su i dva poprečna profila (L1, L2), koji se koriste u daljnjim analizama uzdužnog pronosa šljunčanog sedimenta. Početne točke profila su na dubini 5m. Laboratorijskim ispitivanjem granulometrijskog sastava materijala žala dobiven je $d_{50} = 16$ mm (promjer zrna 50% učešća iz granulometrijske krivulje ispitnog uzorka).



Slika 3: Geodetski (batimetrijski) premjer terena s odabranim poprečnim profilima L1/L2 na podlozi u vidu snimke SfM fotogrametrije (Structure-from-Motion) sa $4E^7$ točaka

2.2. Numerički model valnih deformacija, hidrodinamike i pronosa šljunčanog sedimenta

Prostorna domena numeričkog modela valnih deformacija, hidrodinamike i pronosa šljunčanog sedimenta prikazana je na slici 4. Udaljenost između numeričkih čvorova, smještenih u težište površine svakog konačnog volumena, je varijabilna i proteže se od 5 m u dubokovodnom području do 0.5 m u zoni obalne crte (slika 4).



Slika 4: Prostorna domena numeričkog modela valnih deformacija, hidrodinamike i pronosa šljunčanog sedimenta na batimetrijskoj podlozi (A), te njena diskretizacija s nestrukturiranom mrežom konačnih volumena (B)

Za provedbu numeričkih analiza valnih deformacija korišten je spektralni numerički model Mike 21sw (www.dhigroup.com). Korištena je puna spektralna Jonswap formulacija sa diskretizacijom frekvencijske domene u logaritamskoj skali od minimalne frekvencije 0.1 Hz (valni period 10 s) do maksimalne frekvencije 1.75 Hz (valni period 0.57 s), kroz 30 diskretnih koraka. Obuhvaćeni su procesi refrakcije, difrakcije i uplićavanja te disipacijski procesi izazvani trenjem s dnom i lomovima valova pri nailasku vala na lokacije akvatorija s manjim dubinama.

Proračun pronosa šljunčanog sedimenta ostvaren je primjenom hidrodinamičkog modela Mike 21fm (www.dhigroup.com) sa uključenjem modula pronosa sedimenta. Za forsiranje modela koriste se polja značajnih valnih visina H_s vršnih perioda T_p incidentnih smjerova valne propagacije i radijacijskog naprezanja iz rezultata modela valnih deformacija. Modelska domena i proračunska mreža je istovjetna proračunskoj mreži korištenoj u modelu valnih deformacija (slika 4).

U sklopu modula pronosa sedimenta za opis valnog gibanja koriste se opći valni parametri proračunati modelom valnih deformacija (H_s , T_p incidentni smjer valovanja), a pridružno posmično naprezanje zbog nejednolikosti valnog turbulentnog graničnog sloja u progresivnim valovima definirano je prema Hedegaard (1985.). Produkcija turbulencije u površinskom sloju se proračunava temeljem parametara valne visine, valne periode i dubine prema Doering i Bowen (1995.). Površinsko naprezanje uslijed loma valova ovisi o veličini formiranog površinskog vrtložnog valjka, čija se površina u modelu proračunava prema teoriji iznesenoj u radu Dally i Bowen (1995.). Razvoj graničnog sloja kroz zajedničko djelovanje struja i valova rješava se pristupom izloženom u radu Fredsoe (1984.). Usrednjeno strujanje generirano poljem naprezanja proračunava se prema Fredsoe i Deigaard (1992.), a čime je obuhvaćen utjecaj vremenski usrednjenog posmičnog naprezanja uslijed valnog gibanja, posmičnog naprezanja uslijed loma valova i posmičnog naprezanja uslijed gradijenta slobodne površine mora.

Pronos sedimenta u longitudinalnom smjeru definiran je determinističkim izrazom (Fredsoe i Deigaard, 1992.):

$$q_{BL} = 5 [1 + (\beta \omega / 6) / (\theta_B - \theta_{BC})]^{-0.25} (\theta_B^{1/2} - 0.7 \theta_{BC}^{1/2}) [g(\rho_s / \rho - 1) d_{50}^3]^{1/2} \quad (1)$$

$$\theta_B = \tau_b / [(\rho_s - \rho) g d_{50}] \quad (2)$$

$$\theta_{BC} = 0.0495 \{[-\cos \alpha \sin \beta + (\mu_s^2 \cos^2 \beta - \sin^2 \alpha \sin^2 \beta)^{1/2}] / \mu_s\} \quad (3)$$

gdje je: g gravitacijsko ubrzanje, θ_B bezdimenzionalno posmično naprezanje na dnu, ρ_s gustoća sedimenta

(2650 kg/m^3), ρ gustoća mora (1028 kg/m^3), θ_{bc} bezdimenzionalno kritično posmično naprezanje na dnu, d_{50} promjer zrna nasipnog materijala, α kut između smjera strujanja i nagiba dna, β nagib dna, $\mu_s = \tan\phi$ statički koeficijent trenja, ϕ kut unutarnjeg trenja.

U transferzalnom smjeru pronos sedimenta proračunava se izrazom:

$$q_{BT} = q_{BL} \tan \beta / (1.6 \theta_B^{1/2}) \quad (4)$$

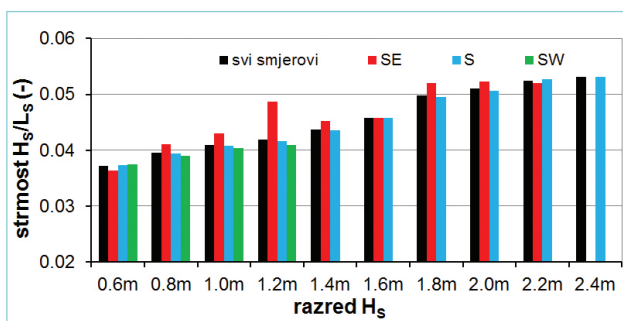
Za gradaciju sedimenta $\sigma_g = (d_{64}/d_{16})^{1/2}$ usvojena je vrijednost 1.1 (Zyserman i Fredsoe, 1996.).

U sklopu proračuna morfodinamike (modul pronosa sedimenta) za svaki proračunski korak prvotno se iznalazi rješenje hidrodinamike s pripadnim pronosom sedimenta, a putem kojeg se određuje brzina promjene kote dna. Temeljem proračunatih vrijednosti brzine promjene kote dna nivelira se datoteka s batimetrijskim podacima, te se s izmijenjenom batimetrijom provodi daljnji korak proračuna za hidrodinamiku i pronos sedimenta.

