

## **Analiza uticaja poprečne građevine u rečnom koritu na dejstvo talasa usled vetra**

Nikola Rosić<sup>1</sup>  
Damjan Ivetić<sup>2</sup>  
Nenad Jaćimović<sup>3</sup>

APSTRAKT: U radu se prezentuju rezultati analize uticaja građevine u rečnom koritu na režim talasa usled dejstva vetra. Za dve varijante poprečnih građevina u zoni obale Dunava kod Donjeg Milanovca, prikazani u računski postupci određivanja merodavne visine talasa i uticaja građevina na transformaciju merodavnih talasa, sve u cilju povećanja stepena zaštite postojeće obale. Takođe, izvršena je i analize uticaja građevina na propusnost korita za vodu i nanos. U predstavljenim analizama uticaja građevina na dejstvo talasa korišćeni su računski modeli STWAVE (Steady state spectral wave) i SPH (Smoothed particle hydrodynamics) dok je u analizi uticaja građevina na propusnost korita korišćen model ravanskog strujanja implementiran u programskom kodu Telemac 2D.

Ključne reči: Talasi usled vetra, Regulative građevine, SPH, STWAVE, Telemac 2D

## **Numerical methods for predicting water waves transformation along the section of the Danube River in the vicinity of Donji Milanovac**

ABSTRACT: In this paper, numerical methods for predicting water waves transformation along the section of the Danube River in the vicinity of Donji Milanovac town are presented. The effects of two type of structures, conventional and nonconventional breakwaters, on wave height profile and sediment transport are analysed using STWAVE, DualSPHysics and Telemac 2D numerical models. STWAVE and SPH simulation results are coupled to predict wave transformation in both, horizontal and vertical planes, while Telemac 2D model is used to predict effects of the structures on suspended sediment transport based on hydraulic conditions.

Keywords: Wind-generated wave, Transversal protection structures, SPH, STWAVE, Telemac 2D

---

<sup>1</sup>Dr Nikola Rosić, Građevinski fakultet Beograd, docent, [nrosic@grf.bg.ac.rs](mailto:nrosic@grf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup>Dr Damjan Ivetić, Građevinski fakultet Beograd, docent, [divetic@grf.bg.ac.rs](mailto:divetic@grf.bg.ac.rs)

<sup>3</sup>Dr Nenad Jaćimović, Građevinski fakultet Beograd, vanredni profesor, [njacimovic@njacimovic.bg.ac.rs](mailto:njacimovic@njacimovic.bg.ac.rs)

## 1 Uvod

Desna obala Dunava kod Donjeg Milanovca je često izložena dinamičkom dejstvu talasa usled vetra. Može se zaključiti da je, sa stanovišta izloženosti priobalja dinamičkom dejstvu talasa, pravac pružanja obale kod Donjeg Milanovca izrazito nepovoljan (Slika 1). Naime, obala se prostire upravno na pravac učestalog dejstva vetra visokog intenziteta. Uz navedeno, ovaj pravac približno odgovara podužnom pravcu toka Dunava na delu na kojem se javljaju nadprosečne širine rečnog korita. Zato se može konstatovati da uslovi zaleta vetra na ovom delu Dunava odgovaraju slučaju razvoja talasa na akumulacijama.

U martu 2008. godine nakon epizode jakog vetra oštećena je postojeća obaloutvrda. Zato se javila potreba za rekonstrukcijom postojeće obaloutvrde ali i ideja o dodatnoj zaštiti postojeće linije obale u sklopu proširenja šetne staze koja bi bila deo novog arhitektonskog uređenja obale. Šetna staza bi se izgradila na poprečnoj građevini u koritu Dunava. Upravo se uticaj dva tipa poprečnih građevina na transformaciju talasa usled vetra analizira u ovom radu. Prvo se analizira uticaj poprečne građevine od kamenog nabačaja (napera) kojom se „zatvara“ tok ka postojećoj obali. Zato se ovaj tip građevine, iako strogo gledano to nije, naziva nepropusnom građevinom. Sa druge strane, izgradnjom šetne staze na šipovima [1], omogućila bi se protočnost korita između nove građevine i postojeće obale čime bi se omogućio svež priliv vode u priobalnom delu bez, pretpostavlja se, većeg uticaja na režim nanosa. Kod ovog tipa građevine, dodatno se predviđa izgradnja odbojnika za smanjivanje visine talasa.



Slika 1. Deonica Dunava u blizini Donjeg Milanovca

Figure 1. Section of the Danube river near the town of Donji Milanovac

Rezultati proračuna koji su prikazani dobijeni su u sklopu rada tima Građevinskog fakulteta u Beogradu na izradi Hidrauličke studije za potrebe izrade idejnog projekta zaštite zapadne obale Dunava u Donjem Milanovcu od štetnog dejstva talasa [2]. U radu su opisani postupci za izračunavanje značajne visine talasa, proračun transformacije talasnog spektra i proračun ravanskog tečenja.

Proračun značajne visine talasa obavljen je primenom postupaka koji se standardno koriste kod akumulacija. Ovi postupci daju ulazne podatke za analizu transformacije talasa koja je obavljena primenom modela STWAVE koji se (standardno) primenjuje u pomorskoj hidraulici. Ipak, s obzirom

da se radi o „spektralnom“ modelu za proračun transformacije u horizontalnoj ravni, efekti odbojnika (za drugi tip građevine) na transformaciju talasa nisu mogli direktno da se ispituju primenom STWAVE modela, pa je ovaj model korišćen u kombinaciji sa SPH modelom tečenja u vertikalnoj ravni. Tako je za drugi tip građevine transformacija talasa izračunata integracijom rezultata hidrodinamičkog modela u spektralni model. Kako bi se ispitali efekti poprečnih građevina na transportnu sposobnost toka za vodu i nanos, korišćen je Telemac 2D model ravanskog tečenja u horizontalnoj ravni.

Napominje se da su opisani računski postupci primenjeni bez kalibracije. Naime, svrha primene opisanih postupaka je da se u relativnom smislu oceni uticaj izgradnje dva različita tipa građevina u rečnom koritu.

## 2 Proračun značajne visine talasa

Visina talasa procenjena je na osnovu dva postupka. Prvi prikazani postupak predložio je Smith za akumulacije [3]. U ovom postupku pored brzine vetra ( $V_V$  [km/h]) i dužine zaleta ( $F$  [km]), kao ulazni podatak za proračun značajne visine talasa ( $H_S$  [m]) figuriše odnos širine i dužine akumulacije ( $K$ ):

$$H_S = 0,00513 \cdot V_V^{1,06} \cdot (K \cdot F)^{0,47} \quad (1)$$

Za merodavnu brzinu vetra obično se usvaja brzina vetra 10 m iznad površine vode, trajanja 1 čas. S obzirom da su na raspolaganju bile samo najveće zabeležene vrednosti brzina vetra u toku dana, za očekivati je da se primenom ovih brzina precene visine talasa. Rezultati merenja brzine pokazuju da je pravac upravan na obalu ujedno i pravac najvećih brzina vetra na lokacijama meteoroloških stanicama koje su najbliže Donjem Milanovcu. Kao merodavna, usvojena je najveća dnevna brzina zabeležena na stanici kod Velikog Gradišta,  $V_V = 27,2$  m/s. Dužina zaleta od 9,5 km, usvojena je kao, u manjoj meri, izlomljena linija ([4]) duž pravca prostiranja toka Dunava kod Donjeg Milanovca. Kada se uzme u obzir i širina korita na deonici zaleta korekcionni faktor iznosi 0,34 pa je značajna visina talasa jednaka 1,15 m. Korišćenjem drugog obrasca istog autora, za talasnu dužinu se dobija:

$$\lambda = 0,187 \cdot V_V^{0,88} \cdot (K \cdot F)^{0,56} = 20,4 \text{ m} \quad (2)$$

