

Primena SPH modela strujanja u analizi transformacija talasa u otvorenim tokovima

Nikola Rosić¹
Damjan Ivetić²
Nenad Jaćimović³

APSTRAKT: Jedan od pristupa za redukovanje štetnog dejstva talasa usled vetra na obalu i objekte u, i na vodi, zasniva se na izgradnji zaštitnih građevina u priobalju. Izgradnjom ovakvih građevina omogućava se delimično, ili potpuno (odbijanje), umanjeње amplitude i energije dolaznog talasa. U radu se predstavljaju mogućnosti SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) numeričkog modela, implementiranog u programskom kodu DualSPHysics, u projektovanju građevina za smanjenje visine talasa. Prikazani su rezultati primene SPH modela strujanja na osnovu kojih je određena konfiguracija specijalne vodopropusne konstrukcije koja se sastoji iz vertikalnog niza odbojnika oslonjenih na šipove. U radu se daje poseban osvrt na izbor parametara računskog modela.

Ključne reči: Talasi usled vetra, SPH, Regulacione građevine

Numerical modelling of water waves transformation using SPH method

ABSTRACT: Near-coast breakwater structures are used to reduce the negative impacts of wind induced waves on the coast and coastal objects in, and on, water. The construction of these objects enables for partial or total (reflection) reduction of the amplitude and energy of the incident waves. The paper discusses a potential of the DualSPHysics SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) numerical model for the design of the breakwater structures. SPH flow model application results are presented within the scope of the analysis of the optimal configuration of special “porous” breakwater structure, made of evenly spaced horizontal steel plates fixed on steel piles. Particular comments are given on the choice of the parameters of the numerical model.

Keywords: Wind-generated wave, Transversal protection structures, SPH

1 Uvod

Metoda SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) pogodna je za numeričko modeliranje, pre svega, tečenja sa naglo promenljivim granicama oblasti strujanja (ili granicama između različitih faza nekog toka). Interakcija između talasa u vodi nastalih usled ekstremno jakih vetrova i građevina za umirenje talasa upravo predstavlja problem za koji se preporučuje primena SPH metode.

U radu [1] prikazani su rezultati numeričkih simulacija transformacije talasa na deonici Dunava u blizini grada Donjeg Milanovca. Prikazano je kako se talas „umiruje“ u zavisnosti od tipa poprečne građevine u koritu Dunava u neposrednoj blizini obale koja je u prošlosti bila izložena štetnom dejstvu talasa. Za slučaj građevine sa odbojnicima (Slika 1) talas „prolazi“ kroz dva reda propusnog sistema odbojnika i u interakciji sa njima se transformiše. Kao što je u radu navedeno, numerička simulacije

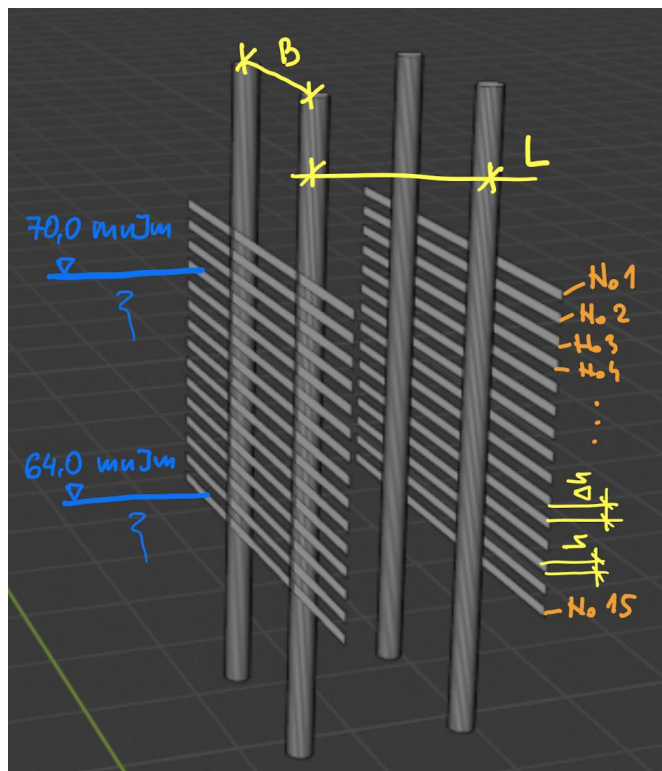
¹Dr Nikola Rosić, Građevinski fakultet Beograd, docent, nrosic@grf.bg.ac.rs

