

NUMERIČKO MODELIRANJE MORFODINAMIKE POPREČNOG PROFILA NA ŠLJUNČANOM ŽALU MEDVEJA

izv. prof. dr. sc. Goran Lončar,
dipl. ing. građ.
Sveučilište u Zagrebu, Građevinski
fakultet, Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb
goran.loncar@grad.unizg.hr

doc. dr. sc. Damir Bekić, dipl. ing. građ.
Sveučilište u Zagrebu, Građevinski
fakultet, Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

doc. dr. sc. Dalibor Carević,
dipl. ing. građ.
Sveučilište u Zagrebu, Građevinski
fakultet, Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Hrvoje Mostečak, dipl. ing. građ.
Sveučilište u Zagrebu, Građevinski
fakultet, Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Maria Babić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu, Građevinski
fakultet, Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Nina Grbić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu, Građevinski
fakultet, Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Vjera Pranjčić, mag. ing. aedif.
Sveučilište u Zagrebu, Građevinski
fakultet, Zavod za hidrotehniku
Kačićeva 26, 10000 Zagreb

Provedena je numerička analiza morfodinamike karakterističnog poprečnog profila šljunčanog žala Medveja. Osnovna pobuda na pokretanje šljunka u profilu žalo/podmorje su gravitacioni vjetrovni valovi, dok strujanje mora inducirano plimotvornom silom, gradijentnim strujama i strujama drifta nije uzeto u obzir. Prvotno je uspostavljen numerički model valnog generiranja i valnih deformacija za akvatorij koji obuhvaća Kvarner i Riječki zaljev te je njime proračunata prostorna i vremenska raspodjela značajnih valnih visina H_s i vršnih valnih perioda T_p tijekom 2013. godine. Modelski rezultati H_s i T_p za dubokovodnu točku ispred ulaza u uvalu Medveja definiraju rubne uvjete detaljnog modela valnih deformacija i morfodinamike u prelaznom i plitkovodnom području za karakteristični profil žalo/podmorje u uvali Medveja. U nastavku je analizirano ponašanje hipotetskog profila dobivenog nasipavanjem na stvarni (snimljeni) profil s ciljem povećanja kupališnog prostora. Rezultati modelskih analiza ukazuju na zone izražene erozije i sedimentacije uzduž analiziranog profila te težnje za uspostavom ravnotežnog profila koji koincidira sa stvarnim-izmjenim. Modelom proračunati profil uspoređen je s izračunatim temeljem empirijskog izraza. Rezultati numeričkog morfodinamičkog modela potvrđuju mogućnost njegove primjene u svrhu procjene intenziteta destruktivnog djelovanje jakih valova na lice šljunčanih žala.

Ključne riječi: Šljunčano žalo, numerički model XBeach-G, morfodinamika

1. UVOD

Tijekom posljednjeg desetljeća primijećen je stalni trend povećanja interesa za korištenjem šljunčanih žala, zbog čega se osim postojećih prirodnih šljunčanih žala izvode i umjetna žala nasipavanjem. Loš izbor nasipnog materijala, u smislu definiranja nagiba lica žala i veličine nasipnog zrna, ili pozicije koja po geološkim, geomorfološkim i hidrodinamičkim uvjetima ne "podupire" stvaranje plaže, uobičajeno rezultira intenzivnim odnošenjem nasipnog materijala u zonu većih dubina. Pri tomu se osim materijalnih šteta ugrožava i biocenoza morskog dna.

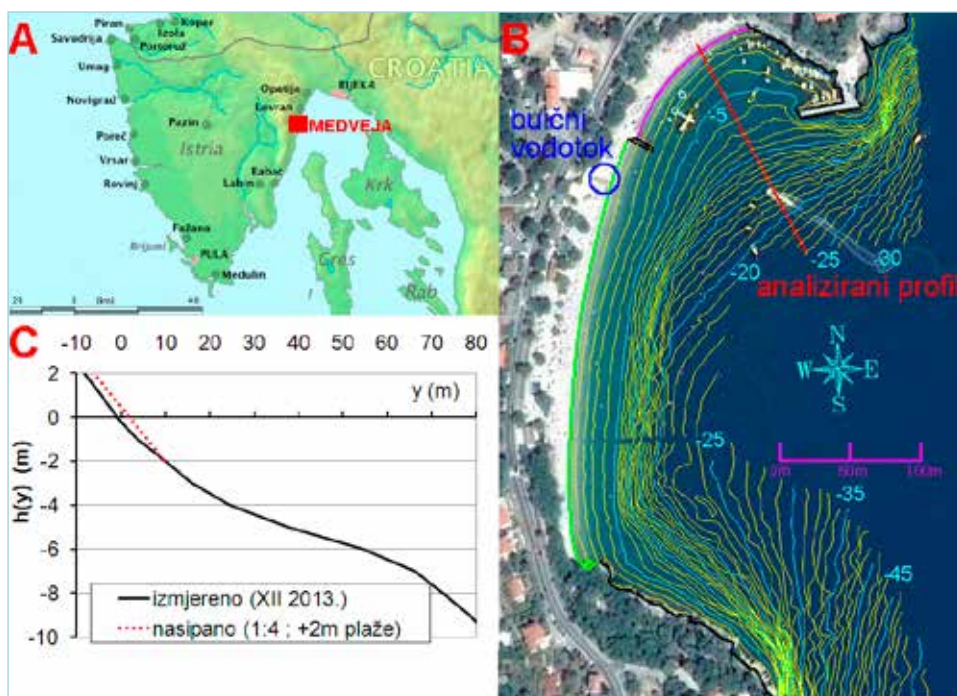
Osim razvoja novih tehnologija (optička i akustična mjerenja za laboratorijsko i in-situ istraživanje) u recentnije se vrijeme bilježi nagli razvoj numeričkih modela morfološkog ponašanja šljunčanih plaža (Austin i Masselink, 2006., Ojeda i Guillen, 2008., Curtiss et al., 2009.; Poate et al., 2013.). Vjetrovni valovi predstavljaju glavni uzročnik morfoloških promjena lica žala, dok strujanje mora generirano plimnim signalom, gradijentnijm strujama i strujama drifta nije značajno za pronos krupnozrnog sedimenta šljunčanih žala. Sam proces interakcije valova i žala/podmorja je kompleksan hidrodinamički proces, ukoliko je prevladavajući materijal žala šljunak ili mješavina pijeska i šljunka (Orford, 1977.). Morfološka dinamika očituje se pojavom izražene erozije u zoni svoša vala (eng; swash zone), te dvojakim procesom prebacivanja dijela materijala plaže iznad zone svoša i odnošenja materijala u dublje slojeve podmorja. Intenzitet morfoloških promjena ovisan je o učestalosti pojedinih incidentnih valnih spektara tijekom promatranog razdoblja (Almeida, 2013.). Stabilni prirodni profili šljunčanih žala imaju karakteristiku da se nakon

situacija intenzivnog valovanja vraćaju-oporavljaju tijekom nastavnog razdoblja s blagom valnom klimom, odnosno inicijalno erodirani i sedimentirani materijal ponovno se izvlači iz dubljih slojeva na lice žala.