Drugi postupak predstavlja metodu Donelan-JONSWAP. Prema ovom postupku značajna visina talasa računa se preko sledećeg izraza:

$$H_S = \frac{0,00178 \cdot V_V \cdot \sqrt{F}}{\sqrt{g}} = 1,5 \text{ m} \quad (3)$$

Korišćenjem iste metode može se izračunati i srednja perioda talasa:

$$T = 0,0584 \cdot F^{0,3} \cdot U^{0,4} = 3,4 \text{ s} \quad (4)$$

## 3 Proračun transformacije talasa

### 3.1 Opis računskog modela STWAVE

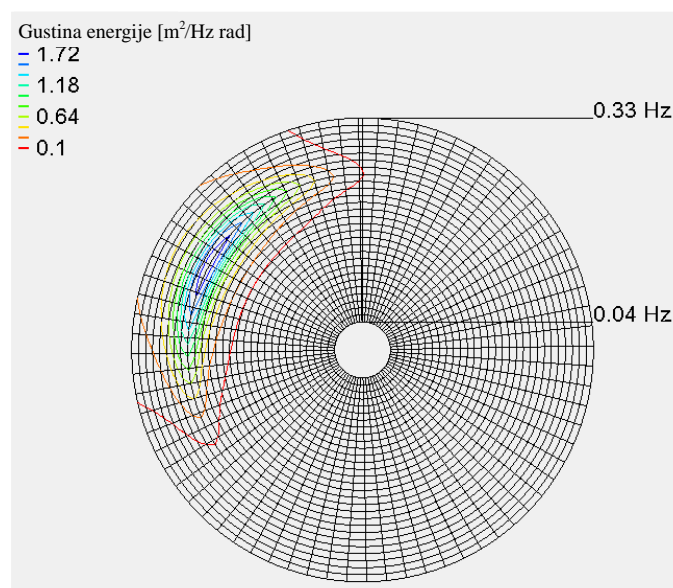
Primenom tzv. spektralnih modela za transformaciju talasa može se proceniti promena raspodele energije talasa duž oblasti propagacije talasa. U ovom radu se predstavljaju rezultati primene STWAVE modela (detaljniji opis modela se može naći u [5]). Primenom ovog modela rešava se jednačina održanja dejstva talasa koja se svodi na sledeću diferencijalnu jednačinu:

$$(C_g)_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C C_g \cos \alpha E(\omega, \alpha)}{\omega} = \sum \frac{S}{\omega} \quad (4)$$

gde su:  $\omega$  – ugaona frekvencija komponente talasnog spektra,  $C$  – brzina prostiranja talasa frekvencije  $\omega$ ,  $C_g$  – grupna brzina komponente spektra,  $\alpha$  – ugao koji definiše pravac prostiranja komponente spektra,  $E$  – gustina energije komponente spektra [ $m^2/Hz$ ],  $S$  – „izvor“ / „ponor“ energije,  $x_i$  – oznaka za dva koordinatna (ortogonalna) pravca.

Funkcija  $E(\omega, \alpha)$ , predstavlja raspodelu gustine energije po frekvencijama i pravcima, definiše se dvodimenzionalni talasni spektar koji se još (zbog toga što je u funkciji spektra druga nezavisna promenljiva pravac) naziva direkcionni talasni spektar. Prema tome, jedna komponenta spektra definisana je energijom za jednu frekvenciju i jedan pravac i u numeričkom postupku se odnosi na intervale frekvencije odnosno ugla koji definiše pravac prostiranja komponente spektra.

Na slici je prikazan talasni spektar na uzvodnoj granici računskog domena u proračunima transformacije talasa duž zaleta kod Donjeg Milanovca. Funkcija gustine energije (spektar) prikazana je u polarnom koordinatnom sistemu na Slika 2. Prikazani krug podeljen je na četvorougaoone elemente koji definišu „dimenziju“ jedne komponente spektra (diskretizaciju talasnog spektra). U primerima koji se predstavljaju, korišćena je funkcija takozvanog JONSWAP ravanskog spektra ([5]) koja se definiše preko značajne visine i srednje amplitude. Ovaj spektar dobijen istraživanjem u priobalju Severnog mora, često se koristi za druge priobalne vode (npr. akumulacije kada ne postoje podaci o merenjima).



Slika 2. Zadati talasni spektar ( $H_S=1,5$  m i  $T_m=3,4$  s).

Figure 2. Analyzed wave spectrum ( $H_S = 1,5$  m and  $T_m = 3,4$  s)

Kao izvorni član, u studiji se koristi ukupni energetska fluks koji predstavlja doprinos vetra:

$$F_v = \frac{S_v}{\Delta x^2} = 0,85 \cdot \lambda \cdot \frac{\rho_a}{\rho_w} C_m \frac{u_*^2}{g} \Delta t \quad (5)$$

gde je  $S_v$  – izvorni član sa doprinosom vetra u diferencijalnoj jednačini transformacije spektra,  $\Delta x^2$  – površina četvorougaoonog elementa ekvidistantne računске mreže („grida“),  $\lambda$  – procentualni udeo razmene količine kretanja između vazduha i talasa u ukupnoj razmeni između vazduha i vode (standardno se uzima vrednost 0,75),  $\rho_a$  – gustina vazduha,  $\rho_w$  – gustina vode,  $C_m$  – srednja brzina prostiranja talasa (brzina osrednjena po celom spektru).

Smičuća brzina se računa preko brzine vetra:

$$u_* = V_V \cdot \sqrt{0,0012 + 0,000025 \cdot V_V} \quad (6)$$

Ekvivalentno vreme putovanja talasa između računskih elemenata ( $\Delta t$ ) računa na sledeći način:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{0,9 \cdot \bar{C}_g \cos(\alpha_m)}, \quad (7)$$

gde su  $\bar{C}_g$  – srednja grupna brzina talasa (brzina osrednjena po celom spektru) i  $\alpha_m$  – po spektru osrednjen pravac prostiranja talasa.

Ukupni energetski fluks, odnosno doprinos člana  $S_v$  se raspodeljuje po komponentama spektra.

Pored izvornog člana, sa desne strane diferencijalne jednačine transformacije spektra, kao „ponor“ energije koristi se član sa gubitkom energije usled trenja od dno korita (računa se preko Maningovog koeficijenta) kao i član koji uzima u obzir energetske gubitke usled uticaja deformisanja površine talasa i turbulencije.

Rešavanjem osnovne jednačine modela, u svakoj računskoj tački, dobija se transformisan dvodimenzionalni talasni spektar. Visina talasa se može izračunati nakon proračuna transformacije talasnog spektra vodeći računa da je energija po jediničnoj površini (podeljena sa gustinom vode i gravitacionim ubrzanjem) svake komponente spektra jednaka:

$$E_j \cdot \Delta\omega_j \cdot \Delta\alpha_j = \frac{A_j^2}{2}, \quad (8)$$

gde je  $(A)$  amplituda talasa (polovina visine talasa) a  $(j)$  oznaka jedne komponente talasnog spektra. Integracijom gustine energije po frekvencijama dobija se ukupna jedinična energija spektra preko koje se računa značajna visina talasa:

$$H_S = 4 \cdot \sqrt{\iint E(\omega, \alpha) d\omega d\alpha} \quad (9)$$

Ova definicija značajne visine talasa je sve više zastupljena u poslednje vreme. Treba voditi računa da se ovako dobijena visina talasa može razlikovati od značajne visine talasa koja se definiše, na tradicionalan način, kao visina koja u spektru ima zastupljenost 87%. Praksa pokazuje, da za funkcije spektra u upotrebi, razlike u visinama talasa dobijenim korišćenjem dve različite definicije nisu značajne.