²Dr Damjan Ivetić, Građevinski fakultet Beograd, docent, divetic@grf.bg.ac.rs

³Dr Nenad Jaćimović, Građevinski fakultet Beograd, vanredni profesor, njacimovic@njacimovic.bg.ac.rs

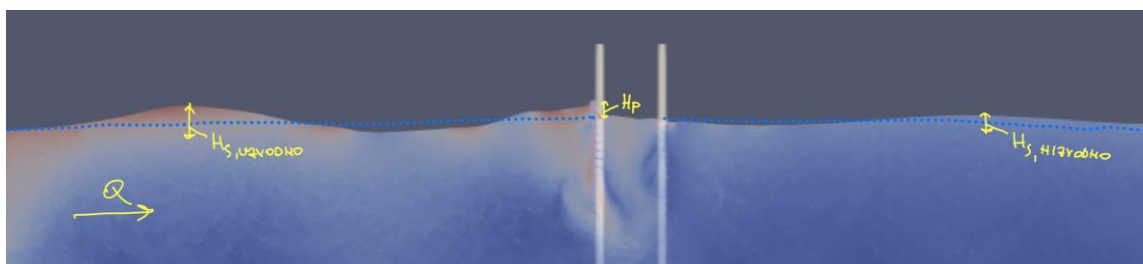
transformacije talasa obavljena je pomoću SPH metode. U ovom radu se detaljnije opisuje sama SPH metoda i postavke simulacije transformacije talasa kroz građevinu sa odbojnicima uz napomenu da se u radu predstavlja analiza obavljena u okviru studije [2].

Na Slika 1 prikazan je model građevine sa odbojnicima pričvršćenih za šipove sa navedenim karakterističnim dimenzijama i upisanim kotama maksimalnog (70,0 mm) odnosno minimalnog nivoa (64,0 mm) Dunava kod Donjeg Milanovca [3]. Karakteristične veličine preko kojih se opisuje talas predstavljene su na Slika 2. Sa H_S označena je visina talasa dok H_P predstavlja visinu penjanja talasa uz građevinu (na slici prikazana visina penjanja uz uzvodnu grupu odbojnika).



Slika 1. Model dela građevine sa odbojnicima pričvršćenim za šipove

Figure 1. Model of the part of the breakwater structure



Slika 2. Podužni presek kroz deo računskog domena sa građevinom sa odbojnicima

Figure 2. Longitudinal profile of the numerical domain with the breakwater structure

2 Opis SPH metode

U hidrauličkoj analizi transformacije talasa kroz dva reda odbojnika korišćen je SPH numerički model implementiran u programskom kodu DualSPHysics [4]. Numerički model koji se koristi zasnovan je na standardnoj SPH metodi u kojoj se uzima da je fluid blago stišljiv. Programski kod DualSPHysics se može izvršavati „paralelno“ na procesorima grafičkih kartica što omogućava znatno skraćanje vremena trajanja numeričkih simulacija.

Matematički model kojim se, u SPH metodi opisuje strujanje fluida čini sistem diferencijalnih jednačina koje opisuju zakone održanja mase i količine kretanja. S obzirom da se prate fluidni delići, rešavaju se materijalni izvodi. Tako je izvod gustine fluidnog delića:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

i brzine:

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\rho \nabla P + \mathbf{g} + \Theta \quad (2)$$

gde su \mathbf{v} – vektor brzine, ρ – gustina vode, P – tenzor sa pritiskom, \mathbf{g} – vektor gravitacionog ubrzanja i Θ – tenzor sa difuzionim članovima.

