

Numeričko modeliranje propagacije talasa u zoni objekata u moru

UDK: 519.6:627.223.6

Sava Petković¹
Radomir Kapor²

APSTRAKT: Nakon završetka Idejnog projekta uređenja obale u uvali Perazića Do (Crnogorsko primorje na Jadranskom moru), analizirana je propagacije talasa u zoni projektovane marine primenom numeričkih modela SMS i CGWAVE. CGWAVE je opšti numerički model, koji se koristi za simulaciju i procenu visina talasa u lukama, marinama, u zoni otvorenih obala, ostrva, fiksnih i plivajućih objekata. Primenom SMS i CGWAVE numeričkih modela, za propagaciju talasa u zoni projektovanih objekata u uvali Perazića Do, dobijene su opšte karakteristike talasanja (faze i linije jednakih visina talasa) u zoni projektovanih objekata. Numerički modeli su primenjeni za nekoliko karakterističnih kombinacija pravaca, visina i perioda incidentnih talasa. Projektovana marina pruža veoma dobru zaštitu plovilima pri dejstvu talasa iz svih pravaca, iz kojih su moguće pojave talasa većih visina.

Ključne reči: Propagacija, talasi, objekti u moru, numeričko modeliranje, Perazića Do

Numerical modeling of wave propagation in the vicinity of the sea structures

ABSTRACT: After finishing the basic design of marina in Perazica Do (on the Adriatic coast), the analysis of wave propagation in the zone of main marina structures was performed. The numerical models SMS and CGWAVE were used. CGWAVE is a general wave prediction model, applicable to harbours, marinas, open coasts, islands, and fixed and floating structures. General wave characteristics (phase and lines of equal wave heights) in the zone of the designed marina structures were determined by the SMS and CGWAVE numerical models. These models were used for several combinations of wave directions, heights and periods. It was shown that designed marina structure ensures efficient protection for vessels for all wave directions.

Key words: Wave, propagation, sea structures, numerical modeling, Perazica Do

¹ Prof. dr Sava Petković, dipl.građ.inž., Poljoprivredni fakultet, Beograd, spetkovic@sbb.co.yu

² Doc. dr Radomir Kapor, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet, Beograd, rkapor@hikom.grf.bg.ac.yu

1. Uvod

Tokom 2004. godine izrađeno je najpre Idejno rešenje, a potom i Idejni projekat uređenja obale u uvali Perazića Do [4]. Uvala Perazića Do nalazi se oko 1,5 km severozapadno od Petrovca, na Crnogorskom primorju. U jugoistočnom delu uvale, pored postojećeg hotela "As", planira se izgradnja novog hotelskog kompleksa visoke kategorije. Imajući u vidu značajno povećanje kapaciteta hotela, kao i predviđeni visoki nivo usluga, novi hotelski kompleks mora imati i odgovarajuće sadržaje na vodi. Investitor je kroz prethodne faze projektno-tehničke dokumentacije predvideo sledeće glavne marinske sadržaje u okviru proširenja hotela i uređenja obale:

- plažu
- višenamenski plato (nasuta platforma) i
- marinu

Uređenjem plaže u uvali Perazića Do predviđeno je proširenje postojeće prirodne plaže kao i izgradnja nove veštačke plaže, duž hotelskog kompleksa. Za zaštitu plaže od erozivnog delovanja talasa predviđena je izgradnja centralne naperske konstrukcije, kao i izgradnja podvodnog praga.

Višenamenski plato predstavlja nasutu konstrukciju, zaštićenu obalnim zidom, kaskadno formiranu u visinskom pogledu, kako bi se neutralisalo udarno dejstvo talasa. Na ovako pripremljenoj površini je predviđeno formiranje raznovrsnih sadržaja (šetalište, plaža, sportsko rekreativni elementi, pristan za veća plovila).

Marina za oko 40 plovila, zaštićena je od dejstva talasa odgovarajućim lukobranom. Sa unutrašnje strane lukobrana, kao i duž obalnih zidova marine, predviđeni su vezovi za plovila, dok je koren lukobrana proširen u vidu platoa radi formiranja dodatnih površina.