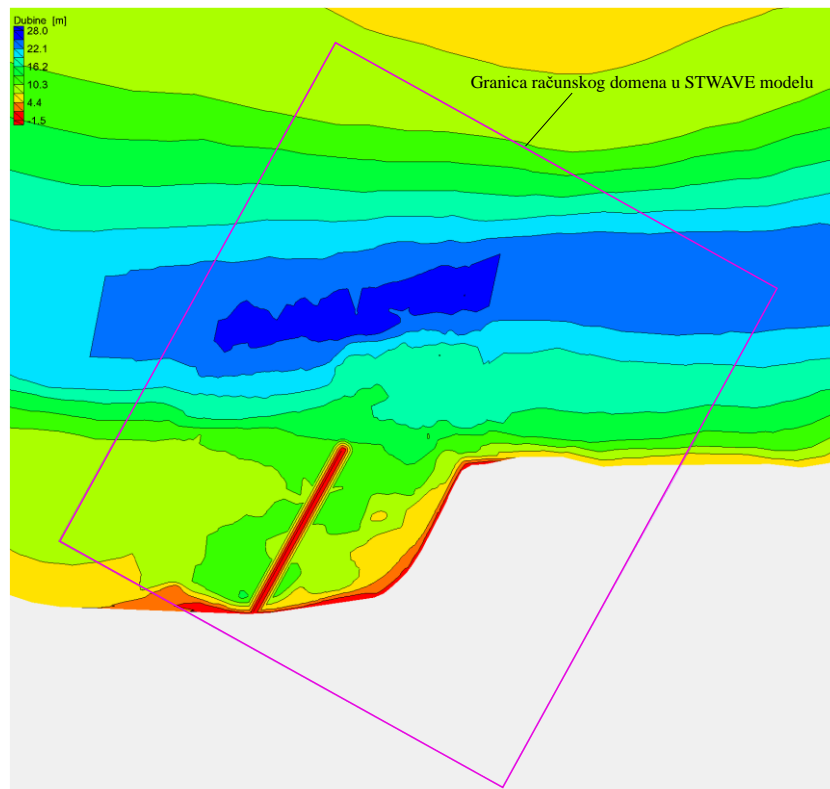
Mreža računskih tačaka je pravougaona i ekvidistantna. Od drugih ulaznih podataka, pored zadatih dubina vode (nivo odgovara koti nivoa merodavne velike vode 70,00 mnJm), zadaje se Maningov koeficijent rapavosti. U analizi čiji se rezultati prikazuju razmatrana je “propagacija” talasa u mirnoj vodi.

### 3.2 Transformacija talasa za slučaj građevine od kamenog nabačaja

Prvo se analizira transformacija talasa za slučaj građevine od kamenog nabačaja. Smatra se da je kruna građevine dovoljno iznad kote penjanja talasa pri nivou merodavne velike vode i da je građevina dovoljno nepropusna tako da talasi ne mogu „proći“ kroz građevinu. Međutim, treba voditi računa da se talasi iz pravca osovine toka mogu propagirati ka obali odnosno da se u modelu predvidi prelamanje talasa u zoni glave građevine.

Računski domen za simulaciju propagacije talasa u priobalnom delu prikazan je na Slika 3. Preostale tri granice su u modelu predstavljene kao “zatvorene” granice. Rastojanje između računskih tačaka po obe ortogonalne ose je 5 m. Spektar na uzvodnoj granici je zadat preko značajne visine od 1,5 m i srednje periode 3,4 s.

Rezultat simulacije propagacije talasa merodavne značajne visine prikazani je na Slika 4. Slika pokazuje da se iz pravca glavnog toka Dunava značajne visine talasa propagiraju relativno duboko u oblast između građevine i obale.



Slika 3. Računska oblast za proračun talasa u priobalnom delu.

Figure 3. Computational domain for wave propagation calculation in the near-shore region.

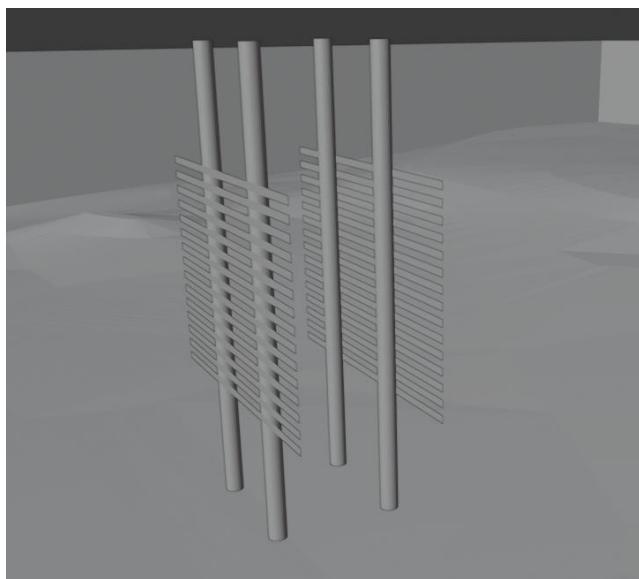


Slika 4. Raspored visina talasa dobijen na osnovu simulacije propagacije talasa uz interakciju talasa sa naperom

Figure 4. Wave height distribution derived with the wave propagation simulation for the variant with conventional (groyne) structure

### 3.3 Transformacija talasa za slučaj građevine sa odbojnicima

Uticao građevine sa odbojnicima oslonjenim na šipove (Slika 5) na transformaciju talasa u vertikalnoj ravni analiziran je pomoću SPH modela tečenja implementiranog u programskom kodu DualSPHysics. Rezultati transformacije u vertikalnoj ravni korišćeni su da se u računskom modelu transformacije talasa u horizontalnoj ravni (STWAVE) kreira potopljena građevina koja u simulacijama ima isti efekat na umanjenje visine talasa kao što je to slučaj za građevinom sa odbojnicima u SPH modelu (model u vertikalnoj ravni).



Slika 5. Model jednog polja odbojnika oslonjenih na šipove (šetna staza na šipovima nije prikazana)

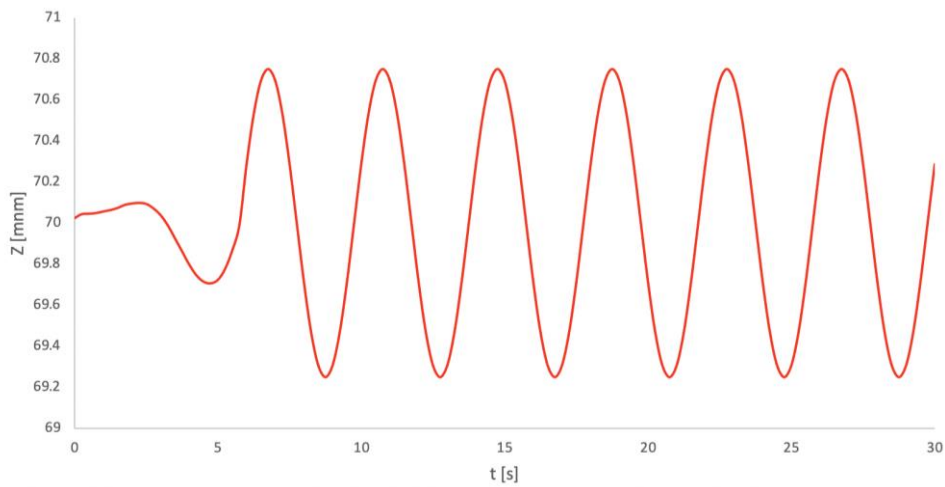
Figure 5. A model of one section of strips mounted on the piers (pedestrian path on top of the piers is not shown)

U SPH modelu računске tačke se tokom simulacije tečenja pomeraju tako da prate fluidne deliće (delić fluida fiksne mase). Metoda je posebno pogodna u slučajevima kada se naglo deformiše slobodna površina fluida kao što je to slučaj za vreme interakcije talasa sa čvrstom granicom. S obzirom da je metod detaljnije opisan u drugom radu [6] ovde se samo prikazuju rezultati primene SPH metode.