Prikazani izvodi na desnoj strani (figurišu u gradijentima ili kod divergencije) računaju se numerički za svaku česticu fluida primenom težinskih funkcija (najčešće u obliku polinoma) preko kojih se uzima u obzir da čestice na manjem međusobnom rastojanju imaju veći međusobni uticaj pri proračunu. Tako se prethodno napisani izvodi za fluidni delić „i“ računaju preko sume u kojoj „j“ predstavlja indeks „susednih“ fluidnih delića (pokretnih računskih tačaka):

$$\frac{D\rho_i}{Dt} = \sum_j m_j \mathbf{v}_{ij} \nabla W_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = -\sum_j m_j \left(\frac{P_j}{\rho_j^2} + \frac{P_i}{\rho_i^2} + \Theta_{ij} \right) \nabla W_{ij} + \mathbf{g} \quad (4)$$

Dve čestice su susedi ako su na rastojanju manjem od h_l . Obično se uzima da je $h_l = 1.2\Delta p_0$, gde Δp_0 predstavlja početno rastojanje između čestica. Naravno, u toku proračuna rastojanje između čestica se može promeniti pa je potrebno određenim tehnikama pretraživanja, utvrditi čestice „susede“.

Ako je \mathbf{r}_{ij} vektor relativnog položaja čestice „i“ u odnosu na česticu „j“ tada je W_{ij} težinska funkcija koja se obično predstavlja u obliku polinoma ($q = \frac{|\mathbf{r}_{ij}|}{h_l}$):

$$W_{ij} = 1/(\pi h_l^3) \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3, & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3, & 1 < q \leq 2 \\ 0, & q \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

Kako bi se olakšao proračun, uvodi se veza između gustine (nije konstantna) i pritiska. Obično se koristi jednačina stanja:

$$P_i = B \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right] \quad (6)$$

gde je $B = c_0 \rho_0 / 7$ uzimajući da je $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, a c_0 brzina prostiranja zvuka u vodi pri gustini ρ_0 . Vrednost brzine zvuka u fluidu se obično uzima da je manja od realne kako bi se omogućio proračun sa većim vremenskim računskim korakom.

Veličina Θ u standardnoj varijanti metode predstavlja veštačku viskoznost:

$$\Theta_{ij} = -\frac{\alpha \bar{c}_{ij} \mu_{ij}}{\rho_{ij}} \quad (7)$$

gde je $\mu_{ij} = \frac{h_l v_{ij} r_{ij}}{r_{ij} r_{ij} + 0.01 h_l}$, a \bar{c}_{ij} je srednja brzina zvuka u vodi za čestice „i“ i „j“. Za svaku česticu, korišćenjem jednačine stanja, brzina zvuka u vodi izračunava kao kvadratni koren parcijalnog izvoda pritiska po gustini.

Vremenska integracija se obavlja primenom prediktor-korektor sheme. Prvo se izračunavaju „prediktor“ vrednosti (indeks „p“) u vremenskom trenutku $(n+1/2)\Delta t$, uzimajući da je $D_i = \frac{Dv_i}{Dt}$ i $F_i = \frac{D\rho_i}{Dt}$.

$$v_i^{p,n+1/2} = v_i^n + \frac{\Delta t}{2} F_i^n; \rho_i^{p,n+1/2} = \rho_i^n + \frac{\Delta t}{2} D_i^n; r_i^{p,n+1/2} = r_i^n + \frac{\Delta t}{2} v_i^n; \quad (8)$$

U drugoj etapi se na osnovu predhodno sračunatih prediktor vrednosti računaju „korektor“ vrednosti u istom vremenskom trenutku:

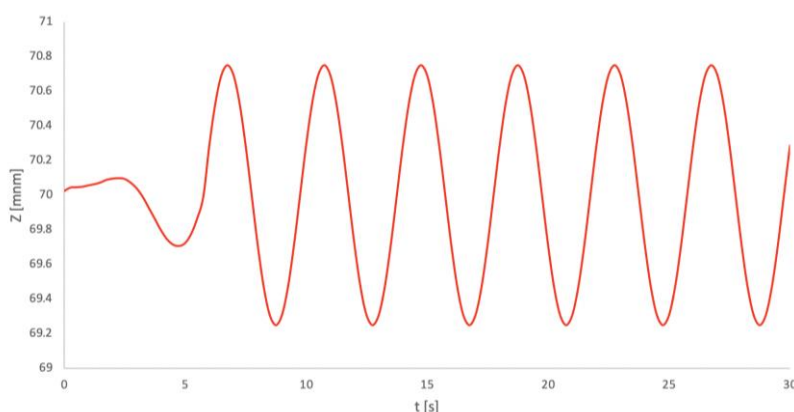
$$v_i^{n+1/2} = v_i^{p,n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} F_i^{p,n+1/2}; \rho_i^{n+1/2} = \rho_i^{p,n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} D_i^{p,n+1/2}; r_i^{n+1/2} = r_i^{p,n+1/2} + \frac{\Delta t}{2} v_i^{p,n+1/2}; \quad (9)$$

