

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.13>

Kalibracija parametara transporta sedimenta u numeričkom modelu XBeach-G na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče

Calibration of sediment transport parameters in the XBeach-G numerical model on the artificial gravel beach Ploče

Hanna Miličević¹, Dalibor Carević¹, Damjan Bujak¹

(1) Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, hanna.milicevic@grad.unizg.hr,
dalibor.carevic@grad.unizg.hr, damjan.bujak@grad.unizg.hr

Sažetak

Umjetne šljunčane plaže na hrvatskoj obali Jadrana koriste se za rekreaciju i zaštitu, ali su podložne stalnim morfološkim promjenama uslijed djelovanja valova i olujnih udara. Numeričko modeliranje ovih procesa zahtijeva preciznu kalibraciju parametara transporta sedimenta. Ova studija fokusira se na kalibraciju koeficijenta inercije (c_i), kuta sipanja ($\emptyset$) i koeficijenta transporta (γ) u numeričkom modelu XBeach-Gravel kako bi se poboljšala njegova točnost u uvjetima karakterističnim za Jadransko more. Kalibracija modela se temelji na terenskim mjeranjima pomoću fotogrametrije i bespilotnih letjelica, koji omogućuju visoko rezolucijsko praćenje morfodinamičkih promjena. Podešavanjem navedenih parametara, XBeach-G model, izvorno razvijen za visokoenergetske valove, prilagođen je za bolju simulaciju procesa formiranja bermi i izdizanja grebena, karakterističnih za šljunčane plaže na Jadranu. Rezultati istraživanja povećavaju pouzdanost modela u predviđanju dinamike transporta sedimenta i služe za poboljšanje strategije održavanja umjetnih šljunčanih plaža u Hrvatskoj.

Ključne riječi: XBeach-Gravel, formiranje bermi, umjetne plaže, šljunčane plaže

Abstract

Artificial gravel beaches along the Croatian Adriatic coast are used for recreation and coastal protection but are subject to continuous morphological changes due to wave action and storm impacts. Numerical modeling of these processes requires precise calibration of sediment transport parameters. This study focuses on calibrating the inertia coefficient (c_i), the angle of repose ($\emptyset$), and the transport coefficient (γ) in the XBeach-Gravel numerical model to improve its accuracy under conditions characteristic of the Adriatic Sea. The calibration is based on field measurements using photogrammetry and unmanned aerial vehicles, enabling high-resolution monitoring of morphodynamic changes. By adjusting these parameters, the XBeach-G model, originally developed for high-energy waves, is

adapted to better simulate berm formation and crest elevation processes characteristic of gravel beaches in the Adriatic. The research results enhance the model's reliability in predicting sediment transport dynamics and contribute to improving maintenance strategies for artificial gravel beaches in Croatia.