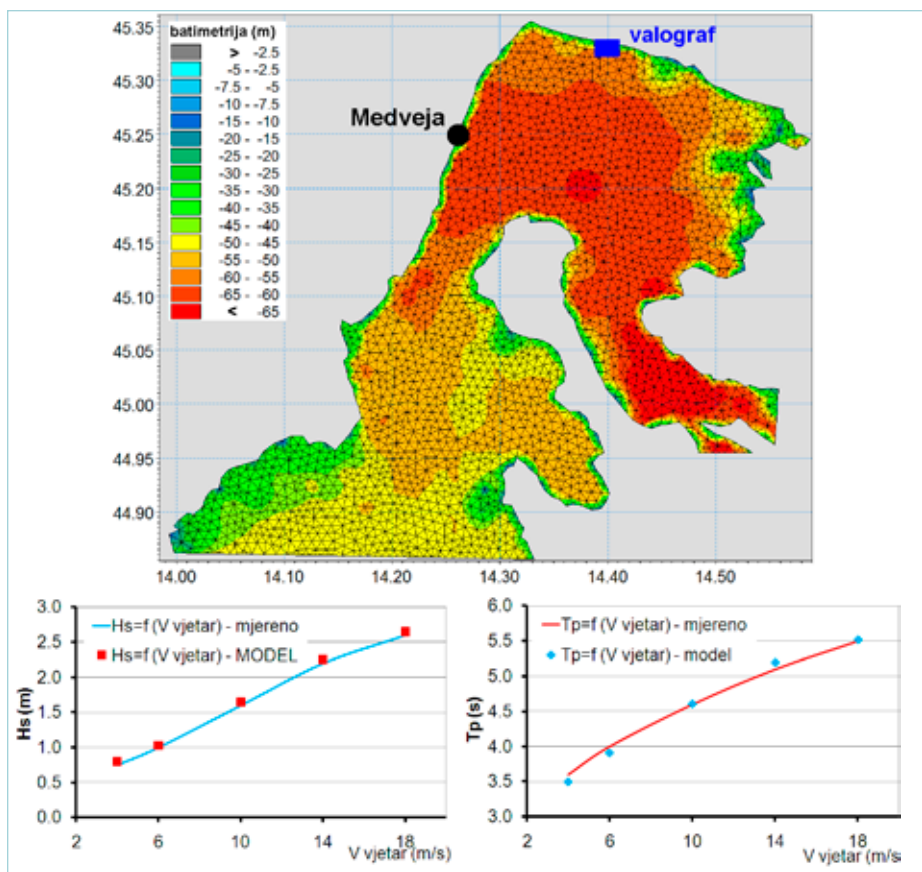
U literaturi (Dean,1987.) definiran je empirički izraz za aproksimaciju odnosa dubine (kote dna) i udaljenosti od obale uzduž šljunčanog profila žalo/podmorje. Za primjenu empiričkog obrasca korisnik treba imati na raspolaganju samo podatak o promjeru zrna plažnog materijala. Deanov model pokriva široki raspon veličine zrna materijala žala, uključujući frakcije pijeska i šljunka. Ipak, treba napomenuti da je najveći dio podataka korištenih u sintezi empiričkog obrasca (Dean,1987.) dobiven praćenjem morfodinamike piješčanih žala. Stoga ne čudi da je usporedba rezultata primjene empirijskog obrasca s izmjerenim profilima šljunčanih žala (Bradbury, 2000.; Bradbury et al. 2005.; Obhrai et al., 2008.) pokazala značajna odstupanja, poglavito u dubinama ispod zone svoša.

Odabrana lokacija provedenog istraživanja je mikro žalo u uvali Medveja, točnije jedan poprečni profil žalo/podmorje (slika 1). Bitna značajka odabranog profila je ortogonalnost incidentnog smjera najvećih valova i izobata uzduž tog profila. Provedbom ankete na terenu dobivene su i sljedeće informacije:

- na središnjem i južnom dijelu žala (slika 1, zona obalne linije naznačena zelenom bojom) uočen je uzdužni (eng: long-shore) pronos materijala pri djelovanju većih valova generiranih burom i jugom. Tijekom razdoblja blažeg valovanja, primarno iz raspona incidentnih smjerova ENE-SSE žalo se vraća u prvobitnu formu. Ovaj dio morfodinamičkog procesa nije analiziran u sklopu



Slika 1. Pregledna kartu šireg područja s Inaznakom lokacije provedenog istraživanja (A), batimetrijski snimak za akvatorij uvali Medveja (izobate s korakom dubine 1m (B)) i analizirani poprečni profil žalo/podmorje (prikaz do dubine -10m (C))



Slika 2 Prostorna diskretizacija modelske prostorne domene s nestrukturiranom mrežom konačnih volumena na batimetrijskoj podlozi (lijevo) te izmjerene/modelirane značajne valne visine H_s i vršni periodi T_p u ovisnosti o izmjerenim brzinama vjetra V_{vjetar} iz SSE smjera s trajanjem 12 sati

provedenog istraživanja i ovdje prezentiranih rezultata. Središnji i južni dio žala razgraničeni su od sjevernog dijela žala (slika 1, zona obalne linije naznačena rozom bojom) s punim gatom koji djelomično prekida proces uzdužnog transporta i donos materijala iz središnjeg i južnog dijela.

- sjeverni dio žala (slika 1) direktno je izložen valovima generiranim vjetrovima juga, pri čemu valovi nailaze približno okomito na izobate. Valovi generirani burom u ovoj zoni obalne crte ne uzrokuju uočljive morfološke promjene.