Zatim se računaju nepoznate vrednosti na kraju vremenskog računskog koraka:

$$v_i^{n+1} = 2v_i^{n+1/2} - v_i^n; \rho_i^{n+1} = 2\rho_i^{n+1/2} - \rho_i^n; r_i^{n+1} = 2r_i^{n+1/2} - r_i^n; \quad (10)$$

3 Postavka numeričkog modela

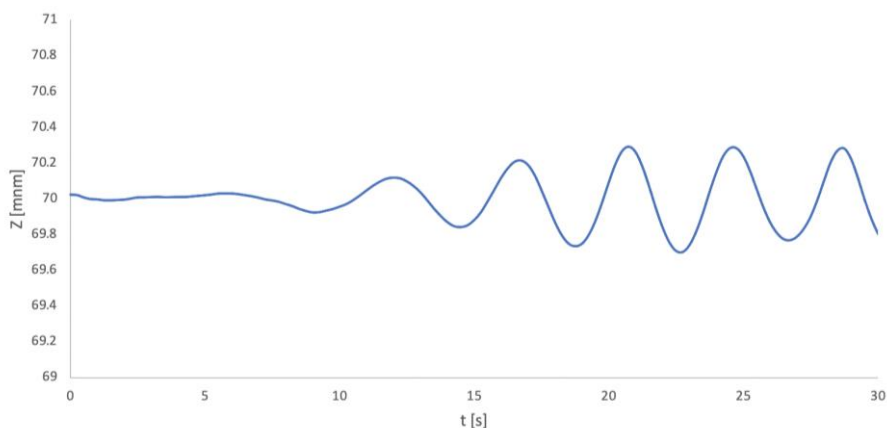
Analizira se uticaj dve konfiguracije odbojnika, varijanta sa visinom odbojnika (na Slika 1 h) i rastojanjem između odbojnika (na Slika 1 Δh) jednakim 25 cm i druga varijanta u kojoj su visina i rastojanje jednaki 50 cm. Problem se razmatra u vertikalnoj ravni. Uzvodno od odbojnika zadaje se talas visine 1,5 m i periode oscilovanja 4 s tako što se vodeni stub koji se sastoji iz čestica, koje na početku proračuna miruju, „pobuđuje“ pokretnim klipom (pokretna čvrsta granica na uzvodnom kraju računskog domena) koji osciluje u toku simulacije. Ulazni nivogram prikazan je na Slika 3. Simulacija traje 30 sekundi (uz zagrevanje modela od 6 sekundi) kako bi se analiziralo nekoliko odbijanja talasa o konstrukciju odbojnika i na taj način uzela u obzir moguća superpozicija talasa uzvodno od građevine na šipovima. Nizvodnu granicu predstavlja blaga kosina koja ima ulogu da umiri talase kako se sa nizvodne granice ne bi odbijali (vraćali u računski domen) i samim tim uticali na transformaciju talasa na samoj konstrukciji odbojnika. Početno rastojanje u svim simulacija iznosi $\Delta p_0 = 0.025$ cm.



Slika 3. Ulazni nivogram u SPH simulacijama
Figure 3. Input hydrograph for SPH simulations