Keywords: XBeach-Gravel, berm formation, artificial beaches, gravel beaches

1. Uvod

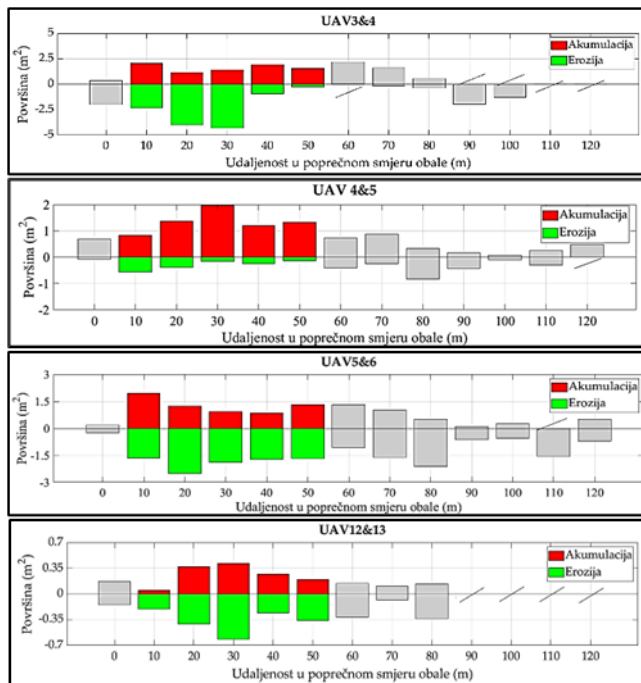
Plaže s krupnim sedimentom, poput šljunka i oblutaka, od velike su važnosti za zaštitu obale od erozijskih procesa i djelovanja olujnih valova. Hrvatska obala je bogata šljunčanim plažama koje mogu biti prirodnog podrijetla ili umjetno oblikovane u svrhu proširenja kapaciteta za turističke potrebe i zaštitu obale. Zbog intenzivnih hidrodinamičkih procesa, umjetne plaže često zahtijevaju kontinuirano održavanje. Praćenje morfodinamičkih promjena šljunčanih plaža ključno je za njihovo dugoročno održavanje i planiranje. Napredne metode poput fotogrametrije primjenom bespilotnih letjelica [1] omogućuje detaljno praćenje promjena plaža. Uz terenska mjerenja, numerički modeli poput XBeach modela, sve se više koriste za simulaciju morfodinamike plaža u poprečnom smjeru, pomažući u predviđanju odgovora obale na različite hidrodinamičke uvjete. Iako je razvoj numeričkih modela znatno unaprijedio razumijevanje dinamike pješčanih plaža, istraživanja koja se bave šljunčanim plažama još su uvijek rijetka. Xbeach-G model, prilagođena verzija XBeach modela, razvijen je upravo kako bi bolje simulirao procese vezane uz šljunak [2], a za njegovu preciznost od važnosti su parametri poput koeficijenta inercije (ci), koeficijenta transporta (γ) i kut sipanja (θ). Njihova pravilna kalibracija ključna je za dobivanje točnih rezultata. Dosadašnje studije pokazale su da XBeach-G pouzdano simulira pronos sedimenta u poprečnom smjeru, tj. procese erozije i akumulacije, tijekom olujnih događaja značajne valne visine više od 5 m ($H_s > 5m$) [3], dok su uvjeti karakteristični za Jadransko more tj. valovi s značajnim valnim visinama do maksimalno 3 m i kraćim valnim periodima slabo istraženi. Formacija berme, i izdizanje grebena su najčešći tip odaziva plaže na olujni događaj u Hrvatskoj, upravo zbog malih visina i perioda koji se razvijaju pri olujnim događajima. Cilj ove studije je dodatno poboljšati predikcijsku sposobnost XBeach-G modela za uvjete koji prevladavaju na Jadranu. Analizirati će se utjecaj različitih rubnih uvjeta, poput značajne valne visine, valnog perioda i plime, uz istovremenu optimizaciju prethodno navedenih parametara modela (ci , γ i θ) za realističniji prikaz formiranja bermi i izdizanja grebena.

2. Materijali i metode

2.1. Postavke numeričkog modela XBeach-Gravel

Morfodinamičke promjene na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče u Rijeci, praćene su kroz 19 geodetskih mjerenja provedenih između 17.siječnja 2020. i 26.02.2021., a metodologija i rezultati detaljno su opisani u radu [1]. Za simulaciju jednodimenzionalnog modela odabrana su četiri olujna događaja s fiksnim valnim parametrima UAV3&4 ($H_{smax}=1.5$ m, $T_p=4.6$ s, plima=0.32 m), UAV4&5 ($H_{smax}=1.6$ m, $T_p=4.6$ s, plima=0.57 m), UAV5&6 ($H_{smax}=2.1$ m, $T_p=5$ s, plima=0.57 m) i UAV12&13 ($H_{smax}=0.64$ m, $T_p=3.52$ s, plima=0.49 m). S obzirom da se radi o jednodimenzionalnom modelu razvijenom za modeliranje pronosa sedimenta

poprečno obali, odabrani su profili s najmanjim utjecajem dužobalnog transporta (UAV3&4, UAV4&5, UAV5&6 profil 10 i UAV12&13 profil 20), Slika1. Za kalibraciju numeričkog modela Xbeach Gravel varirane su vrijednosti koeficijenta transporta (γ) od 0.5, 1 i 3, koeficijenta inercije (ci) 0.5, 1 i 2, te kuta sipanja (ϕ) 35° , 45° i 55° . Kalibracija je provedena s ciljem postizanja Brierove ocjene modela što bliže vrijednosti 1 (engl. Brier Skill Score, BSS), što označava savršenu podudarnost modeliranih i terenskih izmjerenih promjena profila plaže. Parametri poput hidrauličke vodljivosti (kx), srednje veličine zrna (D_{50}) i trajanja simulacije korišteni su prema preporukama i uputama izračuna prethodnih studija [2], [4].