Uvala nema nikakvu prirodnu zaštitu i izložena je udaru talasa sa otvorenog mora iz kvadranta jug-zapad, pri čemu talasi mogu dostići veliku visinu tokom zimskog perioda, obzirom da morsko dno u zoni uvale karakterišu veoma strmi nagibi.

Uređenje obale u uslovima veoma velike izloženosti obale dejstvu talasa je izuzetno složen problem. O tome svedoče i rezultati hidrauličkih modelskih ispitivanja rešenja nekadašnjeg predloga uređenja obale i lučice u uvali Perazića Do. Ta ispitivanja su izvršena 1974. godine u Institutu za vodoprivredu "Jaroslav Černi" iz Beograda [3]. Već tada se pokazalo da je vrlo teško doći do nekog zadovoljavajućeg rešenja pristana i uređenja plaže ispred hotela, jer su prirodni uslovi, pri dejstvu talasa većih visina, izuzetno nepovoljni. Zbog toga je u prethodnoj tehničkoj dokumentaciji naglašeno da će i za uređenje predviđenog novog hotelskog i turističkog kompleksa u uvali Perazića Do, biti potrebno uložiti veoma mnogo truda, kako bi se kroz iterativni postupak došlo do konačnog rešenja uređenja obale, marine i pristana. U fazi revizije i analize Idejnog projekta nekoliko stručnjaka je posebno ukazivalo na problem zaštite plovila u marini od dejstva ekstremnih talasa, koji se mogu javiti u zoni uvale Perazića Do.

Nakon završetka izrade Idejnog projekta uređenja obale u uvali Perazića Do, Investitor se našao pred dilemom kako verifikovati predložena rešenja uređenja obale, a posebno predloženo rešenje marine. Jedna mogućnost je bila da se, kao u slučaju ispitivanja nekadašnjeg predloga uređenja obale iz 1974. godine, izvrše hidraulička modelska ispitivanja rešenja uređenja obale predloženih u Idejnom projektu uređenja obale u uvali Perazića Do iz 2004. godine. Hidraulička modelska ispitivanja omogućavaju da se osim ispitivanja zaštite plovila od dejstva talasa, proveru i njihova stabilnost na udarno dejstvo talasa. Kao druga mogućnost za verifikaciju rešenja

predloženih u Idejnom projektu uređenja obale u uvali Perazića Do, nametalo se korišćenje nekih od savremenih numeričkih modela propagacije talasa u zoni projektovanih objekata u priobalju. Potrebno je naglasiti da numerički modeli daju uvid samo u sliku talasanja u luci ili marini, a ne i u stabilnost objekata. Investitor je detaljno razmatrao obe mogućnosti za verifikaciju predloženih rešenja uređenja obale u uvali Perazića Do, i na kraju doneo odluku da se verifikacija izvrši primenom numeričkog modela. Naime, preovladalo je mišljenje da je marina ključni objekat u okviru predviđenog uređenja obale uvali Perazića Do, i da je najvažnije utvrditi efikasnost zaštite koju projektovani lukobran pruža plovilima u marini.

Pri izboru numeričkog modela, koji će biti korišćen za simulaciju dejstva talasa u uvali Perazića Do, zahtevano je da odabrani numerički model ima višestruku verifikaciju za različite probleme propagacije talasa u priobalju, kao i da cena numeričkog modela bude značajno niža od cene hidrauličkih modelskih ispitivanja. Nakon detaljnih analiza Investitor je na predlog projektanata kupio licencu za korišćenje numeričkih modela SMS i CGWAVE.

2. Opis numeričkih modela

SMS predstavlja složeni grafički interfejs za kreiranje koncepcije modela, generisanje računске mreže, statističku interpretaciju i vizuelni pregled rezultata modela za simuliranje površinskih vodenih tokova. To je osnovni model koji omogućava primenu mnogobrojnih modela za simuliranje površinskih tokova koji su razvijeni u okviru aktivnosti veoma poznatih američkih istraživačkih institucija:

- U.S. Army Engineer District
- U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC)
- Coastal and Hydraulics Laboratory (CHL)

Uz SMS model mogu se koristiti sledeći modeli za simuliranje površinskih vodenih tokova: ADCIRC, TABS (RMA2, RMA4, SED2D), ADH, HiVEL, M2D, STWAVE, BOUSS2D i CGWAVE. Ovi integrisani i međusobno povezani modeli omogućavaju simulaciju strujanja, propagacije talasa, cirkulacije, kretanja nanosa pod dejstvom talasa i struja, morfoloških promena na morskom dnu, za širok spektar problema u okviru pomorske i obalne hidraulike [1]. Za simulaciju talasanja u zoni buguće marine u uvali Perazića Do odabran je numerički model CGWAVE.