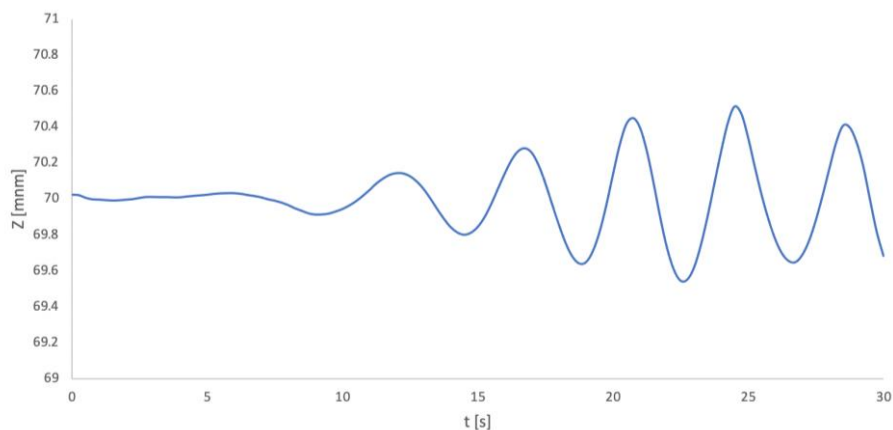
4 Rezultati

Izračunati izlazni nivogrami (na lokaciji 10 m nizvodno od građevine na šipovima) za obe podvarijante konfiguracije odbojnika, prikazani su na Slika 4 i Slika 5. Sa dijagrama se može zaključiti da prema SPH modelu varijanta sa više manjih odbojnika ima veći efekat na smanjenje visine talasa. U varijanti sa odbojnicima visine 25 cm koji su na međusobnom rastojanju od takođe 25 cm, smanjenje visine talasa je oko 60% (dobija se najveća visina talasa od oko 65 cm) dok je u slučaju manjeg broja većih odbojnika smanjenje manje od 50% (maksimalna visina transformisanog talasa iznosi oko 95 cm).



Slika 4. Izlazni nivogram za varijantu sa odbojnicima visine 25 cm

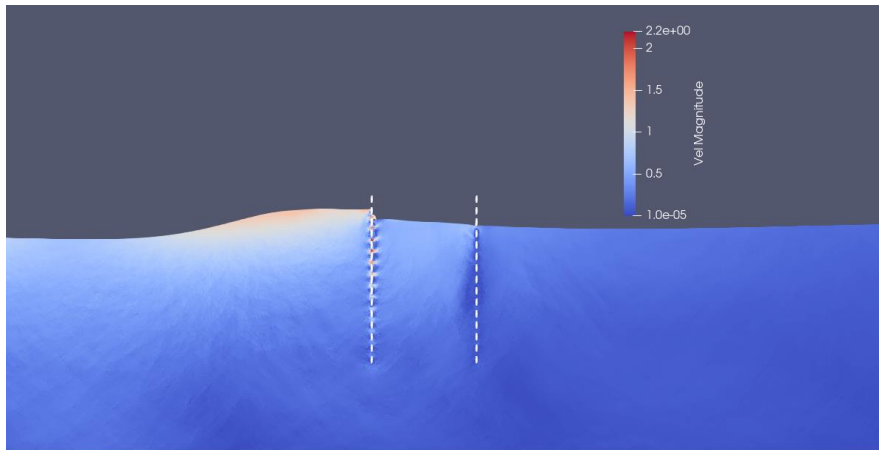
Figure 4. Output hydrograph for the variant with the steel plate height of 25 cm



Slika 5. Izlazni nivogram za varijantu sa odbojnicima visine 50 cm

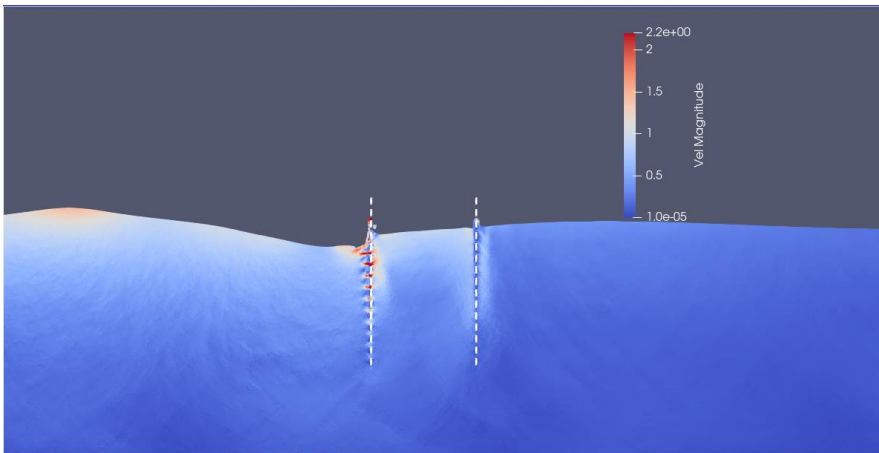
Figure 5. Output hydrograph for the variant with the steel plate height of 50 cm

Za varijantu sa odbojnicima visine 25 cm prikazane su računске čestice u blizini odbojnika obojene u skladu sa izračunatim brzinama (crvena boja odgovara najvećoj brzini, dok plava boja odgovara česticama koje se ne kreću) tokom drugog udara talasa na Slika 6, Slika 7 i Slika 8.