Šljunčano žalo Medveja smješteno je u podnožju planine Učke, na obali Kvarnerskog zaljeva (slika 1). Žalo ima duljinu oko 420 m i površinu 44.000 m². Ovo minijaturno žalo nastalo je na ušću bujičnog vodotoka s Učke, akumulacijom bujičnih sedimenata koji su djelovanjem mora tijekom vremena oblikovani u oblutke kakve danas nalazimo na žalu. Općenito, minijaturna žala nalaze se u uvalama omeđenim rtovima te su karakterizirana malom izmjenom sedimenta između žala i obližnjeg podmorja pri djelovanju valova u ograničenom rasponu incidentnih smjerova (Ružić, 2014. b). Postoji cijeli niz publiciranih istraživanja o ovoj tematici na bliskim lokalitetima (Benac et al., 2007., 2010. a., 2010. b., Faivre et al., 2011., Juračić et al., 2009., Ružić et al., 2011., Ružić et al., 2013., Ružić, 2014. a).

Transport sedimenta (morfodinamika) minijaturnih žala uobičajeno se dijeli na uzdužobalnu (long-shore) i poprečnu (okomito na obalu, cross-shore) komponentu. Jedna od karakteristika minijaturnih žala je pojava rotacije žala, odnosno transporta sedimenta s jednog na drugi kraj žala (Ružić, 2014. a). Najizraženiji se pomaci registriraju na rubnim točkama žala, a najmanji na sredini žala (točke rotacije žala). Veličina i oblik žala, elementi izgradnje umjetne prirode na njoj i prevalentna valna klima određuju dominantnu komponentu u generiranju rotacije žala. Tako autori Short i Masselink (1999.) daju prednost uzdužobalnom transportu sedimenta, dok su Ranashinge et al. (2004.) mišljenja da pomaci sedimenta okomito na obalu (cross-shore) značajno sudjeluju u rotaciji žala. Pomalo oprečna mišljenja pojavljuju se i po pitanju formiranja berme, pri čemu Weir et al. (2006.) tvrde da je formiranje berme vezano primarno uz transport prema obali, dok Hine (1979.) sugerira važnost dužobalnog transporta sedimenta u prirastu berme.

U ovom je radu prikazana provedba nekoliko koraka-faza numeričkog modeliranja, zaključno s rezultatima. Kako bi se dobili rubni uvjeti za numerički model valnih deformacija i morfodinamiku uzduž usvojenog profila žalo/podmorje (značajne valne visine H_s i vršne valne periode T_p) uspostavljen je numerički model valnog generiranja i valnih deformacija za područje Kvarnera i Riječkog zaljeva (slika 2). Njime je analizirana prostorno-vremenska razdioba značajnih valnih visina H_s i vršnih perioda

T_p tijekom 2013. godine. Iz cjelokupnog simulacijskog razdoblja (2013. godina), za poziciju dubokovodne točke s početka analiziranog profila (slika 1), odabrane su redosljedne situacije s pragom premašenja $H_s > 0.7\text{m}$ iz raspona incidentnih smjerova $123.8^\circ - 168.8^\circ$. Usvojeni prag premašenja ($H_s > 0.7\text{m}$) usvojen je s ciljem da se obuhvate sve energetski relevantne situacije vezane uz relativno velike značajne valne visine i vršne periode. S druge strane, valni spektri malih značajnih valnih visina i vršnih perioda nemaju značajnu morfodinamičku ulogu, a zahtijevaju gustu proračunsku mrežu za razlučivanje valnih deformacija kraćih komponenti valnog spektra u prijelaznom i plitkovodnom području. Nastavno je provedena numerička analiza morfoloških promjena uzduž hipotetskog profila dobivenog nasipavanjem postojećeg (slika 1). Nasipavanje se izvodi s ciljem dohrane žala te povećanja površine žala namijenjene rekreaciji. Nasipavanje se izvodi s nagibom koji je vrlo blizak postojećem do dubine 2 m. U nastavku analiziranog profila, do dubine 24 m, modelski profil odgovara izmjerenom (slika 1).

Općenito, prirodna dohrana žala zasniva se na donosu vučenog nanosa s buičnim vodotokom. Ukoliko regulacija bujičnog vodotoka uključuje i pregrade s retencijskim prostorima dolazi do prekida prirodnog procesa prihrane žala. Osim toga, prekid poljoprivredne proizvodnje ili prenamjena zemljišta za sobom također povlači i smanjenje erozije zaobalja.

U poglavljima 2 i 3 dana su osnovna objašnjenja o implementaciji numeričkog modela valnog generiranja i valnih deformacija te morfodinamičkog modela. U poglavlju 4 prikazani su rezultati provedbe modelskih simulacija, dok je u zaključnom poglavlju dan osvrt na provedeno istraživanje i dobivene rezultate.

2. NUMERIČKI MODEL VALNOG GENERIRANJA I VALNIH DEFORMACIJA

Na slici 2 prikazano je područje obuhvaćeno s prostornom domenom numeričkog modela valnog generiranja i valnih deformacija. U prostornoj diskretizaciji korištene su nepreklapajuće triangularne ćelije (konačni volumeni, slika 2). Udaljenost između numeričkih čvorova, smještenih u težište svakog konačnog volumena, je varijabilna i proteže se od 650 m u dubokovodnom području do 150 m u zoni same obalne crte. Predmetni akvatorij je karakteriziran velikim batimetrijskim gradijentom u zoni priobalja pa valne deformacije u plitkovodnom području nisu bitne za proces valnog generiranja. Stoga je primjenjeni proračunski korak od 150 m racionalan.

U ovom dijelu provedbe numeričkih simulacija korišten je spektralni model valnog generiranja i valnih deformacija Mike 21sw (www.dhigroup.com). Model