U ovom radu se prikazuju rezultati transformacije talasa za varijantu građevine sa visinom odbojnika i rastojanjem između odbojnika jednakim 25 cm. Uzvodno od odbojnika zadaje se talas visine 1,5 m i perioda 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. 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.

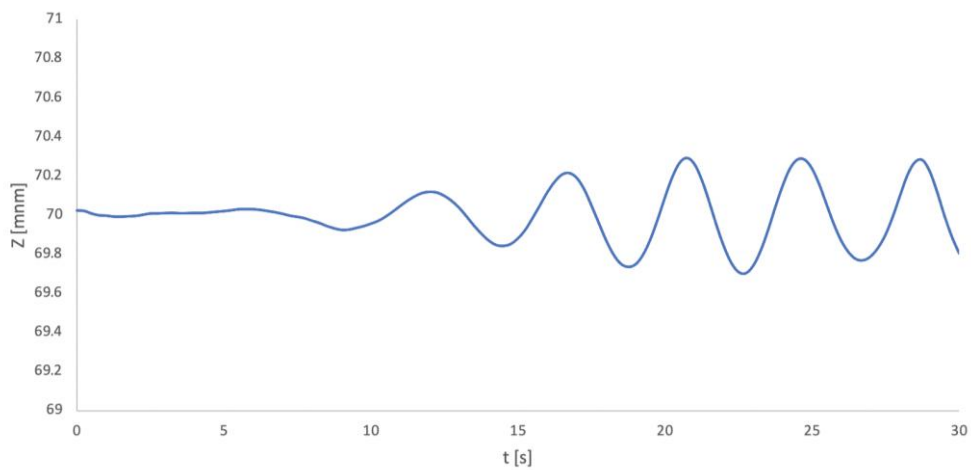
Ulazni nivogram i izračunati izlazni nivogram (na lokaciji 10 m nizvodno od građevine na šipovima), prikazani su redom na Slika 6 i Slika 7. Sa dijagrama se može zaključiti da smanjenje visine talasa je oko 60% (dobija se najveća visina talasa od oko 65 cm).

Na Slika 8 prikazane su čestice fluida (obojene na osnovu brzina) pre odnosno tokom jednog udara talasa.



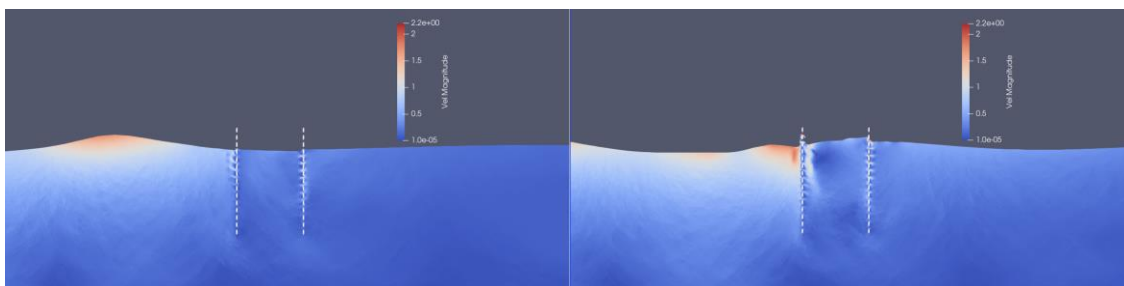
Slika 6. Ulazni nivogram u SPH simulacijama

Figure 6. Input water level series in the SPH simulations



Slika 7. Izlazni nivogram za varijantu sa odbojnicima visine 25 cm

Figure 7. Output water level series for the strip height of 25 cm

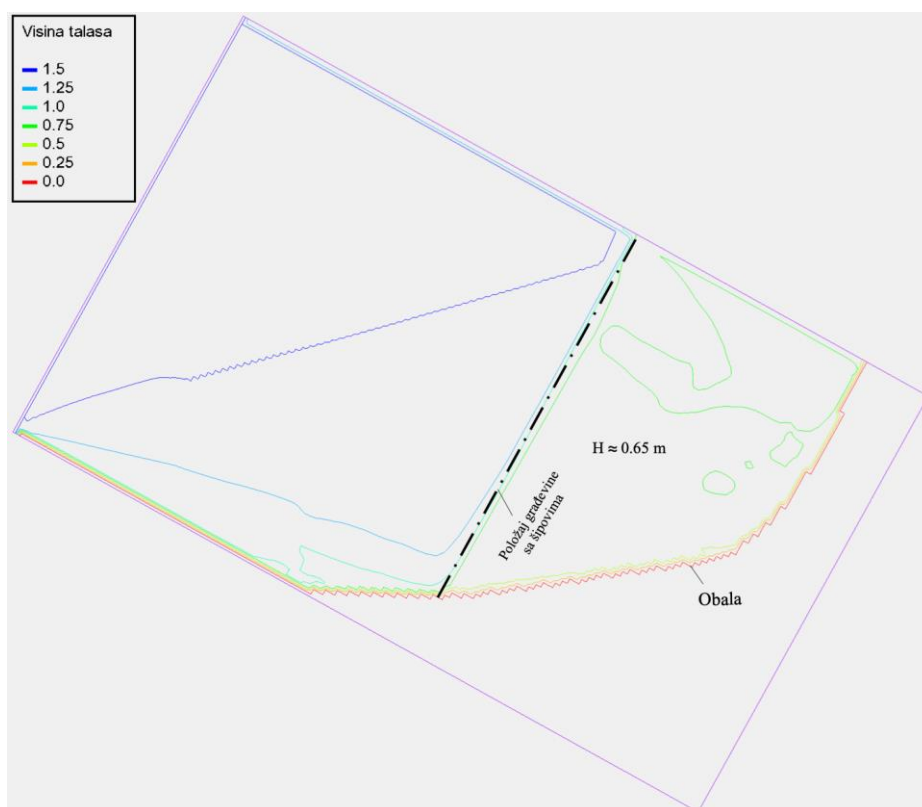


Slika 8. Prikaz fluidnih delića u zoni odbojnika 13 (levo) odnosno 19 (desno) sekundi nakon početka simulacije

Figure 8. Fluid particle representations in the strips zone 13 and 19 seconds into the simulation