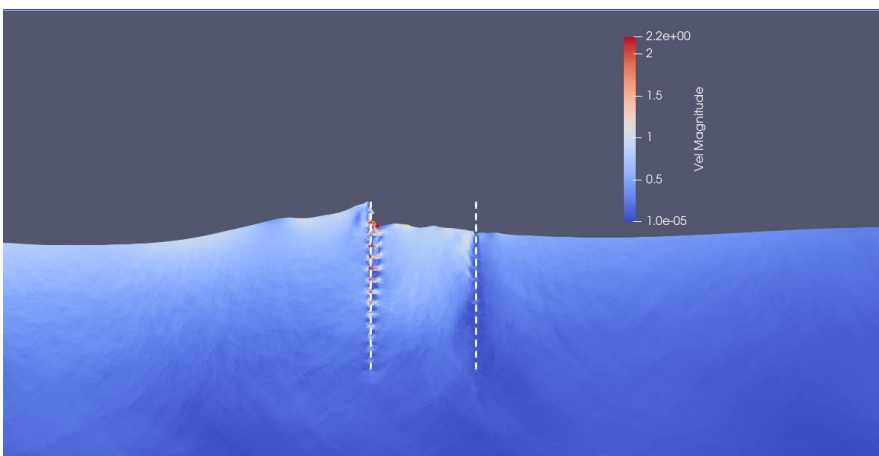
Slika 6. Prikaz fluidnih delića u zoni odbojnika 14 sekundi nakon početka simulacije

Figure 6. Fluid particle level in the breakwater structure vicinity, 14 s after the start of the simulation



Slika 7. Prikaz fluidnih delića u zoni odbojnika 16 sekundi nakon početka simulacije

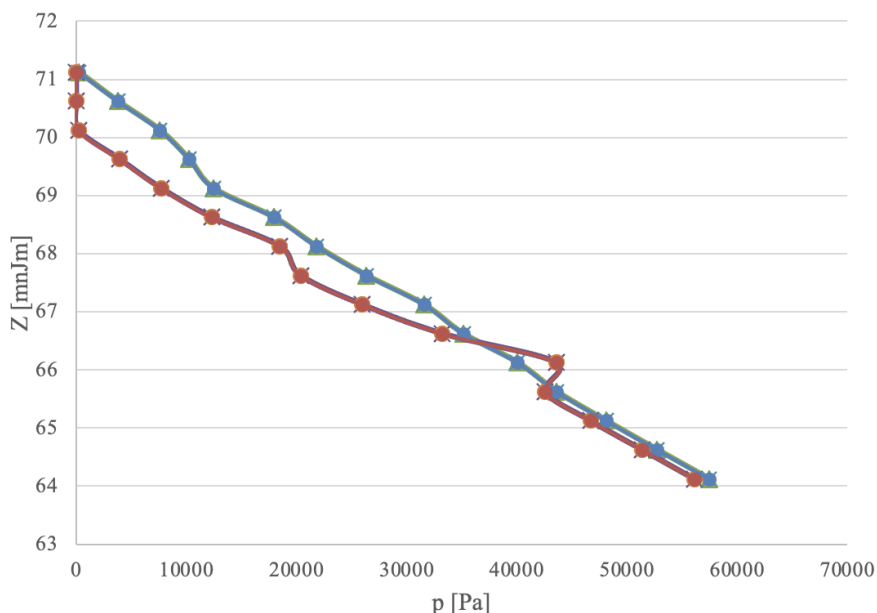
Figure 7. Fluid particle level in the breakwater structure vicinity, 16 s after the start of the simulation



Slika 8. Prikaz fluidnih delića u zoni odbojnika 18 sekundi nakon početka simulacije