se oslanja na spektralnu formulaciju prema Komena et al. (Komen et al., 1994.) pri čemu je spektralna frekvencijska domena diskretizirana logaritamskom skalom od minimalne frekvencije 0.08 Hz (valni period 12.5 s) do maksimalne frekvencije 0.95 Hz (valni period 1.05 s), kroz 28 diskretnih koraka. U sklopu modelske rutine prate se procesi valnog generiranja s vjetrom, međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije i difrakcije te disipacijski procesi izazvani trenjem s dnom, površinskim lomovima valova (eng: white capping) i lomovima valova pri nailasku na male dubine. Numerička integracija za član izvora provedena je prema metodologiji prikazanoj u radovima Hercbach-a i Jannsen-a (1999.). Modelska parametrijacija, primarno vezana uz disipaciju površinskog loma valova, usvojena je na bazi izmjerenih odnosa značajnih valnih visina H_s i vršnih perioda T_p o izmjerenim brzinama vjetra V_{vjetar} (Građevinski institut, 1991.) (slika 2). Na slici 2 prikazani su i modelski rezultati za poziciju valografske mjerne postaje (Riječki lukobran u luci Rijeka; Građevinski institut, 1991.) pri stacionarnom i homogenom djelovanju vjetra od 4, 6, 10, 14 i 18 m/s. Na otvorenim granicama korišten je nulti spektar (nema toka valne energije kroz njih), a postizanje sličnosti numeričkih rezultata H_s i T_p s mjerenjima na spomenutoj sjevernijoj lokaciji je dobiveno varijacijom najsenzibilnijeg parametra numeričkog modela valnog generiranja (koeficijent white capping). Primjena ovakve formulacije rubnih uvjeta isključuje utjecaj valnog generiranja u zoni otvorenog mora na valovanje u području prostorne domene modela, te su rezultati numeričke analize izvjesno točni samo za blisku okolicu valografske postaje. Obzirom da je lokacija plaže Medveja južnije od referentne valografske postaje, može se konstatirati da rezultati numeričkih simulacija daju blago umanjene vrijednosti H_s i T_p u odnosu na stvarne.

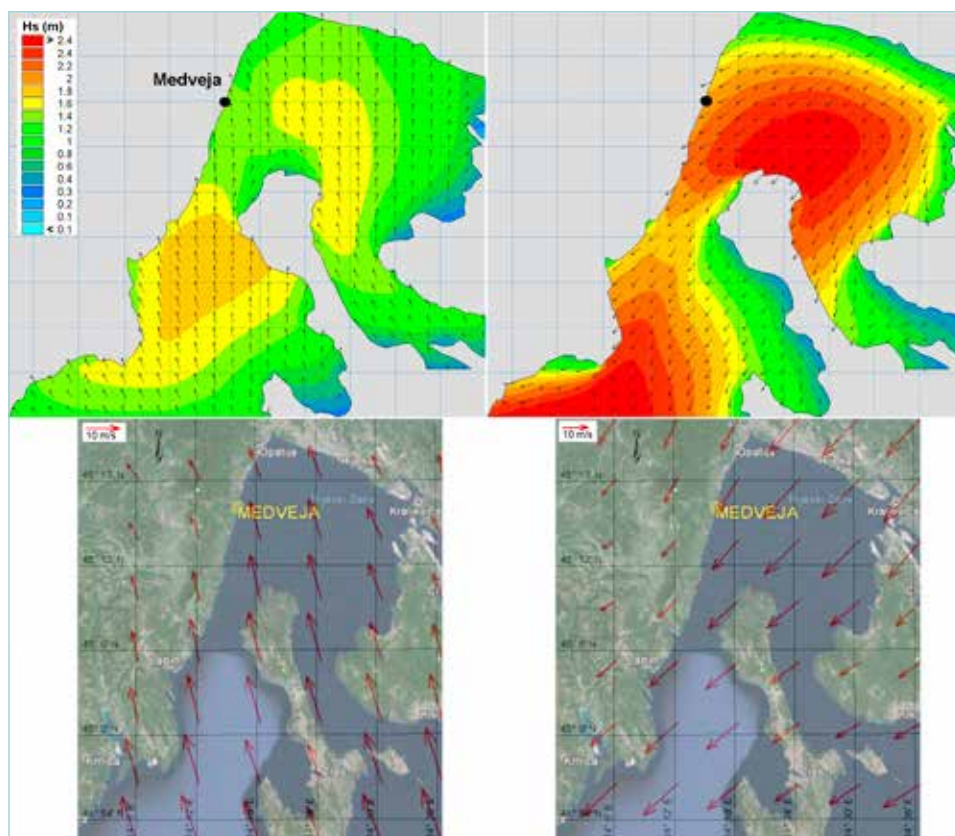
Početni uvjeti simulacije (1.1.2013. 0:00) definirani su odsustvom valovanja na cijelom modeliranom području. Tijekom analiziranog razdoblja (1.1.2013. – 1.1.2014.) model je forsiran poljem vjetra iz atmosferskog modela Aladin-HR s prostornom rezolucijom od 8 km i vremenskom rezolucijom od 3 sata (Brzović i Strelec-Mahović, 1999.; Ivatek-Sahdan i Tudor, 2004.).

Ekstrakcijom modelskih rezultata (H_s i T_p) za dubokovodnu točku na početku analiziranog profila prepoznato je ukupno 7 situacija u kojima se pojavljuje $H_s > 0.7\text{ m}$ u rasponu incidentnih smjerova $123.8^\circ - 168.8^\circ$. Početak pojedine situacije, njezino trajanje, pripadna srednja značajna valna visina i vršna perioda, te maksimalna značajna valna visina i prevladavajući incidentni smjer valovanja prikazani su u tablici 1.

Polje značajnih valnih visina za situaciju 4 (18.3.2013. 13:00) prikazano je na slici 3, kao i polje značajnih valnih visina u uvjetima djelovanja olujne bure (11.11.2013. 10:00).

Tablica 1 Početak pojedine situacije, njezino trajanje, pripadne srednje značajne valne visine (H_{S-AV}), maksimalne značajne valne visine (H_{S-MAX}), srednje vršne periode (T_{P-AV}) i prevladavajući incidentni smjerovi za dubokovodnu točku na početku analiziranog profila

situacija	početak situacije	trajanje (h)	dubokovodi parametri (početak profila)			
			H_{S-AV} (m)	H_{S-MAX} (m)	T_{P-AV} (s)	smjer (°)
1	20.1.2013 15:00	2	0.81	0.81	3.9	161
2	12.2.2013 0:00	3	0.73	0.73	4.3	145
3	6.3.2013 13:00	9	0.78	0.84	4.0	160
4	18.3.2013 2:00	16	1.11	1.48	4.3	158
5	16.5.2013 14:00	3	0.71	0.71	4.0	162
6	10.10.2013 19:00	4	0.76	0.80	3.5	159
7	25.12.2013 16:00	27	1.09	1.80	4.2	158



Slika 3 Polje značajnih valnih visina H_s (gore) za situaciju puhanja jakog juga (18.3.2013. 13:00) i olujne bure (11.11.2013. 10:00) dobivena modelom valnog generiranja i valnih deformacija uz primjenu polja vjetra (dole) iz atmosferskog numeričkog modela Aladin-Hr