2.3. Parametrizacija numeričkog modela

Kako bi se odredili parametri numeričkog modela, poglavito Manningovog koeficijenta hrapavosti i koeficijenta Smagorinsky, prvo su provedene numeričke simulacije valnih deformacija i pronosa sedimenta u stacionarnim uvjetima valovanja. Pri tome su za svaki analizirani incidentni smjer SSE (157.5°), S (180°), SSW (202.5°) i SW (225°) na otvorenim granicama modela varirane značajne valne visine $H_s = 1.0 \text{ m}$, 1.5 m i 2.0 m . Pripadne valne periode proračunate su temeljem obrade izmjerenih valografskih podataka u duljem razdoblju mjerenja na poziciji valorafa V1 (6. 12. 2019.-26. 3. 2020.). Podjelom izmjerenih polusatnih vrijednosti H_s po razredima valnih visina od 0.2 m (slika 5) dobivene su interpolacijske jednadžbe za vršne periode pojedinog incidentnog smjera:

$$\begin{aligned} T_{P(SE)} &= 1.3182 \cdot H_s + 2.7024 ; T_{P(S)} = 0.9462 \cdot H_s + 3.6241 ; T_{P(SSW)} = 1.069 \cdot H_s + 3.21 \end{aligned} \quad (5a, b, c)$$



Slika 5: Odnos strmosti vala i valnih visina prema izmjerenim podacima na valografskoj postaji V1 tijekom razdoblja (6. 12. 2019.-26. 3. 2020.)

Za referentne vrijednosti dužobalnog pronosa šljunka kroz poprečne profile L1 i L2 (slika 3) korišten je empirijski obrazac (Van Rijn, 2014.):

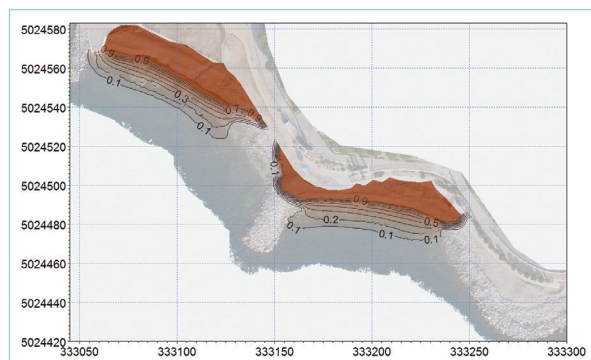
$$Q_b = 0.00018 \rho_s g^{0.5} \tan \beta^{0.4} d_{50}^{-0.6} H_{SB}^{3.1} \sin 2\theta_B \quad (6)$$

gdje je: Q_b intenzitet dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta (kg/s), ρ_s gustoća šljunčanog sedimenta (usvojeno 2650 kg/m^3), H_{SB} značajna valna visina na početku zone loma vala, β nagib poprečnog profila žala (za žalo Ploče i profil L1 nagib je $1/7.9$ od -5 m dubine do $+1.5 \text{ m}$), θ_B kut između fronte vala na početku zone loma vala i obalne linije.

Osnovni problem u primjeni navedenog obrasca je iznalaženje odgovarajućih vrijednosti parametara H_{SB} i θ_B , a u ovom radu te su vrijednosti dobivene upravo obradom rezultata numeričkog modela valnih deformacija. U modelu valnih deformacija usvojen je model loma valova prema Ruessink i sur. (2003.).

Potrebno je napomenuti da je empirijski izraz (6) dobiven temeljem rezultata in-situ i numeričkih modelskih istraživanja za uvjete relativno dugih obalnih linija u pravcu, s minimalnim promjenama incidentnog kuta valovanja. Konfiguracija obalne linije žala Ploče je takova da srednje pero (slika 1) predstavlja prepreku slobodnom nailasku vala iz SSE smjera na zapadno žalo (profil L1), odnosno slobodnom nailasku vala iz SW smjera na istočno žalo (profil L2). Stoga su za dužobalni pronos kroz profil L1 relevantni incidentni smjerovi S (180°), SSW (202.5°) i SW (225°). Incidentni smjer valovanja SSW se praktički poklapa sa poprečnim profilom L1. Za dužobalni pronos kroz profil L2 relevantni incidentni smjerovi su SSE (157.5°), S (180°) i SSW (202.5°) a incidentni smjer valovanja S se praktički poklapa sa poprečnim profilom L2.

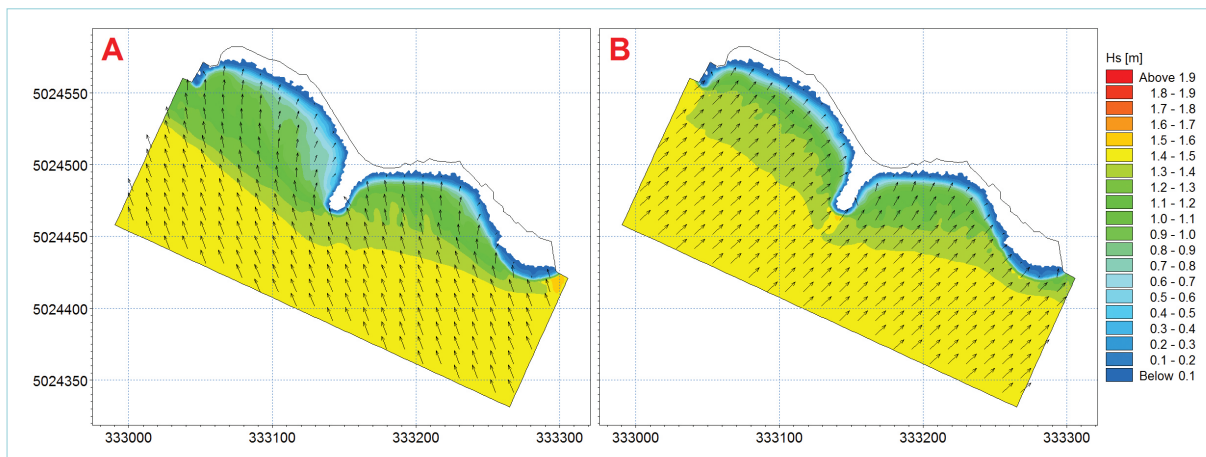
Početni uvjeti prostorne raspodjele šljunčanog sedimenta u modelskoj domeni definirani su kao nehomogeni. Umjetno šljunčano žalo Ploče je izvedeno nasipanjem homogenog materijala frakcije $d_{50} = 16 \text{ mm}$, na pozicijama i u debljini sloja prema prikazu danom na slici 6. Na preostalom dijelu podmorja nalazi se stabilizirani materijal koji nije podložan pronosu, a pera u površinskom sloju izvedena su od materijala granulacije $d_{50} \gg 16 \text{ mm}$.