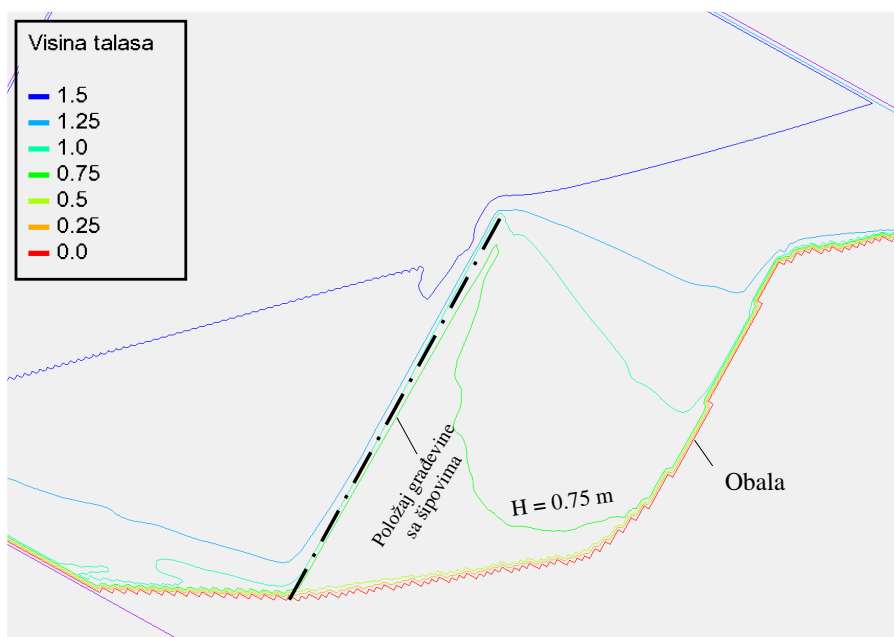


S obzirom da je u STWAVE modelu transformacije talasa za „nepropusnu“ građevinu pokazano da na visinu talasa u zoni obale od interesa značajno utiču talasi koji sa boka, iz pravca osovine toka Dunava, „ulaze“ u oblast nizvodno od poprečne građevine, problem se do kraja ne može razmatrati samo u vertikalnoj ravni. Zato je za slučaj građevine sa odbojnicima formiran novi STWAVE model kako bi procenile visine talasa na osnovu interakcije talasa transformisanih kroz konstrukciju odbojnika i „netransformisanih“ talasa koji se ka obali kreću iz pravca osovine toka. Granični uslovi su isti kao i za slučaj transformacije talasa za građevinu od kamenog nabačaja sa tim da su, u proračunu u kojem se određuje „ekvivalentna“ potopljena građevina, granice računskog domena promenjene kako bi se dobio ravanski slučaj transformacije. Naime, interakcija dva talasna fronta je modelirana tako što je prethodno formiran model potopljene poprečne građevine koja je u pogledu stepena transformacije talasa ekvivalent konstrukciji odbojnika. Kako bi se izolovao uticaj talasa sa boka, formiran je model sa čvrstom granicom (zidom ili obalom) na ulazu u priobalnu oblast iza napera (Slika 9). Kada je određena kota krune potopljenog napera, tj. kada je definisana ekvivalentna građevina, formiran je kompletan model sa interakcijom dva talasna fronta. Rezultat proračuna visine talasa za ovaj slučaj prikazan je na Slika 10. Kao što se vidi izračunate visine (iako očekivano veće od visina u varijanti građevine od kamenog nabačaja) nisu drastično različite od visina izračunatih u SPH simulacijama (kada se problem tretira kao ravanski).



Slika 9. Izračunate visine talasa kada se polje iza građevine izoluje od glavnog toka

Figure 9. Calculated wave heights when the zone behind the structure is isolated from the main flow



Slika 10. Rezultat proračuna visine talasa za varijantu 2 (korišćenjem „ekvivalentnog“ napera)

Figure 10. Wave height computation results for variant 2 („equivalent“ groynes structure is used)

## 4 Proračun transportne sposobnosti za vodu i nanos

### 4.1 Opis ravanskog modela tečenja

U okviru ovog poglavlja analizirana je ravanska (2D) strujna slika za deonicu Dunava u okolini Donjeg Milanovca, pri protoku srednje vode ( $Q_{sr}$ ) za postojeće stanje, kao i stanje sa dve projektovane varijante poprečnih građevina. Cilj analize je definisati efekte projektovanih varijantnih rešenja za zaštitu obaloutvrde na strujnu sliku u okolini Donjeg Milanovca na transportnu sposobnost za vodu i nanos.

Proračun ravanskog tečenja obavljen je primenom softverskog paketa TELEMAC2D. Rešava se sistem diferencijalnih jednačina koje redom čine jednačina kontinuiteta i dinamičke jednačine za dva ortogonalna pravca:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(h) + h\nabla(\mathbf{u}) = S_h \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(u) &= -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \nabla(hv_t \nabla u) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(v) &= -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \nabla(hv_t \nabla v) \end{aligned} \quad (11)$$

gde su  $h$  - dubina vode,  $\mathbf{u}$  – vektor brzine,  $u, v$  – komponente vektora brzine u x i y pravcu,  $S_h$  - izvorni (ili „ponorni“) član mase (zapremine) fluida,  $Z$  – kota slobodne površine vode,  $S_x$  – Izvorni („ponorni“) član količine kretanja u x pravcu,  $S_y$  - Izvorni („ponorni“) član količine kretanja u y pravcu,  $v_t$  – kinematički koeficijent viskoznosti.

#### 4.2 Kriterijumi za analizu uslova istaložavanja nanosa

Kako bi se procenili uticaji varijantnih rešenja na promenu uslova istaložavanja lebdećeg nanosa, usvojen je kriterijum kojim se opisuje da li zrno određenog prečnika  $d$  može da potone i da se istaloži. Prema korišćenom kriterijumu Bagnolda [7], ukoliko je brzina tonjenja  $W$ , sračunata za zrno prečnika  $d$ , veća od smičuće brzine  $u^*$ , to zrno i sva krupnija zrna će se istaložiti na analiziranoj lokaciji. U rezultatima je ovaj uslov grafički prikazan koristeći veličinu najvećeg prečnika zrna  $d_{max}$  koje se neće istaložiti. Raspored smičuće brzine u računskom domenu se dobija na osnovu izračunatih lokalnih vrednosti dubine i brzine:

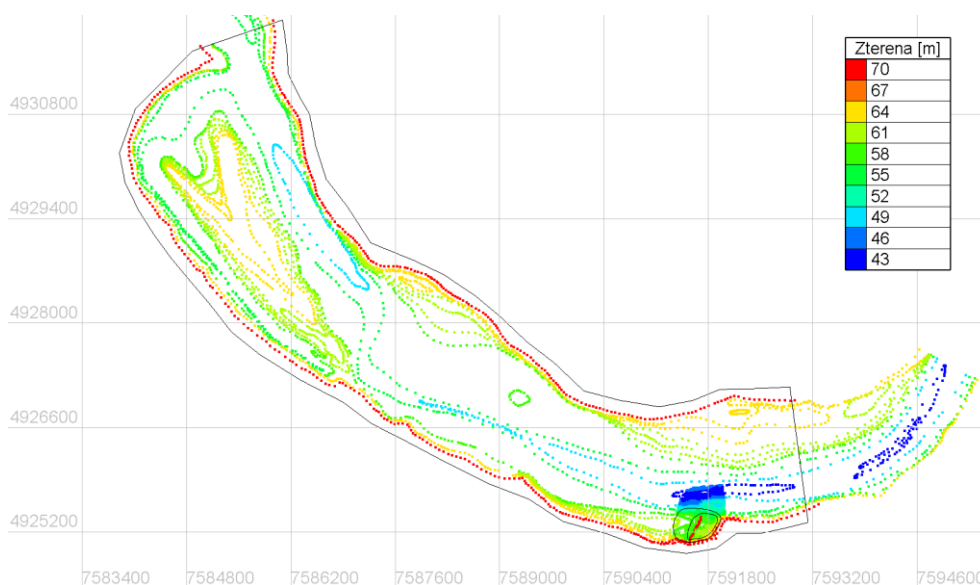
$$u^* = \sqrt{\frac{g \cdot n^2 \cdot V^2}{h^{1/3}}} \quad (12)$$

Za procenu brzine tonjenja  $W$ , korišćen je opšti obrazac []:

$$W = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{g \cdot \Delta \cdot d^2}{18\nu} & : d = 0,001 \div 0,1 \text{ mm} \\ \frac{10\nu}{d} \left[ \left( 1 + \frac{0,01 \cdot g \cdot \Delta \cdot d^3}{\nu^2} \right)^{0,5} - 1 \right] & : d = 0,1 \div 1 \text{ mm} \\ 1,1(g \cdot \Delta \cdot d)^{0,5} & : d > 1 \text{ mm} \end{array} \right\} \quad (13)$$

gde je  $\Delta = 1.65$ .