3. NUMERIČKI I EMPIRIJSKI MORFODINAMIČKI MODEL

U zadnjoj dekadi značajna pažnja je poklonjena razvoju modela kojim se prati dinamika vala na samom licu šljunčanog žala (Pedrozo-Acuna et al., 2006. Williams et al., 2012.; Jamal et al., 2014.). U sklopu numeričkih simulacija te rezultata prezentiranih u ovom radu korišten je „open-source“ model XBeach-G (<http://oss.deltares.nl>). Ovim modelom se rješava morfodinamika poprečnog profila šljunčanih žala/podmorja uslijed djelovanja vjetrovnih valova u prijelaznom i plitkovodnom području. Modelom su uključeni procesi infiltracije i ekfiltracije mora u i iz tijela šljunčanog žala pri penjanju i spuštanju vala uzduž lica žala (McCall et al., 2012.), pri čemu se interakcija površinskog i podpovršinskog toka promatra korištenjem jednog vertikalnog sloja (jednadžbe usrednjene za vertikalni smjer). Vertikalna raspodjela brzina i tlakova proračunava se primjenom

dva kvazi 3D modela za površinu i dno površinske vode i stupca podzemne vode uz usvajanje nehidrostatske aproksimacije raspodjele tlakova. Detaljnija objašnjenja o primijenjenim jednadžbama i njihovom rješavanju dana su u radu (McCall et al., 2012. ; 2014., Roelvink et al. 2009.). Korišteni numerički model (Xbeach-G) je verificiran temeljem istraživanja na fizikalnom modelu malog mjerila i detaljnih in-situ istraživanja i podataka dobivenih daljinskom detekcijom za nekoliko šljunčanih žala uzduž obalne crte engleske (Poate et al., 2013. ; McCall et al., 2014.).

Za modelske rubne uvjete (dubokovodna točka na kraju analiziranog profila), osim ekstrahiranih podataka H_s i T_p iz modela valnog generiranja i valnih deformacija, usvojeni su JONSWAP valni spektri s $\gamma = 3.3$. Za vrijednost koeficijenta propusnosti u modelu podzemnog toka usvojena je vrijednost $k = 0.2$ m/s (Horn, 2002.), za Shieldov bezdimenzionalni koeficijent trenja

Tablica 2 Amplitude i faze plimnih konstituenata za lokaciju Bakar (korišteno za sintezu hoda morskih razina)

O1		P1		K1		N2		M2		S2		K2	
amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza	amp	faza
(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)	(cm)	(°)
4.41	53.1	5	65.4	14.06	67.4	1.96	252	10.32	250.1	5.75	250.4	1.71	235.4

sedimenta usvojena je vrijednost 0.025, te fazni pomak u Nielsenovom graničnom sloju od 25° i kut unutarnjeg trenja od 35° . Za d_{50} usvojena je vrijednost 14.5 mm, temeljem laboratorijskog ispitivanja granulometrijskog sastava uzorka s pozicije lica žala (slika 1). Morske razi su varijabilne tijekom provedenih simulacija, a vremenske serije morskih razi dobivene su temeljem podataka o amplitudama i fazama 7 osnovnih konstituenata plimnog signala za lokaciju Bakar (Janeković i Kuzmić, 2005., tablica 2). Zaključno, rubni uvjeti modela XBeach-G (H_s i T_p) definirani su s usrednjenim vrijednostima po pojedinoj situaciji, kako je to i prikazano u tablici 1.

U radu Dean (1987.) predstavljen je empirički izraz za ravnotežni poprečni profil dna, pri čemu je njegova primjena moguća uz poznavanje promjera sedimenta d_{50} . Izraz je dan u analitičkoj formi $h(y) = A(d) * y^{2/3}$, gdje je y horizontalna udaljenost u poprečnom smjeru i u razini mirne razi, a $A(d)$ empirički parametar definiran odnosom $A(d) = 0,067 d_{50}^{0,44}$. Usporedba profila temeljem primjene empiričkog modela s rezultatima mjerenja i numeričkog modela dana je u nastavku.

4. REZULTATI MODELA

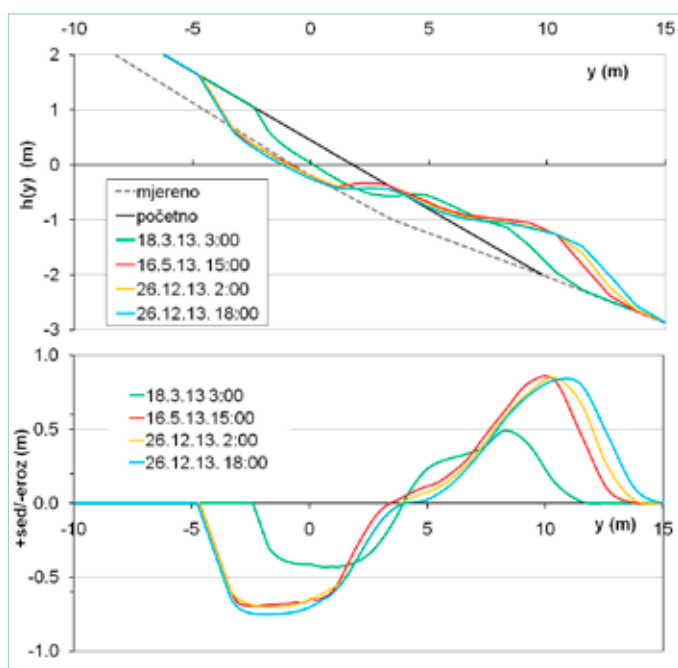
Na slici 4 prikazan je izmjereni profil žalo/podmorje u prosincu 2013. godine i proračunati profili u 4 termina tijekom simulacijskih razdoblja. Pripadna raspodjela intenziteta akumulacije/erozije uzduž analiziranog profila također je prikazana na slici 4.

Sa slike 4 se uočava najizraženija erozija u zoni svoša (zona uspinjanja po površini žala nakon loma vala) te zadržavanje (akumulacija) nasipnog materijala u zoni većih dubina. Proces erozije se usporava nakon završetka situacije 4 u kojoj je bilježena prva pojava značajnih valnih visina >1 m u dužem kontinuiranom razdoblju (16 sati) tijekom simulacijskog razdoblja. Morfodinamika analiziranog profila u nasipanom dijelu pokazuje težnju ka postizanju postojećeg, očigledno bolje uravnoteženog poprečnog profila.

Iz prikazanih rezultata očituje se da model može dobro simulirati destrukciju profila u ekstremnim uvjetima valovanja, dok oporavak profila tijekom dužih razdoblja blage valne klime još uvijek nije moguće kvalitetno interpretirati korištenim numeričkim modelom.