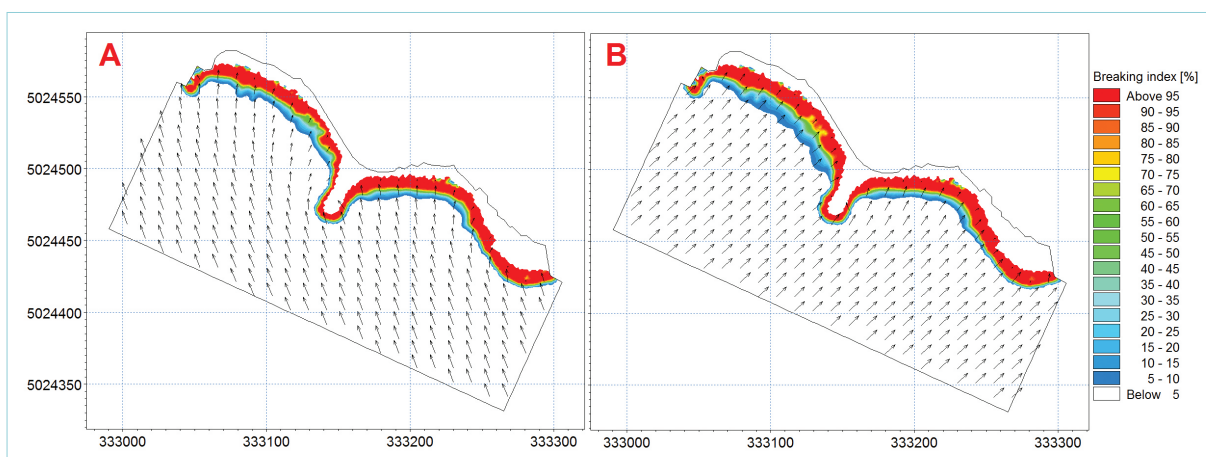
Slika 6: Područje nasipnog materijala granulacije $d_{50} = 16 \text{ mm}$ – usvojeni početni uvjeti pokretnog šljunčanog sedimenta (izolinije predstavljaju debljinu sloja nasipnog materijala)

Na slikama 7, 8 i 9 prikazana su polja značajnih valnih visina H_s , frakcije slomljenih valova i strujanja za uvjete valovanja SSE i SW incidentnog smjera. Na slici 10 prikazana je usporedba intenziteta dužobalnog pronosa kroz profile L1 i L2, dobivenih numeričkim

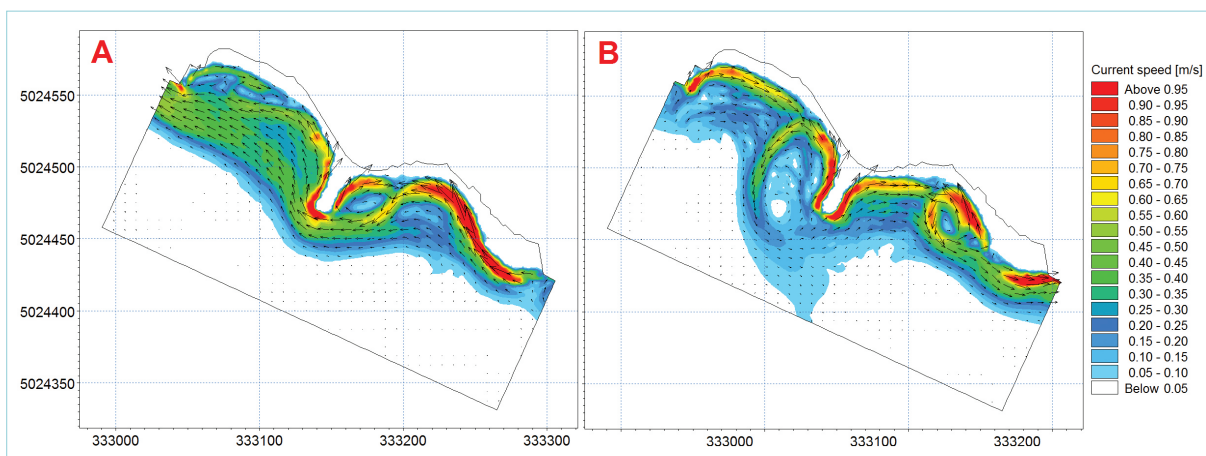
simulacijama i primjenom empirijskog obrasca 6. Prikazani rezultati dobiveni su usvajanjem Mannigovog koeficijenta hrapavosti 42 i Smagorinsky koeficijenta 0.2, gustoće šljunčanog sedimenta 2650 kg/m^3 i poroznosti 0.4.



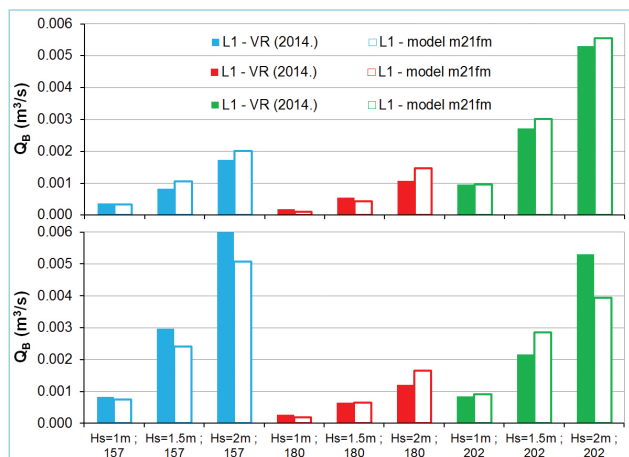
Slika 7: Polja značajnih valnih visina H_s za valovanje incidentnog smjera SSE (A - $H_s = 1.5 \text{ m}$, $T_p = 4.9 \text{ s}$) i SW (B - $H_s = 1.5 \text{ m}$, $T_p = 4.8 \text{ s}$)



Slika 8: Polja frakcije slomljenih valova (eng: breaking indeks) pri valovanju incidentnog smjera SSE (A - $H_s = 1.5 \text{ m}$, $T_p = 4.9 \text{ s}$) i SW (B - $H_s = 1.5 \text{ m}$, $T_p = 4.8 \text{ s}$)



Slika 9: Polja strujanja generirana valovanjem incidentnog smjera SSE (A - $H_s = 1.5 \text{ m}$, $T_p = 4.9 \text{ s}$) i SW (B - $H_s = 1.5 \text{ m}$, $T_p = 4.8 \text{ s}$)