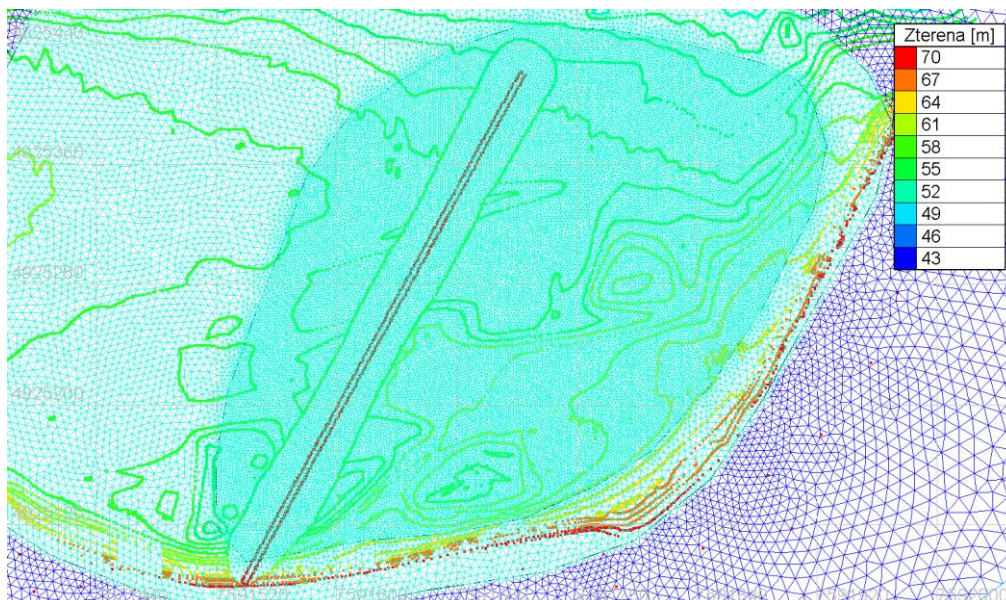
Granica računskog modela za sve varijante proračuna (postojećeg i projektovanog stanja) prikazana je na Slika 11. Računska oblast se diskretizuje preko trougaonih elemenata (konačnih elemenata). Dužina razmatrane deonice iznosi približno 10 km. Korišćene su dužine stranice trouglova od 2 m ("gušći" deo mreže u zoni građevina) do 15 m. Neophodno je napomenuti da je u hidrauličkim analizama varijantnog rešenja sa protočnom građevinom, korišćena fiktivna geometrija. Naime umesto velikog broja šipova i horizontalnih „prečki“, definisani su zamenski vertikalni stubovi većeg prečnika. Prečnik fiktivnih stubova je definisan iz uslova da je površina svetlog otvora 20% manja od realne površine svetlog otvora.



Slika 11. Prikaz celog računskog domena (crna linija) zajedno sa batimetrijom (u boji) korišćenog za analizu transportne sposobnosti za vodu i nanos

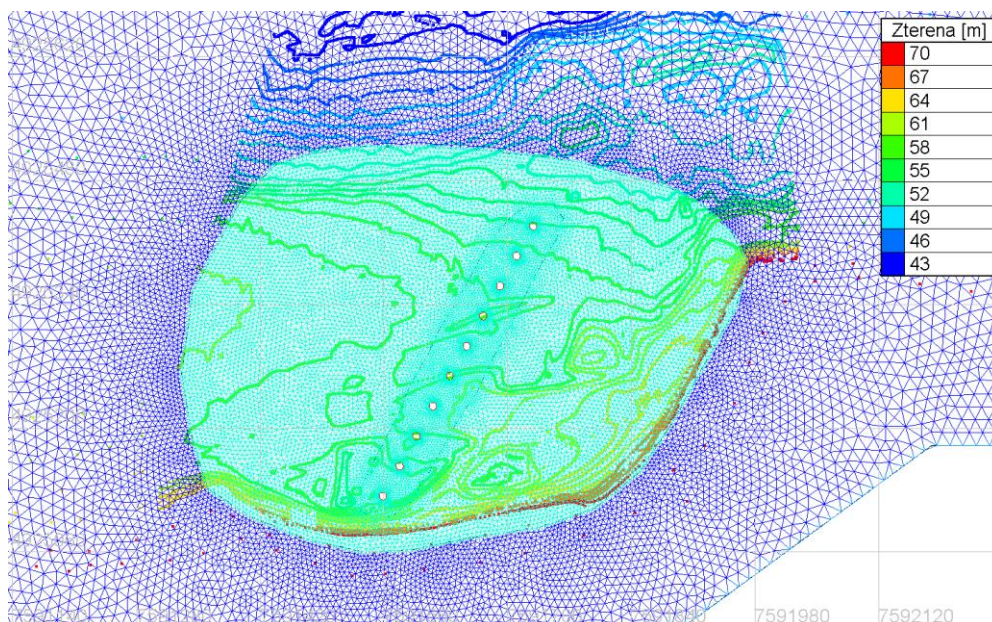
Figure 10. Complete computational domain (black line) with bathymetry data (in colour) used for the water and sediment transport capacity analysis

Deo računke mreže za oblast poprečnih građevina i obale Dunava kod Donjeg Milanovca, prikazan je za slučajeve građevine sa kamenim nabačajem i građevine sa odbojnicima, redom na Slika 12 i Slika 13.



Slika 12. Prikaz diskretizovanog detaljnog poddomena u okviru celog računskog domena, korišćenog za analizu rešenja sa naperom

Figure 12. Detailed discretized computational domain within the whole computational domain, used for the groyne structure analysis



Slika 13. Prikaz diskretizovanog detaljnog poddomena u okviru celog računskog domena, korišćenog za analizu varijantnog rešenja sa protočnom građevinom