CGWAVE opšti numerički model koji se koristi za simulaciju i procenu visina talasa u lukama, marinama, u zoni otvorenih obala, ostrva, fiksnih i plivajućih objekata. Numerički model je baziran na rešavanju eliptičnih jednačina propagacije talasa primenom metode konačnih elemenata. Obuhvata efekte refrakcije i difrakcije talasa, uticaje disipacije energije talasa usled trenja, lom talasa u plitkoj vodi, kao i efekte nelinearne disperzije amplituda talasa [2].

Za verifikaciju rezultata primene SMS i CGWAVE numeričkih modela su korišćeni rezultati merenja karakteristika talasa u zoni izvedenih objekata, ili rezultati hidrauličkih modelskih ispitivanja. Modeli su testirani za veći broj karakterističnih problema propagacije talasa u priobalju, u zoni različitih objekata.

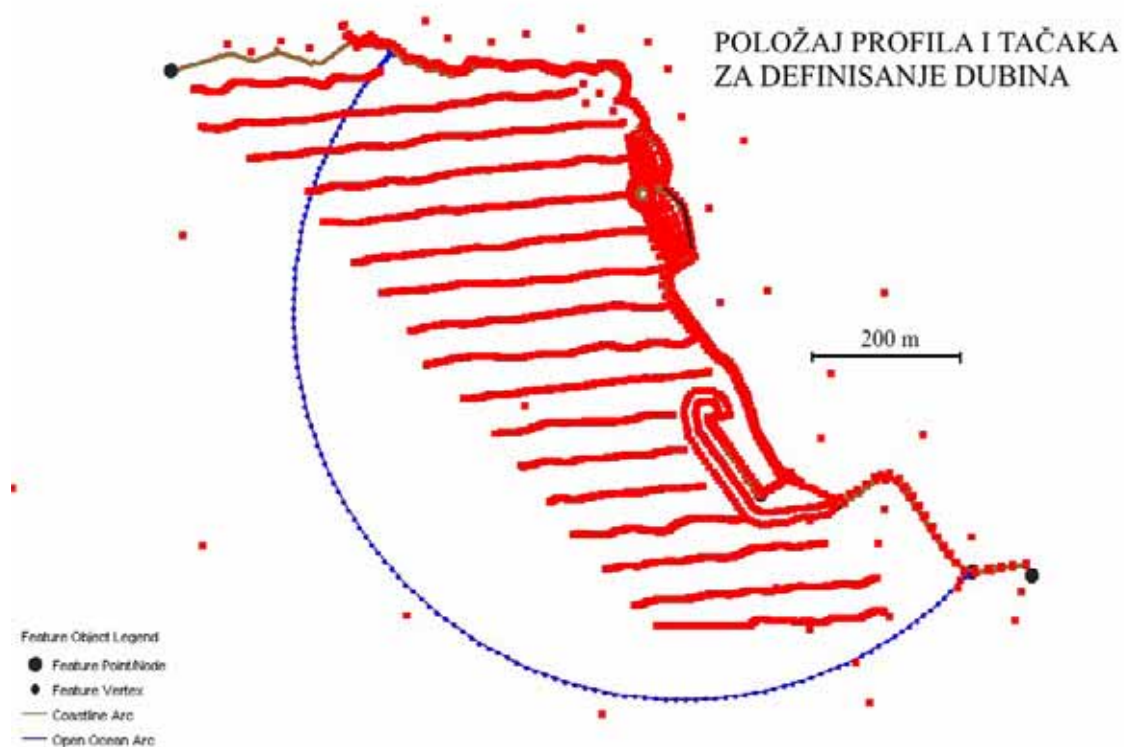
Procedura korišćenja modela CGWAVE u okviru upotrebe opšteg SMS modela obuhvata četiri etape:

- Kreiranje konceptualnog modela

- Generisanje mreže konačnih elemenata
- Pokretanje modela
- Prikazivanje i interpretaciju rezultata

Prvi korak dakle predstavlja kreiranje konceptualnog modela za problem koji je potrebno rešiti. Za ovu fazu rada potrebni su podaci o batimetrijskim karakteristikama morskog dna i linije obale, elementi koji definišu koordinatni sistem i referentni nivo, kao i procenu veličine površine koju je neophodno obuhvatiti numeričkim modelom.

Za potrebe projektovanja marine detaljno su snimane batimetrijske karakteristike morskog dna, u široj zoni predviđenih radova na uređenju obale u uvali Perazića Do. Karakteristike linije obale dobijene su na osnovu raspoloživih podataka iz situacionog plana u razmeri 1 : 25000. Taj situacioni plan priobalja, u široj zoni uvale Perazića Do, je takođe korišćen za definisanje dubina vode u zonama koje nisu bile obuhvaćene detaljnim batimetrijskim snimanjima morskog dna u uvali Perazića Do. Na Slici 1 je prikazan položaj snimljenih profila kao i dodatnih tačaka, koji su korišćeni za definisanje batimetrijskih karakteristika u uvali Perazića Do. Tačke su na slici obeležene crvenim kvadratima.

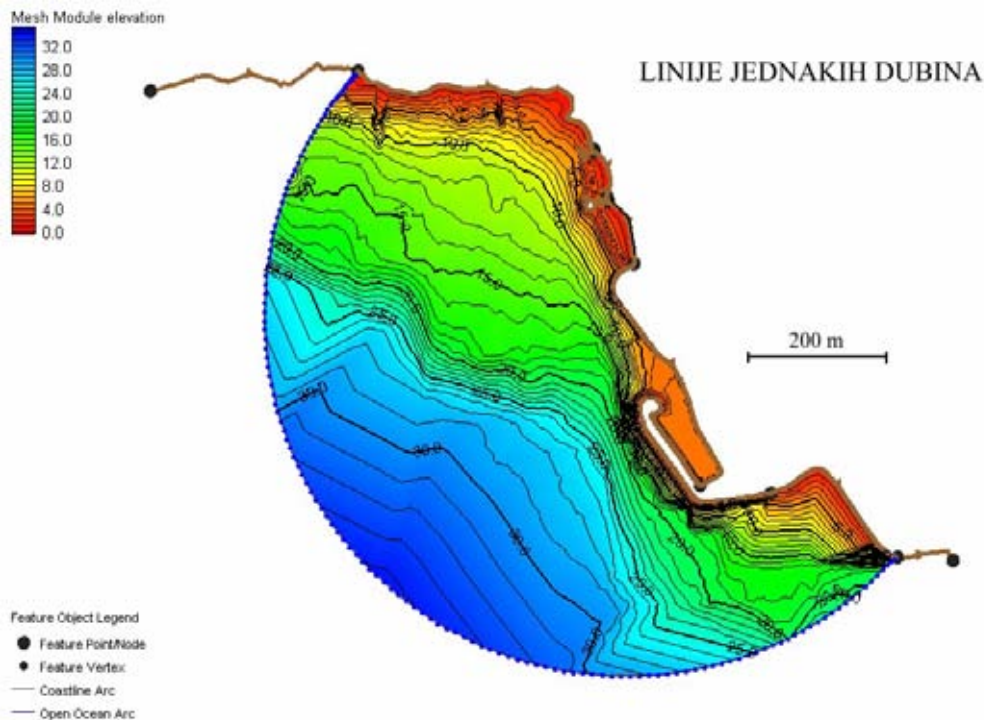


Slika 1. Položaj snimljenih profila u uvali Perazića Do

CGWAVE model zahteva definisanje jasne površine koja će biti obuhvaćena numeričkim modelom propagacije talasa u priobalju. Taj postupak se naziva definisanje domena. Osnovni kriterijum koji je potrebno ispuniti pri definisanju domena modela je da se luka, marina, ili drugi objekti u moru nalaze barem na jednoj trećini udaljenosti od kraja utvrđenog domena primene modela. Generalno govoreće domen ima polukružni oblik, osim za slučaj propagacije talasa u zoni ostrva. U slučaju uređenja obale u uvali Perazića Do domen je morao biti dovoljno veliki da bi obuhvatio sve predviđene

sadržaje na obali: plažu, višenamenski plato i marinu. Izgled domena za uvalu Perazića Do prikazan je na Slici 1.