Slika 1. Dijagrami erozije i akumulacije na zapadnoj obali plaže Ploče za odabrane olujne događaje UAV3&4, UAV4&5, UAV5&6 i UAV12&13. Sivi stupci prikazuju profile pod lokalnim utjecajem hidrotehničkih pera i betonskog zida šetnice

3. Rezultati

Ukupno je provedeno 108 simulacija za četiri olujna događaja na zapadnoj obali umjetne šljunčane plaže Ploče u Rijeci. Vrijednosti BSS-a za različite kombinacije koeficijenta inercije, koeficijenta transporta i kuta sipanja prikazane su u tablicama 1, 2 i 3. Najviša prosječna BSS vrijednost od 0.89 postignuta je s parametrima ($\phi=35^\circ$, $\gamma=0.5$, $ci=0.5$), pri čemu su svi analizirani olujni događaji prema Van Rijnovom kriteriju [2] kategorizirani kao „izvršni“. Povećanjem koeficijenta transporta na $\gamma=1$ i $\gamma=3$, performanse modela su se pogoršale, što je rezultiralo padom prosječnih BSS vrijednosti na 0.87 i 0.38.

Slično, kombinacija ($\phi = 45^\circ$, $\gamma = 0.5$, $ci = 0.5$) također je pokazala „izvrsne“ rezultate s BSS vrijednošću od 0.81, dok je povećanje koeficijenta transporta ($\gamma = 1$ i $\gamma = 3$) dovelo do daljnjeg smanjenja performansi u odnosu na $\phi = 35^\circ$, pri čemu su prosječne BSS vrijednosti pale na 0.67 i -0.46. Najveći pad bilježi se kod $\phi = 55^\circ$ za sve vrijednosti koeficijenta transporta ($\gamma = 0.5$, $\gamma = 1$, $\gamma = 3$), gdje su prosječne BSS vrijednosti iznosile 0.50, -0.05 i -2.23. Dodatno, povećanjem koeficijenta inercije na $ci = 1$ i $ci = 2$ također je uočen pad prosječnih BSS vrijednosti. Najviša prosječna BSS vrijednost od 0.89 potvrđuje da kombinacija $\phi = 35^\circ$, $\gamma = 0.5$ i $ci = 0.5$ omogućuje najprecizniji prikaz promjena profila na umjetnoj šljunčanoj plaži Ploče.

Tablica 1. Vrijednosti Brierove ocjene uspješnosti (Brier skill score) za kalibraciju 7 olujnih događaja za različite vrijednosti kuta sipanja (ϕ), koeficijenta transporta (γ) i koeficijenta inercije (ci) od 0.5

BSS	$\phi 35^\circ$, $\gamma 0.5$	$\phi 35^\circ$, $\gamma 1$	$\phi 35^\circ$, $\gamma 3$	$\phi 45^\circ$, $\gamma 0.5$	$\phi 45^\circ$, $\gamma 1$	$\phi 45^\circ$, $\gamma 3$	$\phi 55^\circ$, $\gamma 0.5$	$\phi 55^\circ$, $\gamma 1$	$\phi 55^\circ$, $\gamma 3$
UAV3&4	0.86	0.89	0.87	0.91	0.93	0.95	0.81	0.95	0.94
UAV4&5	0.84	0.83	0.51	0.66	0.42	-0.77	-0.06	-1.34	-4.68
UAV5&6	0.92	0.83	-0.83	0.80	0.58	-2.32	0.60	-0.02	-4.60
UAV12&13	0.93	0.96	0.95	0.85	0.73	0.32	0.63	0.20	-0.58
Prosjek	0.89	0.87	0.38	0.81	0.67	-0.46	0.50	-0.05	-2.23

Tablica 2. Vrijednosti Brierove ocjene uspješnosti (Brier skill score) za kalibraciju 7 olujnih događaja za različite vrijednosti kuta sipanja (ϕ), koeficijenta transporta (γ) i koeficijenta inercije (ci) od 1