Analizirani hipotetski profil je erodiran na duljini od 6.5 m, gledano od stacionaže mirne razi prema obali (od $x = 1.5$ m do $x = -5$). Rezultati istraživanja morfodinamike mikro žala na bliskoj lokaciji (šljunčano mikro žalo Klančac kraj Brseća) s metodologijom Structure from-Motion (SfM) fotogrametrije (Ružić, 2014. a) pokazala su izraženu eroziju poprečnog profila žala na duljini \square 7m od mirne razi prema obali (Ružić, 2014. a, slika 6, 8, str. 76, profil između A i B), upravo nakon epizode juga u prosincu 2013. Potrebno je napomenuti da žalo Klančac ima duljinu 37 m, te iskazuje izrazitu sklonost rotaciji, pri djelovanju ekstremnog valovanja generiranog vjetrovima juga i bure. Tako se u uvjetima jakog juga osim erozije na jugozapadnom dijelu žala pojavljuje i izražena akumulacija materijala na sjeveroistočnom dijelu žala.

Ukoliko se pretpostavi da je analizirani profil bez nasipavanja (izmjereni profil) dinamički stabilan, za očekivati je da pri istom forsiranju takav profil pokazuje jači otpor promjenama, te se zaključno postiže i manji stupanj akumulacije/erozije. Stoga je numerička simulacija ponovljena i za slučaj izmjerenog profila bez nasipavanja, uz istovjetne rubne uvjete (H_s , T_p mirna raz mora, tablica 1) i modelsku parametризaciju. Usporedba akumulacije/erozije uzduž analiziranog profila sa i bez nasipavanja prikazana je na slici 5. Integracijom modelskih vrijednosti uzduž analiziranog profila dobivene su erodirane površine za situaciju bez nasipavanja 1.05 m² i za situaciju s nasipavanjem 4.45 m². Rezultati jasno



Slika 4 Izmjereni profil plaža/podmorje u prosincu 2013. godine i modelirani profili u 4 termina tijekom simulacijskih razdoblja (lijevo), te pripadna akumulacija/erozija uzduž analiziranog profila (desno). Zelena linija (18.3.13 3:00) odnosi se na početak situacije 4, odnosno kraj situacije 3, crvena linija (16.5.13 15:00) odnosi se na početak situacije 5, odnosno kraj situacije 4, žuta linija (26.12.13 2:00) odnosi se na sredinu situacije 6 a plava linija (26.12.13 18:00) odnosi se na kraj situacije 7.

ukazuju na znatno veći stupanj otpornost prirodnog profila bez dodatnog nasipavanja.

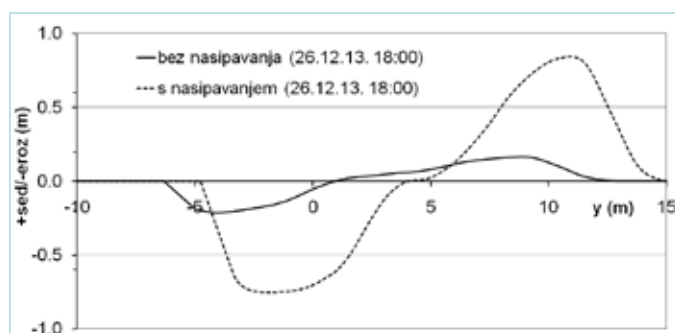
Usporedba ravnotežnog profila dobivenog primjenom empiričkog modela, prezentiranog u poglavlju 3, s rezultatima numeričkog modela dana je na slici 6. Kako je i navedeno u referencama (Bradbury, 2000.; Bradbury et al. 2005.; Obhrai et al., 2008.), empirički izraz daje prihvatljivu aproksimaciju raspodjele dubina samo u području malih dubina, u konkretnom slučaju do dubine 1.5 m.

5. ZAKLJUČAK

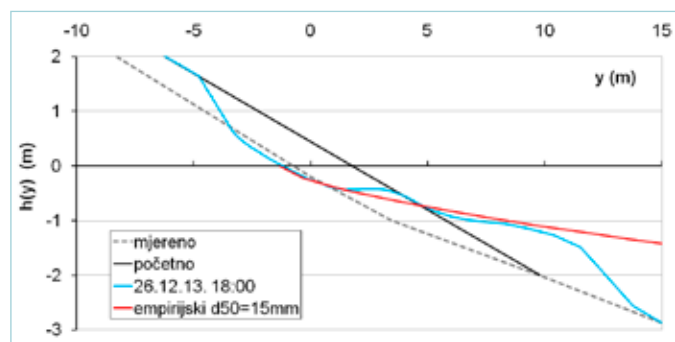
U radu su prikazani koraci uspostave i rezultati numeričkog modela valnog generiranja i deformacija za akvatorij Kvarnera i Riječkog zaljeva te modela valnih deformacija i morfoloških promjena uzduž karakterističnog poprečnog profila šljunčanog žala Medveja. Rubni uvjeti za numerički model valnih deformacija i morfodinamiku uzduž usvojenog profila žalo/podmorje (H_s i T_p) dobiveni su ekstrakcijom rezultata iz lokalnog modela valnog generiranja (akvatorij Kvarner i Riječki zaljev), forsiranog poljem vjetra iz atmosferskog modela Aladin-HR s rezolucijom 8 km i 3 sata. Proces morfološke dinamike uzduž profila žalo/podmorje praćen je samo za uvjete djelovanja gravitacijskih vjetrovnih valova iz raspona incidentnih smjerova $123.8^\circ - 168.8^\circ$ (valovi juga), s pragom premašenja $H_s > 0.7$ m. Simulacijsko razdoblje obuhvaćeno provedbom numeričkih analiza je 1.1.2013. – 1.1.2014. Koristeći isto modelsko forsiranje (rubni uvjeti) i modelsku parametrizaciju, analizirana je morfodinamika uzduž dva profila žalo/podmorje. Jedan profil odgovara stvarnom-snimljenom stanju u prosincu 2013. godine, dok je drugi hipotetski profil dobiven nasipavanjem stvarnog profila.

Modelski rezultati ukazuju na najizraženiju eroziju u zoni svoša te sedimentaciju materijala u zoni većih dubina. Najizraženije morfološke promjene profila registrirane su tijekom prve situacije sa srednjim značajnim valnim visinama >1 m i trajanjem 16 sati (situacija 4). Daljnji tijek erozije je usporen, bez obzira na nastavnu pojavu još intenzivnijeg valovanja (situacija 7). Ovakav razvoj morfodinamike ukazuje na prirodnu težnju ka postizanju postojećeg dinamički stabilnog profila.