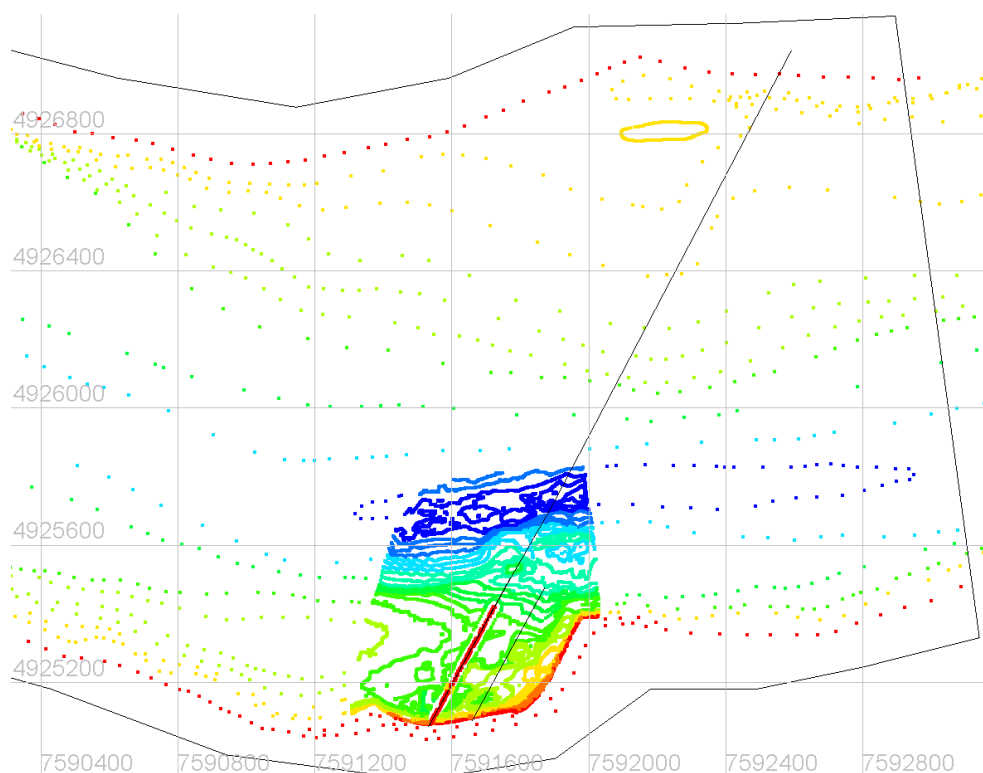
Figure 13. Detailed discretized computational domain within the whole computational domain, used for the nonconventional structure analysis

Pored čvrste konture, kao „nepropusnog“ graničnog uslova, u proračunu su korišćena dva „otvorena“ granična uslova, po jedan za uzvodnu i nizvodnu granicu. Kao uzvodni granični uslov zadat je protok  $Q_{sr}$ , dok je na nizvodnom graničnom uslovu zadata odgovarajuća kota nivoa  $Z_{rač,sr} = 69,178$  mnJm (dobijena u posebnoj analizi [8] vodeći računa o režimima rada HE Đerdap).

### 4.3 Rezultati primene ravanskog modela tečenja

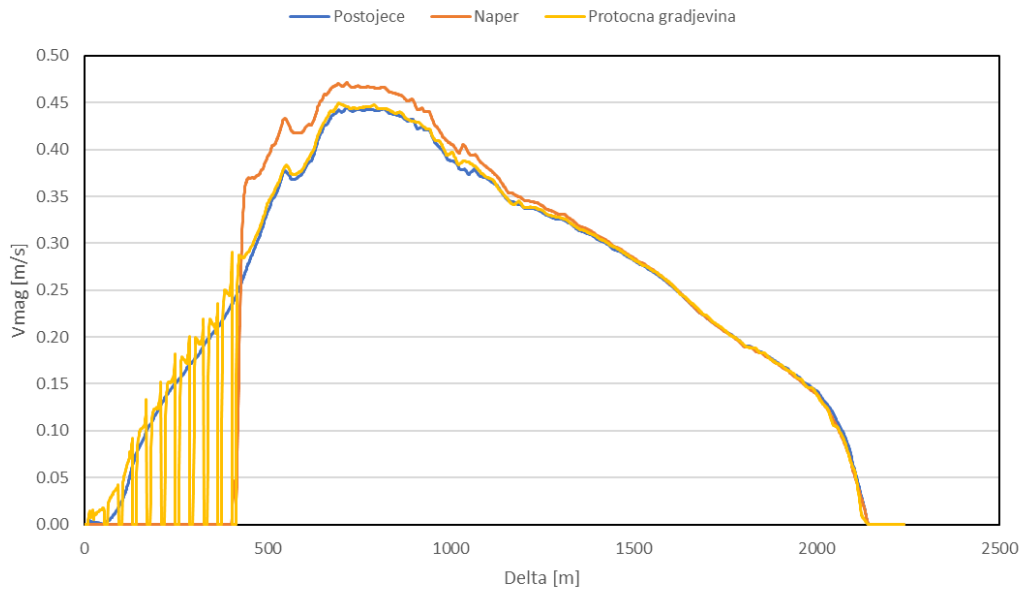
Uticaj projektovanih rešenja poprečnih građevina na transportnu sposobnost za vodu i nanos redom se ocenjuje na osnovu poređenja proračunom dobijenog rasporeda brzina i poređenjem procenjenih najvećih prečnika zrna koja se neće taložiti između varijanti proračuna za postojeće stanje i projektovana stanja.

Na Slika 14 prikazani su profili za koje se na Slika 15 i Slika 16 poredi izračunate brzine za postojeće stanje i dva projektovana stanja. Sa dijagrama promene po dubini osrednjenih brzina, prema očekivanju, jasno se zaključuje da je uticaj protočne građevine značajno manji od uticaja koji na raspored brzina ima građevina od kamenog nabačaja. Upravo se „posledice“ uticaja projektovanih rešenja na raspored brzina mogu kvantifikovati na osnovu gde su prikazani najveći prečnici zrna lebdećeg nanosa koja se neće istaložiti za postojeće stanje i dve varijante projektovanih stanja (dva tipa građevina). Naime, na dijagramima se može uočiti da se u polju između građevine od kamenog nabačaja i obale stvaraju uslovi za istaložavanje zrna prečnika manjih od 0.01 mm. Varijantno rešenje sa protočnom građevinom daje rezultate slične postojećem stanju u kontekstu uslova za istaložavanje nanosa, pa se može smatrati povoljnijim sa aspekta uticaja na transportnu sposobnost za lebdeći nanos.

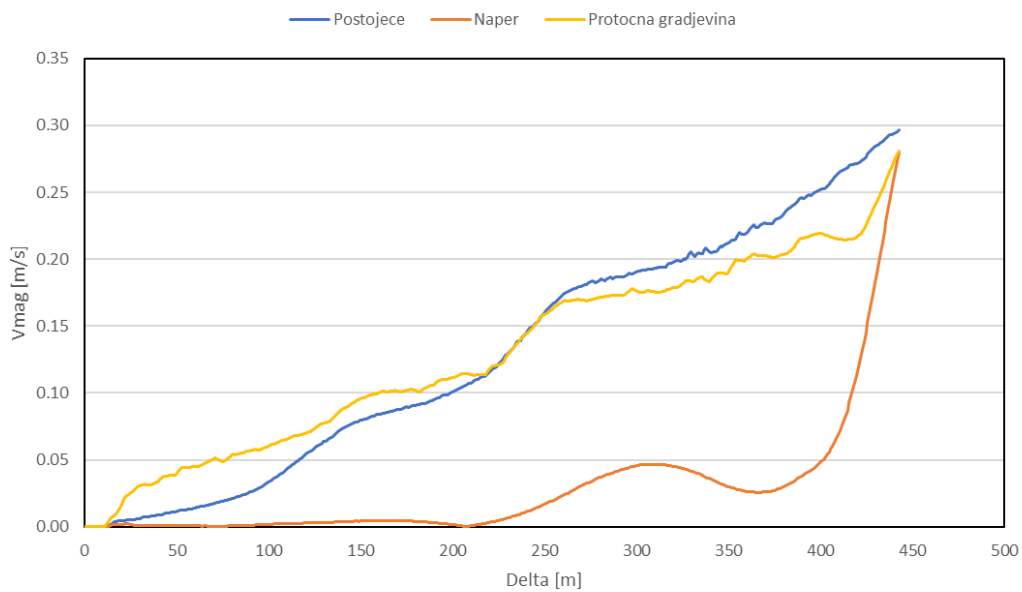


Slika 14. Prikaz karakterističnog celog (CP1) i delimičnog profila (crne linije) (DP2) sa batimetrijom dna (u boji) i granicom računskog domena