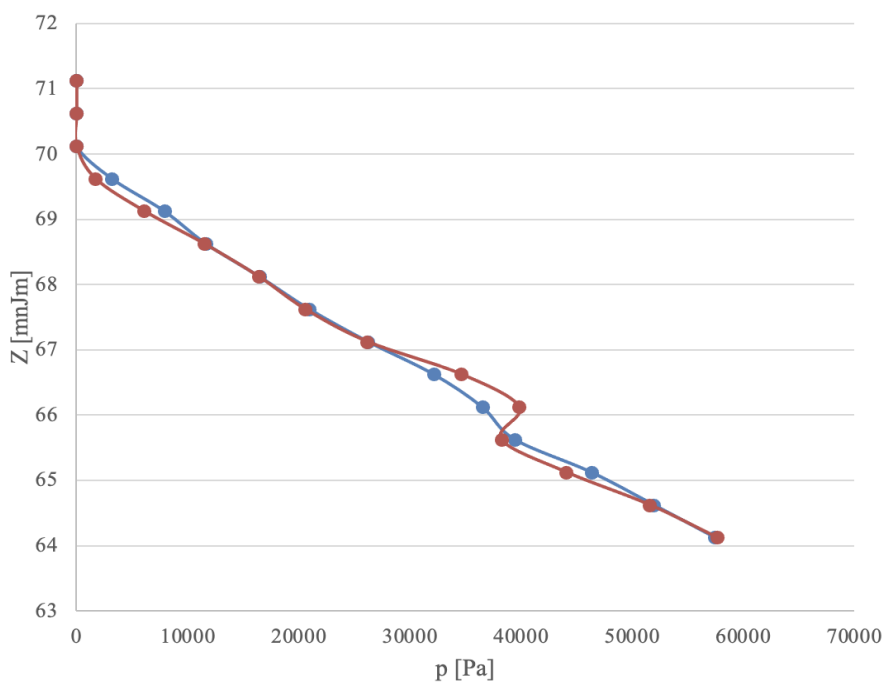
Figure 8. Fluid particle level in the breakwater structure vicinity, 18 s after the start of the simulation

Za projektovanje građevine sa odbojnicima važno je tačno predvideti opterećenje na odbojnice (pa samim tim i na šipove) u toku interakcije talasa sa građevinom. Zato se na Slika 9 i Slika 10 redom prikazuju i pritisci na uzvodni i nizvodni red odbojnika 22 s nakon početka simulacije (u trenutku kada četvrti talas udara u uzvodni red odbojnika). Na slikama plave linije označavaju raspored pritisaka na uzvodnim, a narandžasta boja na nizvodnim, licima dva reda odbojnika.



Slika 9. Raspored pritisaka po dubini za uzvodno i nizvodno lice uzvodne grupe odbojnika

Figure 9. Pressure distribution along the upstream and downstream side of the upstream row of the plates



Slika 10. Raspored pritisaka po dubini za uzvodno i nizvodno lice nizvodne grupe odbojnika

Figure 10. Pressure distribution along the upstream and downstream side of the downstream row of the plates

5 Zaključak

Pomoću SPH metode se može modelirati interakcija talasa sa građevinama u rečnom koritu. Rezultat simulacije se može predstaviti u obliku izlaznog nivograma tj. dijagrama promene nivoa nizvodno od građevine. Na osnovu izlaznog dijagram se može proceniti stepen umirenja talasa. Obavljena analiza je pokazala da se odbojnicima manje visine i međusobnog rastojanja dobija veći stepen umanjenja talasa u odnosu na varijantu sa odbojnicima veće visine ali i međusobnog rastojanja. S obzirom da su nedostajali podaci za proveru modela, prve rezultate primene SPH metode za određivanje efikasnosti građevine sa odbojnicima bi trebalo uzeti sa rezervom.

Literatura

- [1] N. Rosić, D. Ivetić i N. Jaćimović, „Primena SPH modela strujanja u analizi transformacije talasa u otvorenim tokovima,“ u *19. Savetovanje Srpskog društva za hidraulička istraživanja i Srpskog društva za hidrologiju – Zbornik radova*, 2021.
- [2] „Hidraulička studija za potrebe izrade idejnog projekta zaštite zapadne obale Dunava u Donjem Milanovcu od štetnog dejstva talasa,“ Građevinski fakultet Beograd, 2021.
- [3] „Zaštita zapadne obale Dunava od štetnog dejstva talasa - Hidrološka studija,“ Institut „Jaroslav Černi“, 2021.
- [4] M. Gómez-Gesteira, B. Rogers i A. Crespo, „SPHysics - development of a free-surface fluid solver- Part 1: Theory and Formulations,“ *Computers & Geosciences*, t. 48, pp. 289-299, 2012.