Generalno se može ustvrditi da korišteni numerički morfodinamički model XBeach-G omogućuje simulaciju destruktivnog djelovanja valova, posebice u uvjetima ekstremnog forsiranja. Vraćanje konture poprečnog profila žalo/podmorje u dinamički „stabilnu“ formu tijekom međurazdoblja blage valne klime još uvijek nije



Slika 5 Usporedba akumulacije/erozije uzduž analiziranog profila sa i bez nasipavanja (26.12.18:00 - kraj situacije 7)



Slika 6 Usporedba ravnotežnog profila (empirički model) s rezultatima numeričkog modela

moгуće razlučiti i obuhvatiti korištenim numeričkim modelom.

Profil podmorja proračunat je i empiričkim modelom, a usporedbom s rezultatima numeričkog modela pokazalo se da empirički model predstavlja prihvatljivu aproksimaciju samo u području malih dubina.

U ovom se radu analizira morfodinamika uzduž hipotetskog poprečnog presjeka šljunčanog žala koji koincidira sa smjerom incidentnih valova. Time je razlučena samo poprečna komponenta gibanja materijala, uz zanemarivanje uzdužne komponente generirane nailaskom incidentnih valova na žalo pod kutom. Nadalje, korišteni numerički model omogućava primjenu samo jedne vrijednosti d_{50} kao reprezentativne za cijeli profil. Time je isključen i utjecaj zonacije sedimenata uzduž poprečnog profila na morfodinamiku šljunčanog žala.

Usporedba rezultata provedenih istraživanja s rezultatima drugih istraživanja na bliskim lokacijama i u istim meteorološkim uvjetima ukazuje na kvantitativnu sličnost dosega erozije materijala uzduž poprečnog profila žala. ■

LITERATURA

- Almeida, L.; Masselink, G.; Russell, P.; Davidson, M.; Poate, T.; McCall, R.; Blenkinsopp, C.; Turner, I. (2013.): Observations of the swash zone on a gravel beach during a storm using a laser-scanner, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, str. 636–641.
- Austin, M.J.; Masselink, G. (2006.): Observations of morphological change and sediment transport on a steep gravel beach, *Marine Geology*, 229, str. 59–77.
- Benac, Č.; Ružić, I.; Žic, E. (2007.): Ranjivost obala u području Kvarnera, *Pomorski zbornik*, 44, 201–214.
- Benac, Č.; Ružić, I.; Žic, E.; Gržančić, Ž.; Kraljić, R. (2010.): Ranjivost prirodnih žala u području Kvarnera, *Prirodoslovna istraživanja riječkog područja II*, Prirodoslovna biblioteka, 15; 97–107.
- Benac, Č.; Ružić, I.; Ilić, S. (2010.): Morfodinamika minijaturnih žala, Kvarner, sjeveroistočni Jadran, *Knjiga sažetaka 4. Hrvatskog geološkog kongresa*, Horvat, M., (Ur.), Šibenik, Hrvatski geološki institut, Zagreb. 384–385.
- Bradbury, A.P. (2000): Predicting breaching of shingle barrier beaches – recent advances to aid beach management, *Papers and Proceedings 35th MAFF (DEFRA) Conference of River and Coastal Engineers*, str. 05.3.1–05.3.13, 2000.
- Bradbury, A.; Cope, S.; Prouty, D. (2005.): Predicting the response of shingle barrier beaches under extreme wave and water level conditions in southern England, *Proc. 5th International Coastal Dynamics Conference*, Barcelona, 2005.
- Brzović, N.; Strelec-Mahović, N. (1999.): Cyclonic activity and severe jugo in the Adriatic, *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 24, 653–657.
- 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, *Marine Geology*, 259, str. 73–85.
- Dean, R.G. (1987.): Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions, *Proc. Coastal Sediments '87*, ASCE, str. 1–24.
- Faivre, S.; Pahernik, M.; Maradin, M. (2011.): The gully of Potovošća on the Island of Krk – The effects of a short-term rainfall event, *Geologia Croatica*, 64, 67–80.
- Građevinski institut (1991.): *Hidraulička analiza valova i nasipnih konstrukcija sjeverne obale brodogradilišta 3. Maj u Rijeci*, Građevinski institut.
- Hercbach, H.; Janssen, P.A.E (1999.): Improvement of the short-fetch behaviour in the Wave Ocean Model (WAM), *J. Atmos and Ocean Tech.*, 16, str. 884–892.
- Hine, A.C. (1979.): Mechanics of berm development and resulting beach growth along a barrier spit complex, *Sedimentology*, 26, 333–351.
- Horn, D.P. (2002.): Beach groundwater dynamics, *Geomorphology*, 48, str. 121–146.
- Ivatek-Šahdan, S.; Tudor, M. (2004.): Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies, *Meteorol. Z.*, 13, 99–108.
- Jamal, M.H.; Simmonds, D.; Magar, V. (2014.): Modelling gravel beach dynamics with XBeach, *Coastal Engineering*, 89, str. 20–29.
- Janeković, I.; Kuzmić, M. (2005.): Numerical simulation of the Adriatic Sea principal tidal constituents, *Ann. Geophys.*, 23, 3207–3218.
- Juračić, M.; Benac, Č.; Pikelj, K.; Ilić, S. (2009.): Comparison of the vulnerability of lime-stone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia), *Geomorphology*, 107, 90–99.
- Komen, G.J.; Cavaleri, M.; Donelan, K.; Hasselman, S.; Hasselman, K.; Janssen, P.A.E.M. (1994.): *Modelling of dynamic of ocean surface waves*. Cambridge university press, Cambridge, 532str.
- McCall, R.; Masselink, G.; Roelvink, J.; Russell, P.; Davidson, M.; Poate, T. (2012.): Modeling overwash and infiltration on gravel barriers, *Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering*, Santander-Spain, str. 1–15.
- McCall, R.; Masselink, G.; Poate, T.G.; Roelvink, J.A.; Almeida, L.P.; Davidson, M.; Russell, P.E. (2014.): Modelling storm hydrodynamics on gravel beaches with XBeach-G, *Coastal Engineering*, 91, str. 231–250.
- Obhrai, C.; Powell, K.; Bradbury, A. (2008.): A laboratory study of overtopping and breaching of shingle barrier beaches, *Proceedings of 31st International Conference on Coastal Engineering*, Hamburg, str. 1497–1508.
- Ojeda, E.; Guillen, J. (2008.): Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches, *Marine Geology*, 253, str. 51–62.
- Orford, J.D. (1977.): A proposed mechanism for stormbeach sedimentation, *Earth Surf. Proc. Land*, 2 (4), str. 381–400.
- 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, *Marine Geology*, 342, str. 1–13.
- Pedrozo-Acuna, A.; Simmonds, D.; Otta, A.K.; Chadwick, A.J. (2006.): On the cross-shore profile change of gravel beaches, *Coastal Engineering*, 53, str. 335–347.
- Ranasinghe, R.; McLoughlin, R.; Short, A.; Symonds, G. (2004.): The Southern Oscillation Index, wave climate, and beach rotation, *Marine Geology*, 204, 273–287.
- Roelvink, J.A.; Reniers, A.; van Dongeren, A.R.; van Thiel de Vries, J.S.M.; McCall, R.; Lescinski, J. (2009.): Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56 (11–12), pp. 1133–1152.
- Ružić, I.; Benac, Č.; Ilić, S.; Sušanji, I.; Ljutić, K. (2011.): Promjene korištenja zemljišta i regulacija bujičnih vodotoka: utjecaj na žale Liburnije i otoka Cresa, 5. *Hrvatska konferencija o vodama*, Opatija, Hrvatske vode, Zagreb, 771–780.