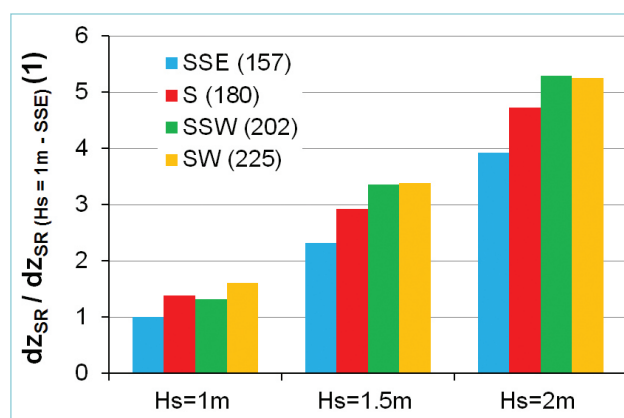


Slika 10: Usporedba intenziteta dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta kroz profile L1 (A) i L2 (B) prema rezultatima empirijskog obrasca 6 (Van Rijn, 2014.) i numeričkog modela (usvojene vrijednosti: Manningov koeficijent 42, Smagorinsky koeficijent 0.2)

Na slici 9 se može prepoznati razlika u cirkulacijskim ćelijama zapadnog i istočnog žala. Strujanje generirano valovanjem SSE smjera prati obalnu liniju od istočne prema zapadnom žalu, uz pojavu vrtloga sa desne strane srednjeg pera. Pri valovanju SW incidentnog smjera dolazi do razdvajanja strujanja oko srednjeg pera, vrtlog se pojavljuje uz desno pero istočnog žala, a na središnjem dijelu zapadnog žala pojavljuje se koncentrirana mlazna struja usmjerena od obale. Rezultati prikazani na slici 10 ukazuju na povećanje dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta pri povećanju kuta između smjera propagacije valova i linije poprečnih profila (vidi slike 3 i 7). Tako se najintenzivniji pronos kroz profil L1 pojavljuje pri valovanju SW (225°) incidentnog smjera, a kroz profil L2 pri valovanju SSE (157.5°) incidentnog smjera. Povećanje valne visine uzrokuje nelinearni rast intenziteta dužobalnog pronosa. Kako je već prethodno navedeno, problem primjene svih empirijskih jednadžbi dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta je usvajanje odgovarajuće značajne valne visine u zoni loma vala H_{SB} . Širina pojasa u kojem dolazi do loma valova (slika 8) primarno ovisi o strmosti vala i nagibu poprečnog profila žala. Za potrebe proračuna u ovome radu usvojene su modelske vrijednosti

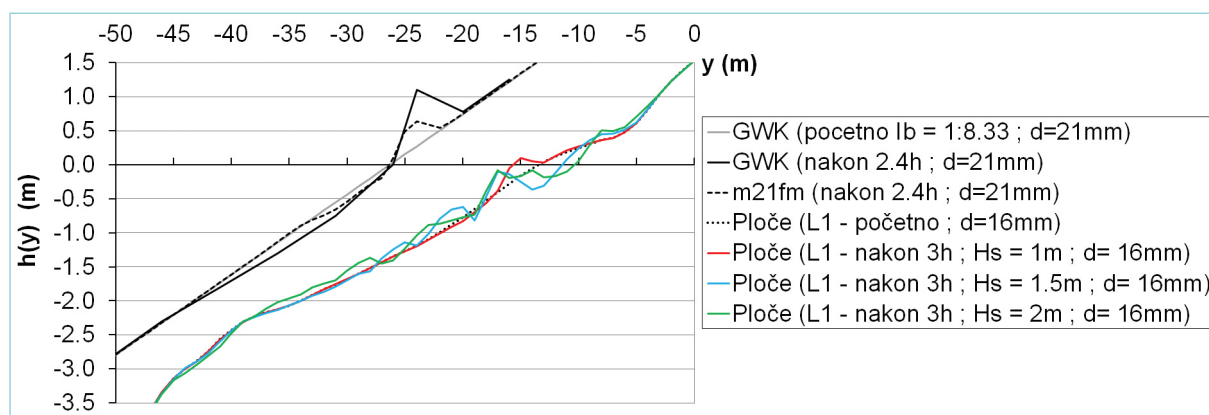
H_{SB} u točkama poprečnih profila L1 i L2 na kojima indeks loma valova poprima vrijednost 20 %.

Iz rezultata provedenih numeričkih simulacija moguće je dati i kvantitativnu procjenu kritičnog smjera valovanja u kontekstu podložnosti žala Ploče na pronos nasipnog šljunčanog materijala (morfodinamika). Ukoliko se za svaku provedenu simulaciju proračuna pripadna srednja vrijednost intenziteta promjene kote dna za cijelu modelsku domenu, te se vrijednosti normiraju na minimalnu srednju vrijednost pri $H_s = 1.0$ m, dobivaju se komparativni rezultati prikazani na slici 11. Može se zaključiti da su kritični incidentni smjerovi SSW i SW, pri čemu je intenzitet pronosa šljunčanog nasipnog materijala žala ≈ 40 % intenzivniji nego u slučaju valovanja SSE (157°) smjera, odnosno ≈ 10 % intenzivniji nego u slučaju valovanja S (180°) smjera.



Slika 11: Srednje vrijednosti intenziteta promjene kote dna za cijelu modelsku domenu normirane na minimalnu srednju vrijednost pri $H_s = 1.0$ m i incidentnom smjeru SSE (157°)

Referentni podatci za morfodinamiku poprečnog profila žala preuzeti su iz rezultata ispitivanja na fizikalnom modelu velikog mjerila (GWK Hannover, slika 10). Glavnina programa provedenog ispitivanja u valnom kanalu GWK bila je koncentrirana na valove znatno manjih strmosti od onih koji prevladavaju u području hrvatskog priobalja. Ipak, uvjeti jednog



Slika 12: Usporedba morfodinamike poprečnih profila žala nagiba 1:8.33 pri $H_s = 1.07$ m i $T_p = 4.3$ s nakon 2.4 h (eksperiment GWK i spregnuti numerički modeli Mike 21sw + Mike 21fm) te profila L1 nakon 3 h za $H_s = 1.0$ m, 1.5 m i 2.0 m (usvojene vrijednosti: Manningov koeficijent 42, Smagorinsky koeficijent 0.2)

provedenog eksperimenta slažu se sa karakterističnim uvjetima valovanja registriranog na valografu V1 ispred žala Ploče. U tom eksperimentu trajanja 2.4 h inicijalni nagib poprečnog šljunčanog profila bio je 1:8.33, korištena je granulacija $d_{50} = 21$ mm, a primijenjene valne visine i periode iznosile su $H_s = 1.07$ m, $T_p = 4.3$ s. Identični geometrijski uvjeti i uvjeti valovanja korišteni su pri implementaciji spregnutih modela Mike 21sw i Mike 21fm. Parametrizacija modela valnih deformacija, strujanja i pronosa šljunčanog sedimenta istovjetna je kao i u prethodnim simulacijama dužobalnog pronosa (lom vala prema Ruessink i sur. (2003.), Mannigov koeficijent hrapavosti 42, Smagorinsky koeficijent 0.2). U numeričkom modelu je uzeta u obzir i pojava uspinjanja kroz povećanje srednje razine mora prema (Stockdon i sur. 2006.). Rezultati usporedbe numeričkog modelskog pristupa s GWK eksperimentom prikazani su na slici 12.