Na osnovu rezultata snimanja poprečnih profila i dubina vode u dodatnim tačkama, koje su očitane sa situacionog plana u razmeri 1 : 25000, u sledećem koraku su određene batimetrijske karakteristike u uvali Perazića Do, unutar definisanog domena. Na Slici 2 su prikazane karakteristike morskog dna unutar domena u uvali Perazića Do. Može se uočiti da su najstrmiji nagibi morskog dna u zoni ispred lukobrana marine. Najveće dubine su na obodu centralnog dela domena, naspram lukobrana marine. Na tom delu oboda domena dubine mora su oko 35 m.



Slika 2. Linije jednakih dubina unutar domena u uvali Perazića Do

Definisanje ulaznih parametara odnosi se na utvrđivanje pravca, visine i periode talasa. Pri tom je potrebno naglasiti da se u modelu zadaje amplituda talasa, koja predstavlja polovinu visinu talasa. Pri korišćenju modela postoje takozvane linearna i nelinearna opcija. Kod linearne opcije isključeni su uticaji trenja, loma talasa i nelinearne disperzije talasa. Preporučuje se da se prilikom prvog korišćenja CGWAVE modela upravo koristi ta najjednostavnija linearna opcija. Međutim, primena CGWAVE modela je pokazala da se u pojedinim slučajevima dobijaju izuzetno velike visine talasa, koje su posledica zanemarivanja nelinearnih uticaja.

3. Rezultati proračuna propagacije talasa

U uvodnom poglavlju je naglašeno da je uvala Perazića Do izložena dejstvu talasa iz kvadranta jug - zapad. Karakteristike talasa koje se mogu javiti u široj okolini marine su detaljno analizirani u Idejnom projektu, pa će u daljem tekstu biti dat samo rezime tih analiza.

Kao i na celom južnom Jadranu najveći talasi se mogu javiti u zimskom periodu, pri dejstvu vetrova iz južnog (S) pravca. Naime dužina feča vetrova iz jugoistočnog i južnog pravca, poznatijih kao jugo, prelazi 1000 km, jer on dopire do obale na istočnom Mediteranu. Na osnovu analize svih raspoloživih podataka o vetrovima i talasima na južnom Jadranu, zaključeno je da bi za karakteristike talasa u dubokoj vodi iz južnog pravca, merodavnih za projekat marine u uvali Perazića Do, trebalo usvojiti sledeće vrednosti:

- visina talasa, $H = 6,0$ m
- perioda talasa, $T = 10$ s

U pogledu karakteristika talasa u dubokoj vodi iz jugozapadnog (SW) i zapadnog (W) pravca dužine fečeva su znatno manje, jer oni dopiru samo do italijanskih obala Jadranskog mora. Zbog toga su u Idejnom projektu usvojene sledeće karakteristike talasa u dubokoj vodi za ova dva pravca:

- visina talasa, $H = 4,0$ m
- perioda talasa, $T = 8$ s

U Idejnom projektu je naglašeno da prirodni položaj uvale Perazića Do, kao i položaj projektovanog lukobrana, obezbeđuju veoma dobru zaštitu plovilima u marini pri dejstvu talasa iz južnog pravca (S). Naime, ulaz u marinu je veoma dobro zaštićen od dejstva talasa iz južnog pravca, što se može uočiti sa Slika 1 i 2. Sa aspekta sigurnosti plovila u marini, daleko su nepovoljniji talasi iz jugozapadnog (SW) i zapadnog (W) pravca. Posebno su opasni talasi iz zapadnog pravca, koji nastaju pri dejstvu vetra "pulenat", jer bi oni mogli direktno da uđu u marinu. Projektanti marine su bili u nedoumici za koje karakteristike talasa SW i W pravca bi trebalo proveriti visine talasa u marini. Potrebno je naglasiti da su davne, 1974. godine, hidraulička modelska ispitivanja za nekadašnje rešenje lučice u uvali Perazića Do izvršena za visinu talasa od $H = 3,0$ m za talase iz SW i W pravca. Prethodno je naglašeno da su projektanti marine imali konzervativniji stav, pa su za projektnu visinu talasa iz SW i W pravca usvojili $H = 4,0$ m. Kako su raspoloživi podaci o talasima na južnom Jadranu veoma skromni, projektanti marine su odlučili da za proveru najnepovoljnijeg slučaja dejstva talasa na projektovanu marinu usvoje vrednost od $H = 5,0$ m, za talase iz SW i W pravca.

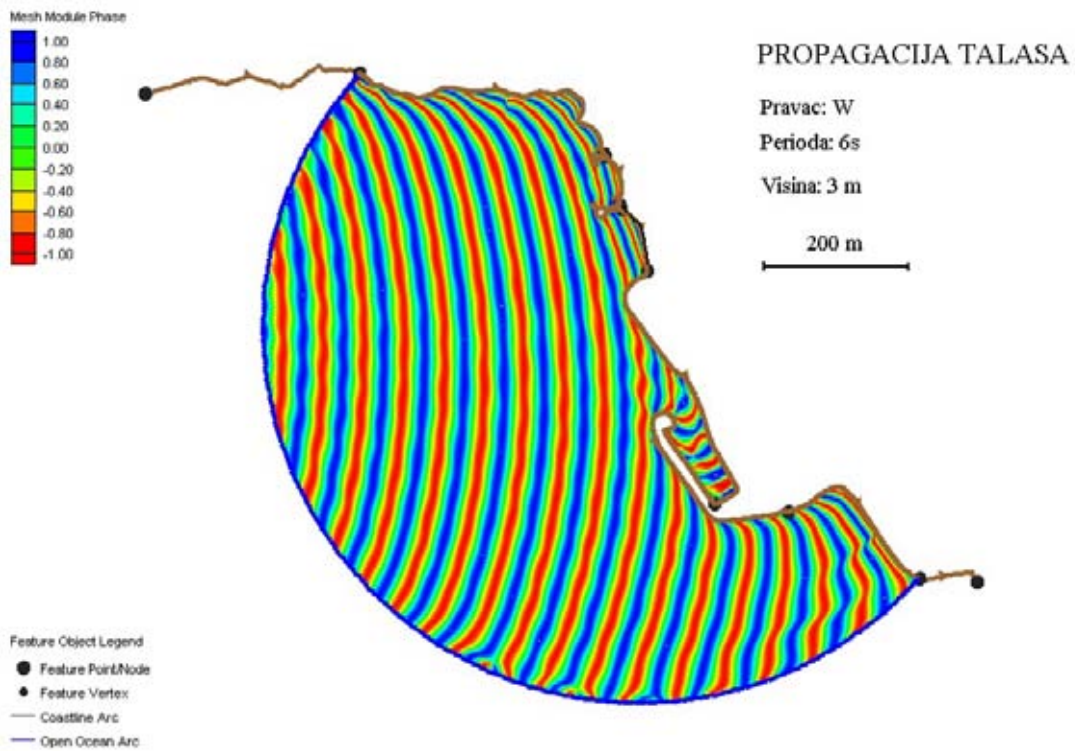
S obzirom da su prethodna razmatranja bila posvećena samo retkim slučajevima pojave talasa ekstremnih karakteristika, bilo je neophodno definisati i karakteristike talasa koji se mogu javiti tokom prosečne godine, ili tokom perioda od nekoliko godina. U Tabeli 1 prikazane su karakteristike incidentnih talasa za koje su izvršeni proračuni propagacije talasa u zoni marine u uvali Perazića Do. Pravci talasa su izražavani i stepenima, jer se na taj način zadaju kao ulazni podaci za proračun. U tabeli su navedene visine talasa, H , ali je naglašeno da je ulazni parametar za proračun amplituda talasa $a = H/2$. Najzad, izvršena je verifikacija osetljivosti modela na male promene pravca delovanja incidentnih talasa. Tako su za talase visine $H = 4,0$ m i periode $T = 8$ s, izvršeni proračuni propagacije talasa za pravce od 35° , 40° , 45° (SW) i 50° .