- Ružić, I.; Marović, I.; Vivoda, M.; Dugonjić Jonjčević, S.; Kalajžić, D.; Benac, Č.; Ožanić, N. (2013.): Application of Structure-from-Motion photogrammetry for erosion processes monitoring, Moscenicka Draga example. *The 4th Workshop of the Japanese-Croatian Project on "Risk Identification and Land- Use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia"*, University of Split, Split, 49- 50.
- Ružić, I. (2014. a): *Dinamika žala u području Kvarnera*, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilište u Rijeci, 183 str.
- Ružić, I.; Marović, I.; Benac, Č.; Ilić, S. (2014. b): Coastal cliff geometry derived from Structure-from-Motion photogrammetry at Stara Baška - Krk Island - Croatia, *Geo-Marine Letters*, 34, 555-565.
- Short AD; Masselink G. (1999.): Embayed and structurally controlled beaches, *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, Wiley, New York, 230-249.
- Williams, J., de Alegria-Arzaburu, A.R., McCall, R.T., van Dongeren, A. (2012.): Modelling gravel barrier profile response to combined waves and tides using XBeach: laboratory and field results. *Coastal Engineering*, 63, str. 62-80.
- Weir, F. M.; Hughes, M. G.; Baldock, T. E. (2006.): Beach face and berm morphodynamics fronting a coastal lagoon, *Geomorphology*, 82, 331-346.

NUMERICAL MODELLING OF MORPHODYNAMICS OF THE MEDVEJA PEBBLE BEACH CROSS SECTION

Abstract. A numerical analysis was conducted to determine the morphodynamics of the Medveja pebble beach characteristic cross section. Pebbled movement in the beach / seabed profile is primarily induced by gravity wind waves, whereas marine currents caused by tidal force, current gradients and drift currents were not taken into account. A numerical model of wave generation and wave deformation was initially established for the waters of Kvarner and Rijeka Bays to calculate the spatial and temporal distribution of significant wave heights H_s and peak wave periods T_p in 2013. The model results H_s and T_p for the deep water point in front of the Medveja cove define the boundary conditions of a detailed model of wave deformation and morphodynamics in the transitional and shallow water area for the characteristic Medveja Cove pebble beach / seabed profile. The paper contains an analysis of a hypothetical profile obtained by backfilling on the actual (recorded) profile to achieve increased bathing area. The results of model analyses indicate zones with marked erosion and sedimentation along the analysed profile and a tendency of establishing the equilibrium profile which coincides with the actual measured profile. The model-calculated profile was compared with the empirically calculated profile.

The results of the numerical morphodynamic model confirm the possibility of its application to assessment of the intensity of destructive activity of strong waves on pebble beaches.

Ključne riječi: pebble beach, numerical model XBeach-G, morphodynamics

NUMERISCHE MODELLIERUNG DER MORPHODYNAMIK DES QUERSCHNITTSPROFILS AUF DEM KIESSTRAND MEDVEJA

Zusammenfassung. Die numerische Analyse der Morphodynamik eines charakteristischen Querschnittsprofils des Kiesstrandes Medveja wurde durchgeführt. Die Grundanregung zur Bewegung des Kieses am Profil Strand/See sind die winderzeugten Gravitationswellen, während die Meeresströmung, die durch die Gezeitenkraft, Gradientenströmungen und Driftströmungen verursacht wird, nicht in Betracht gezogen wurde. Erstens wurde das numerische Modell der Wellenentstehung und -deformationen für das Seegebiet Kvarner und Rijeka-Bucht entwickelt, womit die räumliche und zeitliche Verteilung von signifikanten Wellenhöhen H_s und Höchstwellenperioden T_p im Laufe des Jahres 2013 berechnet wurden. Auf Grund der Modellergebnisse H_s und T_p für den sich im Tiefwasser am Eingang zur Bucht Medveja befindenden Punkt wurden die Randbedingungen des Detailmodells der Wellendeformationen und Morphodynamik im Übergangs- und Seichtwassergebiet für das charakteristische Profil Strand/See in der Bucht Medveja bestimmt. Dann wurde das Benehmen des hypothetischen Profils analysiert, das durch die Aufschüttung auf das tatsächliche (aufgenommene) Profil mit dem Ziel entstand, die Badefläche zu vergrößern. Die Ergebnisse der Modellanalysen weisen auf die Bereiche mit ausgeprägter Erosion und Sedimentierung entlang des analysierten Profils hin sowie auf die Tendenz zur Wiederherstellung des Gleichgewichtsprofils, das mit dem tatsächlichen, gemessenen Modell koinzidiert. Das mit dem Modell berechnete Profil wurde mit dem Modell verglichen, das auf Grund des empirischen Ausdrucks errechnet wurde.

Die Ergebnisse des numerischen morphodynamischen Modells bestätigen die Möglichkeit der Modellanwendung in der Beurteilung der Intensität der vernichtenden Wirkung von starken Wellen auf das Gesicht der Kiesstrände.

Schlüsselwörter: Kiesstrand, numerisches Modell XBeach-G, Morphodynamik