Rezultati GWK eksperimenta i numeričkih simulacija (slika 12) ukazuju na pojavu akumulacije materijala u dijelu nadmorja, te erozije u podmorskom dijelu poprečnog profila žala. Rezultati numeričkih simulacija daju manje intenzivne promjene od registriranih u sklopu GWK eksperimenta kao posljedica neprepoznavanja utjecaja infiltracije/eksfiltracije na asimetriju brzine strujanja pri dizanju i povlačenju vala uzduž poprečnog profila. Smanjenje odstupanja simulacijskih rezultata od eksperimentalnih može se ostvariti smanjenjem usvojene vrijednosti relativne gustoće šljunčanog sedimenta u numeričkom modelu ($\rho_s/\rho < 2.65$, nije prikazano u ovom radu). Takvom manipulacijom kompenzira se nedostatan modelski opis izrazito složenog stvarnog fizikalnog procesa koji uključuje interakciju loma vala, infiltracije/eksfiltracije itd. Ovdje prezentirani modelski rezultati dovoljno su dobri obzirom da žalo Ploče nema uvijek kontinuirani uzdužni pronos šljunčanog sedimenta zbog pojave lokalnih mlaznih struja usmjerenih od obale (vidi sliku 9).

Ukoliko se želi komentirati morfodinamika žala Ploče parcijalno za poprečni smjer (cross shore), povoljno je odabrati profil L1 koji ima sličan nagib (1:7.9 do dubine 5 m) kao i profil korišten u GWK eksperimentu (1:8.33). Potrebno je uočiti da je zapadno žalo relativno kratko, pa čak ako se promatraju stacionarni uvjeti valovanja s incidentnim smjerom 207° (kolinearnost smjera valne propagacije i smjera poprečnog profila L1), ipak nije moguće u potpunosti izolirati morfodinamiku u poprečnom smjeru profila L1 od utjecaja dužobalnog pronosa šljunka. Svrha provedbe ovih numeričkih simulacija je sadržana u tome da se prepoznaju uvjeti valovanja u kojima se materijal žala iz podmorskog dijela poprečnog profila prebacuje na nadmorski dio (konstruktivni proces) ili obratno (destruktivni proces). Na slici 12 prikazane su promjene poprečnog profila L1 nakon 3h kontinuiranog valovanja incidentnog smjera 207° , sa valnim visinama $H_s = 1.0$ m, 1.5 m i 2.0 m. Prema rezultatima sa slike 12 pri valovima obilježja $H_s = 1.0$ m pojavljuje se konstruktivna faza u kojoj nema odnošenja materijala lica žala s nadmorskog

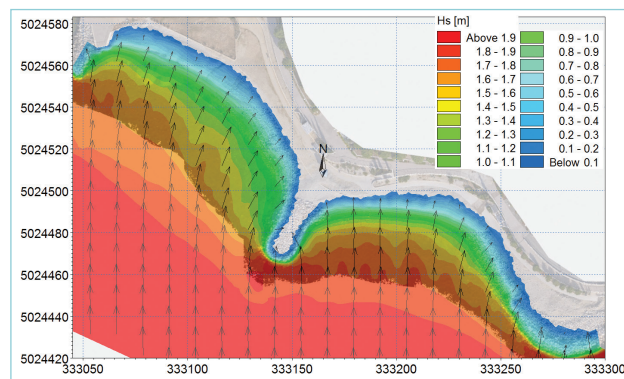
dijela, za razliku od situacija sa $H_s = 1.5$ m i 2.0 m, kada dolazi do erozije nadmorskog dijela i akumulacije nasipnog materijala u podmorskom dijelu.

3. SIMULACIJA REALNE SITUACIJE 6. 6. 2020.

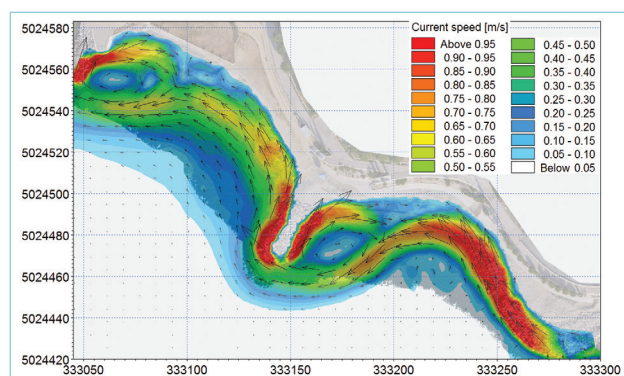
Model valnih deformacija na otvorenim granicama forsiran je vremenskim serijama značajnih valnih visina, vršnih perioda i incidentnog smjera prema registriranim podacima na valografskoj postaji V1 (slika 2), te dinamikom morskih razina registriranih na mareografskoj postaji Bakar. Parametrizacija modela je ista kao i u prethodno provedenim kalibracijskim simulacijama (Manningov koeficijent hrapavosti 42, Smagorinsky koeficijent 0.2, gustoća šljunčanog sedimenta 2650 kg/m³, poroznost šljunčanog sedimenta 0.4, lom vala prema Ruessink i sur. (2003.).

Na slici 13 prikazano je polje značajnih valnih visina H_s u terminu dosizanja maksimalne značajne valne visine u promatranoj situaciji (6.3.2020. 6:30, $H_s = 2.08$ m, 5.04 s, $Dir = 177^\circ$). Na slici 14 prikazano je polje strujanja generiranog valovanjem za isti termin. Na slici 15 prikazano je modelom proračunato polje promjene kote dna za simulacijsko razdoblje

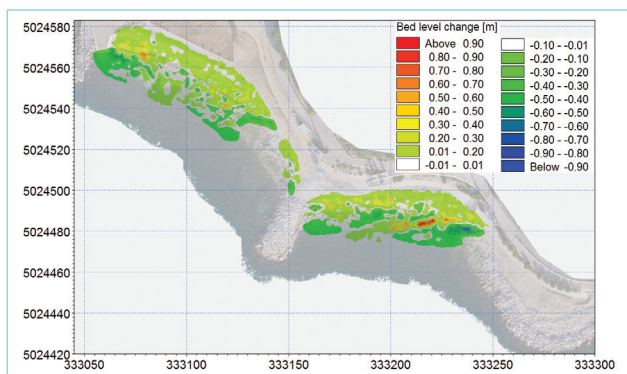
6. 3. 2020. 4:00 – 12:00, a na slici 16 polje promjene kote dna za zapadno žalo dobiveno obradom snimaka (SfM fotogrametrija) u terminima 3. 3. 2020. i 10. 3. 2020.