Tabela 1. Pregled parametara incidentnih talasa za koje su izvršeni proračuni

Pravac talasa	Ugao (°)	Perioda talasa (s)	Visina talasa (m)
S	90	6	3
S	90	8	4
S	90	9	5
S	90	10	6
SW	45	6	3
SW	45	8	4
SW	45	9	5
	35	8	4
	40	8	4
	50	8	4
W	0	6	3
W	0	8	4
	0	9	5

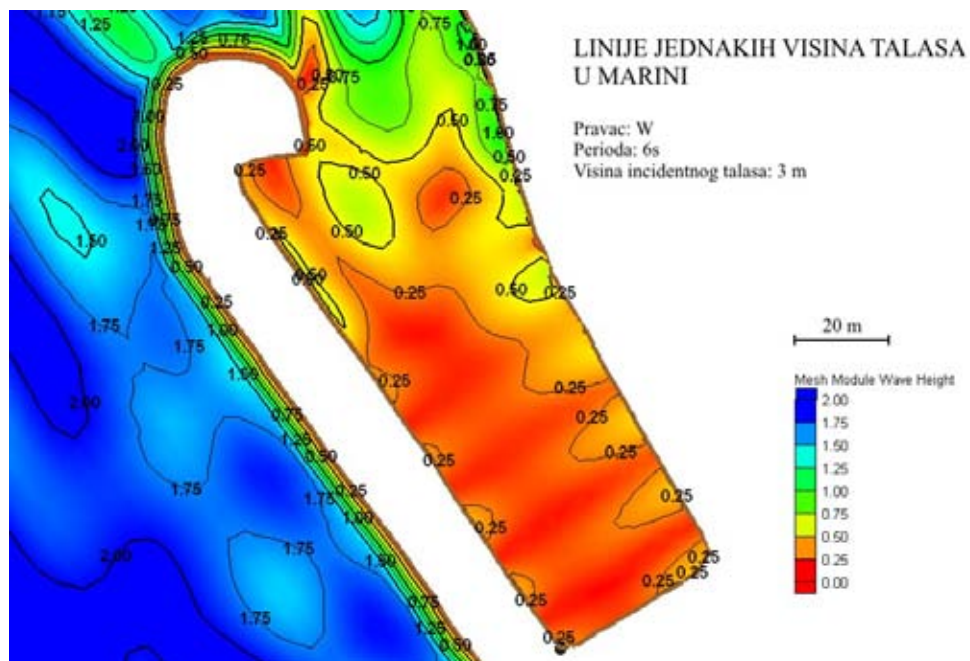
Za sve slučajeve izvršenih proračuna propagacije talasa, dobijeni rezultati su prikazani na isti način. Najpre su prikazane faze talasa, koje ustvari predstavljaju linije jednakih položaja talasa od kresta do dolja. Kreste talasa su na priložima označene sa +1,00, dok su dolje talasa označene sa -1,00. Brojevi od +1,00 do -1,00 označavaju faze talasa od kreste do dolje. Ovi crteži daju izvanredan uvid u sliku talasanja u priobalju, pri propagaciji talasa iz duboke u plitku vodu. Naročito se dobro uočavaju efekti refrakcije talasa, odnosno njihovog povijanja pri nailasku na plitku vodu. Zatim su za svaki slučaj proračuna nacrtane linije jednakih visina talasa u zoni marine. U cilju dobijanja što boljeg uvida u sliku talasanja u marini iz domena proračuna je izdvojena površina koja se odnosi ulaz i akvatoriju marine. Na sličan način su izdvojene i površine u zoni podvodnih pragova i projektovane plaže.