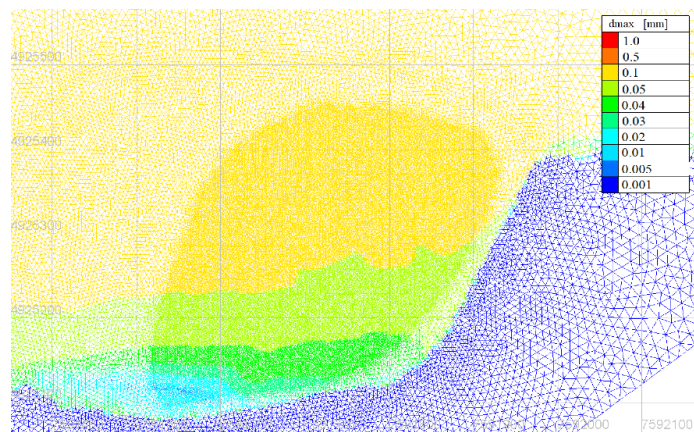
Figure 14. Display of the characteristic integral (CP1) i partial profile (black lines) (DP2) with bathymetry data (in colour) and computational domain boundary



Slika 15. Raspored magnitude vektora brzina duž profila CP1, pri protoku Qsr, za sva varijantna rešenja  
 Figure 15. Velocity vector magnitude distribution along CP1 profile, for flow rate Qsr, for all variants

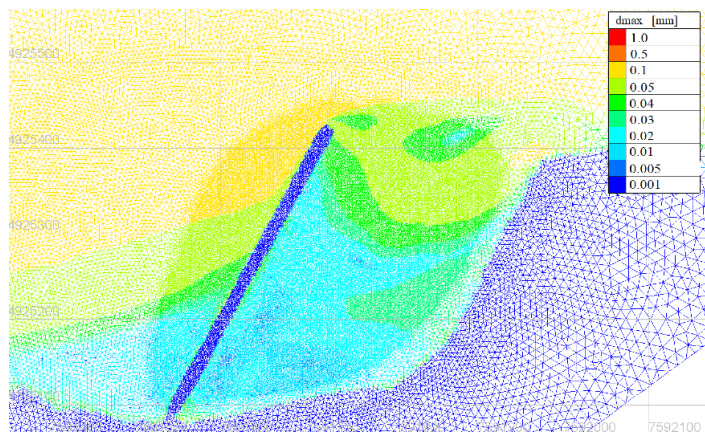


Slika 16. Raspored magnitude vektora brzina duž delimičnog profila DP2, pri protoku Qsr, za sva varijantna rešenja  
 Figure 16. Velocity vector magnitude distribution along partial DP2 profile, for flow rate Qsr, for all variants



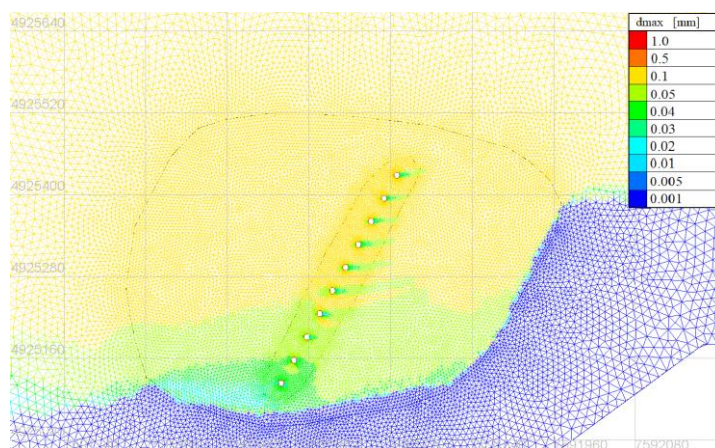
Slika 17. Prikaz rasporeda maksimalnog prečnika zrna  $D_{max}$  koja se neće istaložiti prema usvojenom kriterijumu sedimentacije, pri  $Q_{sr}$  za postojeće stanje

Figure 17. Maximal grain diameter  $D_{max}$  that will not sediment under the adopted sedimentation criterion, for flow rate  $Q_{sr}$  and existing conditions



Slika 18. Prikaz rasporeda maksimalnog prečnika zrna  $D_{max}$  koja se neće istaložiti prema usvojenom kriterijumu sedimentacije, pri  $Q_{sr}$  za varijantno rešenje sa naperom

Figure 18. Maximal grain diameter  $D_{max}$  that will not sediment under the adopted sedimentation criterion, for flow rate  $Q_{sr}$  and groyne variant



Slika 19. Prikaz rasporeda maksimalnog prečnika zrna  $D_{max}$  koja se neće istaložiti prema usvojenom kriterijumu sedimentacije, pri  $Q_{sr}$  za varijantno rešenje sa protočnom građevinom

Figure 19. Maximal grain diameter  $D_{max}$  that will not sediment under the adopted sedimentation criterion, for flow rate  $Q_{sr}$  and nonconventional structure

## 5 Zaključak

U radu je predstavljena upotreba numeričkih modela za analizu uticaja poprečnih građevina na smanjenje amplitude talasa usled vetra odnosno analizu uticaja građevina u rečnom koritu na transportnu sposobnost toka za vodu i (lebdeći) nanos. Iako obavljene računске simulacije nisu potvrđene, ukazuju na moguće prednosti primene protočne građevine sa odbojnicima na šipovima u odnosu na primenu poprečnih građevina od kamenog nabačaja. Rezultati predstavljenih simulacija ukazuju na to da se sa neznatno manjim stepenom smanjenja visine talasa u odnosu na građevine od kamenog nabačaja, upotrebom odbojnika na šipovima, može značajno smanjiti uticaj građevina na režim lebdećeg nanosa i protočnost korita.

## Literatura

- [1] B. Elsharnouby, A. Soliman, M. Elnaggar i M. Elshahat, „Study of environment friendly porous suspended breakwater for the Egyptian Northwestern Coast“, *Ocean Engineering*, t. 48, pp. 47-58, 2012.
- [2] „Hidraulička studija za potrebe izrade idejnog projekta zaštite zapadne obale Dunava u Donjem Milanovcu od štetnog dejstva talasa“, Građevinski fakultet Beograd, 2021.
- [3] L. Savić, Uvod u hidrotehničke Građevine, Građevinski fakultet Beograd, 2009.
- [4] A. J. Yarde, L. S. Banyard i N. W. H. Aflsop, Reservoir Dams: wave conditions, wave overtopping and slab protection, HR Wallingford, 1996.
- [5] T. C. Massey, M. E. Anderson, J. M. Smith, J. Gomez i R. Jones, „STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User’s Manual for STWAVE, Version 6.0“, US Army Corps of Engineers, 2011.
- [6] 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.
- [7] M. Jovanović, Regulacija reka: rečna hidraulika i morfologija, Građevinski fakultet Beograd, 2008.
- [8] „Zaštita zapadne obale Dunava od štetnog dejstva talasa - Hidrološka studija“, Institut „Jaroslav Černi“, 2021.