BSS	$\phi 35^\circ$, $\gamma 0.5$	$\phi 35^\circ$, $\gamma 1$	$\phi 35^\circ$, $\gamma 3$	$\phi 45^\circ$, $\gamma 0.5$	$\phi 45^\circ$, $\gamma 1$	$\phi 45^\circ$, $\gamma 3$	$\phi 55^\circ$, $\gamma 0.5$	$\phi 55^\circ$, $\gamma 1$	$\phi 55^\circ$, $\gamma 3$
UAV3&4	0.95	0.95	0.89	0.96	0.93	0.81	0.93	0.86	0.62
UAV4&5	0.60	0.51	0.16	-0.13	-0.45	-1.49	-1.26	-1.96	-4.75
UAV5&6	0.38	-0.08	-1.48	-0.20	-0.95	-2.93	-0.72	-2.03	-5.13
UAV12&13	0.91	0.85	0.82	0.74	0.48	0.28	0.36	-0.08	-0.58
Prosjek	0.71	0.56	0.10	0.34	0.00	-0.83	-0.17	-0.80	-2.46

Tablica 3. Vrijednosti Brierove ocjene uspješnosti (Brier skill score) za kalibraciju 7 olujnih događaja za različite vrijednosti kuta sipanja (ϕ), koeficijenta transporta (γ) i koeficijenta inercije (ci) od 2

BSS	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 35^\circ$, $\gamma 3$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 45^\circ$, $\gamma 3$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 0.5$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 1$	$\Phi 55^\circ$, $\gamma 3$
UAV3&4	0.95	0.94	0.90	0.90	0.91	0.85	0.79	0.83	0.73
UAV4&5	-0.25	-0.28	-0.47	0.66	-1.11	-1.90	-2.05	-2.77	-4.14
UAV5&6	-0.52	-1.01	-1.56	-1.42	-2.02	-3.10	-2.05	-2.90	-4.56
UAV12&13	0.78	0.78	0.88	0.34	0.34	0.34	-0.08	-0.15	-0.35
Prosjeak	0.24	0.11	-0.06	0.12	-0.47	-0.95	-0.85	-1.25	-2.08

4. Zaključak

Ova studija potvrđuje pouzdanost numeričkog modela XBeach-Gravel u simulaciji morfodinamičkog odgovora umjetnih šljunčanih plaža izloženih umjerenim do slabim valovima, karakterističnim za istočni Jadran. Kalibracija modela provedena je na zapadnoj obali plaže Ploče, pri čemu su analizirana četiri olujna događaja sa značajnim valnim visinama (H_s) između 0.64 m i 2.2 m te vršnim valnim periodima (T_p) u rasponu od 3.5 s do 5.9 s. Najbolja podudarnost između modeliranih i izmjerenih morfoloških promjena postignuta je za kombinaciju parametara koeficijenta inercije (ci) 0.5, koeficijenta transporta (γ) 0.5 i kuta sipanja (ϕ) 35° , pri čemu je prosječna vrijednost Brier Skill Score (BSS) iznosila 0.89, što se prema Van Rijnovoj klasifikaciji ocjenjuje kao „izvršno“. Ovi rezultati potvrđuju sposobnost modela da realistično predvidi ključne procese transporta sedimenta i transformacije profila plaže. Daljnja istraživanja planiraju proširiti analizirani skup olujnih događaja i provesti dodatnu validaciju na istočnoj obali plaže kako bi se povećala robusnost dobivenih zaključaka.

Literatura

- [1] A. Tadić, I. Ružić, N. Krvavica, and S. Ilić, “Post-nourishment changes of an artificial gravel pocket beach using UAV imagery,” *J. Mar. Sci. Eng*, vol. 2021, 2021, doi: 10.3390/jmse10030358.
- [2] T. Bogovac, D. Carević, D. Bujak, and H. Miličević, “Application of the XBeach-Gravel Model for the Case of East Adriatic Sea-Wave Conditions,” *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/jmse11030680.
- [3] R. T. McCall, G. Masselink, T. G. Poate, J. A. Roelvink, and L. P. Almeida, “Modelling the morphodynamics of gravel beaches during storms with XBeach-G,” *Coastal Engineering*, vol. 103, pp. 52–66, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.coastaleng.2015.06.002.
- [4] K. A. Powell, 1990. “Predicting short term profile response for shingle beaches,” Report SR219. HR Wallingford.