Slika 13: Polje značajnih valnih visina u terminu pojave maksimalne značajne valne visine (6. 3. 2020. 6:30)



Slika 14: Polje strujanja generirano gradijentom radijacijskog naprezanja u terminu maksimalne značajne valne visine (6. 3. 2020. 6:30)



Slika 15: Polje promjene kote dna na kraju simulacijskog razdoblja 6. 3. 2020. 4:00 – 12:00

Sa slike 13 je razvidno da uslijed uplićavanja i refrakcije dolazi do smanjenja valnih visina u prijelaznom području, a zbog djelovanja refrakcije valovi nailaze praktički okomito na obalnu liniju u središnjem dijelu zapadnog žala. Rezultati sa slike 14 ukazuju na velike gradijente u polju strujanja, generiranog valovanjem. Najveće brzine pojavljuju se uzduž pera, na mjestima gdje je šljunčani sediment značajno većih dimenzija od nasipnog zrna $d_{50} = 16$ mm. Stoga je očekivano da morfodinamička aktivnost u tim zonama bude manje izražena. Uočava se i pojava cirkulacijskih vrtloga sa desne strane lijevog i srednjeg pera, a upravo u korijenskom dijelu profila L1 i L2 brzine strujanja poprimaju najmanje vrijednosti. Stoga se na tim mjestima očekuje manje izražena morfodinamika sa tendencijom akumulacije materijala.

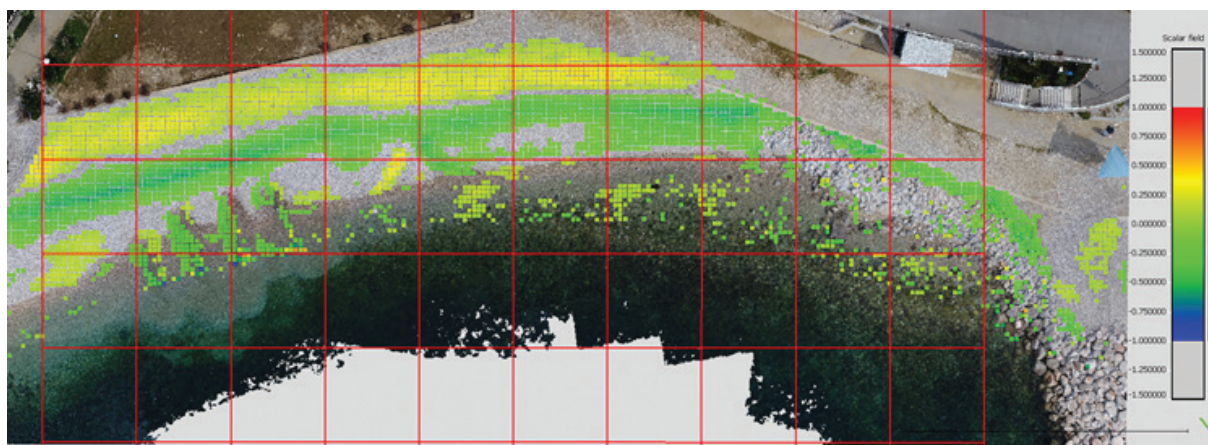
Rezultati prikazani na slici 15 ukazuju na nejednolikost intenziteta erozije i akumulacije kao posljedice prisustva i dužobalne (longshore) i poprečne (crossshore) komponente pronosa šljunčanog sedimenta. Najizraženija erozija pojavljuje se u podmorskom dijelu desnog ruba istočnog žala i lijevog ruba zapadnog žala. Na nadmorskom dijelu lica žala (referencirano na geodetsku nulu) prevladava akumulacija materijala. Nasuprot tome, u podmorskom dijelu lica žala (ispod geodetske nule) prevladava erozija.

Temeljem rezultata numeričkog modela za simulacijsko razdoblje 6. 3. 2020. 4:00 – 12:00 procijenjeno je da uslijed valovanja dolazi do akumulacije šljunčanog sedimenta na nadmorskom dijelu žala (iznad geodetske nule) od cca $+116$ m³ (zapadno žalo $+70$ m³, istočno žalo $+46$ m³). Ovakav razvoj događaja pogoduje održivosti žala obzirom da nisu potrebne velike količine materijala za dohranu žala, već samo radovi prebacivanja materijala žala s viših kota žala (berme) prema pokosu lica žala. Analiza oblaka točaka za snimke 3. 3. 2020. i

10. 3. 2020. pokazala je da ukupna promjena volumena materijala žala iznad geodetske nule iznosi $+138$ m³ (akumulacija, zapadno žalo $+88$ m³, istočno žalo $+50$ m³), a što je u suglasju s rezultatima numeričkog modela. Dobivene razlike su dijelom i posljedica vremena oporavka žala nakon oluje, odnosno od 6. 3. 2020. do uzimanja snimke terena 10. 3. 2020., a što nije obuhvaćeno numeričkim simulacijama.

4. ZAKLJUČAK

Modelski sustav sačinjen od numeričkog modela valnih deformacija (Mike 21sw) i modela hidrodinamike (Mike 21fm) sa modulom pronosa sedimenta implementiran je sa ciljem analize morfodinamike šljunčanog žala Ploče u Rijeci. U modelu valnih deformacija lom valova tretiran je prema formulaciji Ruessink i sur. (2003.). Parametrizacija hidrodinamičkog modela temeljena je na usporedbi rezultata numeričkih simulacija i primjene empirijskog obrasca za proračun intenziteta dužobalnog pronosa šljunka prema Van Rijn (2014.), te rezultata eksperimenta morfodinamike poprečnog šljunčanog profila u valnom kanalu (López i sur., 2006.). Korišteni su uvjeti valovanja sa rasponima incidentnih smjerova i značajnih valnih visina karakterističnih za akvatorij uokolo žala Ploče. Nastavno je provedena i numerička simulacija morfodinamike žala Ploče u jednoj realnoj situaciji jakog juga (6. 3. 2020.), uz forsiranje modela valnih deformacija sa registriranim vrijednostima valnih



Slika 16: Polje promjene kote dna dobiveno obradom snimaka (SfM fotogrametrija) u terminima 3. 3. 2020. i 10. 3. 2020. (samo zapadno žalo)

parametara na valografskoj postaji ispred žala Ploče. Rezultati su uspoređeni sa snimkama terena prije i poslije analizirane situacije jakog juga.

Simulacije fokusirane na analizu dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta pokazale su da polje strujanja generirano valovanjem značajno ovisi o incidentnom kutu valovanja. Pri valovanju SSE i S incidentnog smjera strujanje prati obalnu liniju od istoka prema zapadu, pri valovanju SSW incidentnog smjera pojavljuju se cirkulacijski vrtlog na većem dijelu zapadnog žala i koncentrirano mlazno strujanje usmjereno od obale na središnjem dijelu istočnog žala, a pri valovanju SW smjera vrtložno strujanje okupira dio istočnog žala uz desno pero, dok se mlazna struja od obale pojavljuje u središnjem dijelu zapadnog žala. Nadalje, povećanje incidentnog kuta valovanja u odnosu na obalnu liniju rezultira povećanjem dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta, a povećanje valne visine uzrokuje nelinearni prirast intenziteta dužobalnog pronosa. Najmanji intenzitet morfoloških promjena na žalu Ploče događa se pri valovanju SSE incidentnog smjera. Pri valovanju S smjera morfološke promjene su intenzivnije za 25 %, a u slučaju valovanja SSW smjera za 40 % (prosječno za $H_s = 1.0$ m, 1.5 m i 2.0 m).

Pojava akumulacije materijala u nadmorskom dijelu poprečnog profila pri ortogonalnom nailasku valova visine $H_s \approx 1$ m kvalitativno je reproducirana i primijenjenim numeričkim modelima, no intenzitet morfoloških promjena poprečnog profila je slabiji od izmjerenog u GWK valnom kanalu. Osnovni razlog odstupanju od izmjerenih vrijednosti promjena je u tome da numerički model ne uzima u obzir infiltraciju/eksfiltraciju kroz tijelo nasipnog materijala pri dizanju i povlačenju vala uzduž poprečnog profila. Obzirom na konfiguraciju obalne linije žala Ploče i njene izloženosti prema valovima iz sektora SSE – SSW, morfodinamika je dominantno pod utjecajem

dužobalnog pronosa šljunčanog sedimenta, pa se ovaj nedostatak numeričkog modela nije značajnije odrazio na pouzdanost rezultata simulacije za realnu situaciju valovanja tijekom 6. 6. 2020.

Rezultati numeričke simulacije za 6. 6. 2020. upućuju na zaključak da pri valovanju iz sektora SSE- SSW, sa značajnim valnim visinama H_s do 2 m, na nadmorskom dijelu žala prevladava akumulacija materijala. Potrebno je napomenuti da dio akumuliranog materijala na nadmorskom dijelu žala treba vraćati u podmorski dio na pozicije izražene erozije zbog održavanja stabilnosti lica žala u nadolazećem razdoblju.

Modelski rezultati erozije/akumulacije nasipnog materijala žala odgovaraju rezultatima obrade snimke terena u vidu oblaka točaka, kako na integralnoj skali promjene volumena nasipnog materijala u nadmorskom dijelu žala, tako i po prostornoj raspodjeli intenziteta promjena uzduž samog žala.

Nastavak istraživanja bit će usmjeren ka inkorporiranju procesa infiltracije/eksfiltracije u proračunsku rutinu morfodinamičkog modula.

ZAHVALA

Ovaj članak je nastao kao rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH, te financiranja iz programa „Znanstvena suradnja“ Hrvatske zaklade za znanost, koji je financirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda u sklopu Operativnog programa Učinkoviti ljudski potencijali 2014.-2020. Zahvalni smo i osoblju Geofizičkog odsjeka PMF-a, Sveučilišta u Zagrebu, koje nam je omogućilo dostupnost podataka o razinama mora sa mareografske postaje Bakar. ■

LITERATURA

- Austin, M.J.; Masselink, G. (2006.): Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach, *Marine Geology*, 229 (1-2), str. 59-77.
- Barnes, M.P.; O'Donoghue, T.; Alsina, J.M.; Baldock, T.E., (2009.): Direct bed shear stress measurements in bore-driven swash, *Coastal Engineering*, 56, str. 853-867.
- Buscombe, D.; Masselink, G. (2006.): Concepts in gravel beach dynamics, *Earth Sci. Rev.*, 79 (1-2), str. 33-52.
- Carter, R.W.G.; Orford, J.D. (1993.): The morphodynamics of coarse clastic beaches and barriers: a short and long term perspective, *Journal of Coastal Research*, 15, str. 158-179.
- Curtiss, G. M.; Osborne, P.D.; Horner-Devine, A.R. (2009.): Seasonal patterns of coarse sediment transport on a mixed sand and gravel beach due to vessel wakes, wind waves, and tidal currents, *Mar. Geol.*, 259 (1-4), str. 73-85.
- Chadwick, A.J. (1989.): *Field measurements and numerical model verification of coastal shingle transport*, BHRA, Fluid Engineering Centre, Bedford, England, str. 381-402.
- Dally, W.R.; Brown, C.A. (1995.): A modelling investigation of the braking wave roller with application to cross-shore currents, *J. of Geophys. Research*, 100 (C12), str. 24.876-24.883.
- Deltares/Delft Hydraulics (1989.): Scale effects in stability of gravel and stone slopes under wave attack in Deltaflume (na Holandskom), Report M1983 Part IV, Deltares/Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.
- Doering, J.C.; Bowen, A.J. (1995.): Parametrisation of orbital velocity asymetry of shoaling and breaking

- waves using bispectral analyses, *Coastal engineering*, 26 (1-2), str.15-33.
- Fredsoe, J. (1984.): The turbulent boundary layer in combined wave-current motion, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110 (HY8), str. 1103-1120.
- Fredsoe, J.; Deigaard, R. (1992.): *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, Advanced Series on Ocean Engineering, 3, World Scientific, 369 str.
- Jamal, M.H.; Simmonds, D.; Magar, V. (2014.): Modelling gravel beach dynamics with XBeach, *Coast. Eng.*, 89, str. 20-29.
- Hedegard, I.B. (1985.): Wave generated ripples and resulting sediment transport in waves, Series paper No. 36, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, 133 str.
- Kamphuis, J.W. (1991.): Alongshore sediment transport rate, *ASCE - Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 117, str. 624-640.
- Lončar, G.; Bekić, D.; Carević, D.; Mostečak, H.; Babić, M.; Grbić, N.; Pranjić, V. (2016.): Numeričko modeliranje morfodinamike poprečnog profila na šljunčanom žalu Medveja, *Hrvatske vode*, 24 (95), str. 29-38.
- López de San Roman-Blanco, B.; Coates, T.T.; Holmes, P.; Chadwick, A.J.; Bradbury, A.; Baldock, T.E.; Pedrozo-Acuña, A.; Lawrence, J.; Grüne, J. (2006.): Large Wave Channel (GWK) experiments on gravel and mixed beaches: experimental procedure and data documentation, *Coast. Eng.*, 53 (4), str. 349-362.
- Masselink, G.; Russell, P. (2006.): Flow velocities, sediment transport and morphological change in the swash zone of two contrasting beaches, *Marine Geology*, 227, str. 227-240.
- Nicholls, R.J.; Wright, P. (1991.): Longshore transport of pebbles: experimental estimates of K-factor, *Proceedings of Coastal Sediments '91*, ASCE, Seattle, USA, str. 920-933.
- Ojeda, E.; Guillen, J. (2008.): Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches, *Mar. Geol.*, 253 (1-2), str. 51-62.
- Pedrozo-Acuña, A.; Simmonds, D.; Otta, A.K.; Chadwick, A.J. (2006.): On the cross-shore profile change of gravel beaches, *Coast. Eng.*, 53 (4), str. 335-347.
- Pikelj, K.; Ružić, I.; Ilić, S.; James, M.R.; Kordić, B. (2018.): Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia, *Ocean & coastal management*, 156, str. 223-238.
- Poate, T.; Masselink, G.; Davidson, M.; McCall, R.; Russell, P.; Turner, I. (2013.): High frequency in-situ field measurements of morphological response on a fine gravel beach during energetic wave conditions, *Mar. Geol.*, 342, str. 1-13.
- Powell, K.A. (1990.): *Predicting short term profile response for shingle beaches*, HR Wallingford Report SR 219, Wallingford, UK.
- Ruessink, B.G.; Walstra, D.J.R.; Southgate, H.N. (2003.): calibration and verification of a parametric wave model on barred beaches, *Coastal Engineering*, 48, str. 139-149.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A.; Masselink, G. (2010.): Storm response and beach rotation on a gravel beach, Slapton Sands, U.K., *Marine Geology*, 278, str. 77-99.
- Ružić, I.; Marović, I.; Benac, Č.; Ilić, S. (2014.): Coastal cliff geometry derived from structure- from-motion photogrammetry at Stara Baška, Krk Island, Croatia, *Geo-marine letters*, 34(6), str. 555-565.
- Ružić, I.; Benac, Č.; Ilić, S.; Krvavica, N.; Rubinić, J., (2018.): Geomorfološke promjene minijaturnog žala na kršu, *Hrvatske vode*, 26(103), str. 27-34.
- Stockdon, H.F.; Holman, R.A.; Howd, P.A.; Sallenger, A.H. (2006.): Empirical parametrization of Setup, Swash and Runup, *Coastal Engineering*, 53(7), str. 573-588.
- US Army Corps of Engineers (1984.): *Shore Protection Manual*, Coastal Engineering Research Centre.
- Van Rijn, L.C. (2009.): *Erosion of gravel/shingle beaches and barriers*, EU - Conscience Project, Deltares, Netherlands, 67 str.
- Van Rijn, L.C. (2014.): A simple general expression for longshore transport of sand, gravel and shingle, *Coastal Engineering*, 90, str. 23-39.
- Van Wellen, E.; Chadwick, A.J.; Mason, T. (2000.): A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches, *Coastal Engineering*, 40, str. 243-275.
- Williams, J.J.; Buscombe, D.; Masselink, G.; Turner, G.; Swinkels, C. (2012.a.): Barrier dynamics experiments (BARDEX): Aims, design and procedures, *Coastal Engineering*, 63, str. 3-12.
- Williams, J.J.; de Alegria-Arzaburu, A.R.; McCall, R.T.; van Dongeren, A. (2012.b.): Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: laboratory and field results, *Coastal Engineering*, 63, str. 62-80.
- Zyserman, J.A.; Fredsoe, J. (1996.): *Validation of a deterministic sediment transport model for sheet-flow conditions*, Progress Report 76, Institute of Hydrodynamics and hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, str. 1-7.

Morphodynamics of the gravel beach Ploče in intense sirocco conditions

Abstract. An analysis of the morphodynamics of the artificially filled gravel beach Ploče in Rijeka was conducted. The numerical simulations of wave deformations and gravel sediment transport were initially performed for hypothetical wave events with event directions SSE (157.50), S (1800), SSW (202.50) and SW (225°), a variation of significant wave heights ($H_S = 1.0$ m, 1.5 m and 2.0 m) and corresponding peak wave periods. The parameterization of the numerical model is based on the results of the empirical pattern of the along-the-coast component of gravel sediment transport and the results of a laboratory investigation of the transverse component of gravel sediment transport. This was followed by a numerical simulation of the morphodynamics for one intense sirocco event (March 6, 2020), using the actual wave conditions recorded at the wave station located in immediate proximity of the beach Ploče and the sea level dynamics recorded at the mareographic station Bakar. The verification of the model simulation results for the actual environmental conditions was performed by comparing the positions and quantities of eroded / accumulated material along the shore with the terrain image processing in the form of point clouds. The total volumes of the eroded and accumulated gravel sediment based on image processing are in agreement with the model values.

Key words: gravel beach, morphodynamics, numerical model

Morphodynamik des Kiesstrandes Ploče bei starkem Schirokko

Zusammenfassung. Eine Analyse der Morphodynamik des künstlich angelegten Kiesstrandes Ploče in Rijeka ist durchgeführt worden. Anfänglich wurden numerische Simulationen von Wellendeformationen und Feststofftransport eingesetzt für die hypothetischen Situationen von Wellen mit Inzidenzrichtungen SSE (157.5°), S (180°), SSW (202.5°) und SW (225°), mit der Variation von großen Wellenhöhen ($H_S = 1$ m, 1,5 m und 2 m) und entsprechenden Spitzenwellenperioden. Die Parametrisierung des numerischen Modells beruht auf den Ergebnissen des empirischen Modells des Feststofftransports des Kiesel entlang der Küste sowie auf den Ergebnissen von Laboruntersuchungen für die Breitenkomponente des Kiestransportes. Danach wurde die numerische Simulation der Morphodynamik einer Situation mit starkem Schirokko (am 6.3.2020) eingesetzt unter Anwendung von realen Wellenbedingungen, die auf der Wellenmessstation in der unmittelbarer Nähe des Strandes Ploče aufgenommen wurden sowie unter Anwendung der Dynamik der Meeresspiegel, die auf der mareographischen Station Bakar erfasst wurde. Die Simulationsergebnisse für die realen Umweltbedingungen wurden durch Vergleich von Positionen und Mengen an erodiertem/akkumuliertem Material entlang des Strandes mit der Bearbeitung der Geländeaufnahme in Form einer Punktwolke verifiziert. Die auf Grund von den Aufnahmen erfassten Gesamtvolumina von erodiertem und akkumuliertem Kies stehen im Einklang mit den Modellwerten.

Schlüsselwörter: Kiesstrand, Morphodynamik, numerisches Modell