U prethodnom tekstu je već naglašeno da bi talasi iz zapadnog pravca mogli biti najnepovoljniji u pogledu visina talasa u marini. Naime, vetar iz zapadnog pravca, takozvani "pulenat", podiže talase koji mogu dostići velike visine. Sa druge strane, orijentacija obale, odnosno osovine projektovanog lukobrana u uvali Perazića Do, su takve da bi talasi iz zapadnog pravca mogli direktno da uđu u akvatoriju marine. Od svih ispitivanih varijanti dejstva talasa u zoni projektovane marine, najnepovoljniji slučaj je onaj koji je dobijen pri dejstvu talasa iz zapadnog pravca sa periodom od 6 s i visinom talasa od 3 m. Na Slici 3 je prikazana propagacija talasa za taj slučaj. Može se uočiti da talasi direktno ulaze u akvatoriju marine.



Slika 3. Propagacija talasa iz zapadnog pravca

Da bi se za taj najnepovoljniji slučaj dobio uvid u sliku talasanja u marini, na Slici 4 su prikazane linije jednakih visina talasa, počevši od visine talasa od 0,25 m.



Slika 4. Linije jednakih visina talasa u marini za pravac W

4. Zaključci

Primenom SMS i CGWAVE numeričkih modela za propagaciju talasa u zoni projektovanih objekata u uvali Perazića Do dobijeni su rezultati koji su veoma korisni za izradu Glavnog projekta uređenja obale u uvali Perazića Do.

Rezultati primene SMS i CGWAVE numeričkih modela za propagaciju talasa u zoni projektovanih objekata u uvali Perazića Do mogu se sumirati na sledeći način:

- Rezultati proračuna propagacije talasa ukazuju da je položaj projektovanog lukobrana veoma povoljan sa aspekta mogućnosti penetracije incidentnih talasa koji dolaze iz južnog (S) i jugozapadnog (SW) pravca. Naime, talasi iz tih pravaca ne mogu direktno da ulaze u marinu, pa je talasanje u marini uglavnom posledica difrakcije talasa u zoni glave lukobrana. Pri dejstvu talasa iz najnepovoljnijeg, zapadnog (W) pravca, samo je talasima sa manjim periodama, odnosno sa manjim talasnim dužinama, omogućen direktan ulaz u marinu. Talasanje u marini pri dejstvu talasa sa većim periodama, odnosno sa većim talasnim dužinama, ne dovodi do značajnijeg pogoršanja uslova talasanja u marini.
- Projektovana marina pruža veoma dobru zaštitu plovilima pri dejstvu talasa iz svih pravaca iz kojih su moguće pojave talasa većih visina. Najnepovoljniji pravac delovanja talasa je iz zapadnog (W) pravca, jer oni mogu direktno da uđu u marinu. Međutim, rezultati proračuna su pokazali da samo talasi sa manjim periodama, odnosno kraćim talasnim dužinama, mogu direktno ući u marinu. Talasi sa dužim periodama, odnosno sa većim talasnim dužinama, ulaze u marinu kao posledica difrakcije talasa u zoni glave lukobrana.
- Od svih ispitivanih varijanti dejstva talasa u zoni projektovane marine, najnepovoljniji slučaj je onaj koji je dobijen pri dejstvu talasa iz zapadnog (W) pravca, sa periodom od 6 s i visinom talasa od 3 m. Na samom ulazu u marinu javljaju se talasi visine od 1,0 do 2,0 m. Linija visina talasa od 0,5 m se javlja u zoni glave lukobrana i duž polovine vertikalnog pristana na obali marine. Takođe su i na početnom delu unutrašnje strane lukobrana registrovani talasi visine 0,5 m. Međutim, na većem delu akvatorije marine dominiraju talasi čija je visina do 0,25 m. Prema tome delove pristana na ulazu u marinu, gde se javljaju talasi od 0,5 m, ili još nešto viši, bi trebalo koristiti za privez većih jahti, kojima ovakvi talasi ne smetaju. Na preostalim delovima pristana, gde dominiraju talasi do 0,25 m mogu se koristiti i za privez manjih plovila.
- Male promene u pravcu delovanja incidentnih talasa ne utiču bitno na sliku talasanja u marini. Sve rezultate proračuna za južni (S), jugozapadni (SW) i zapadni (W) pravac bi trebalo shvatiti kao reprezentativne za malo širi opseg ($\pm 10^\circ$) u odnosu na nominalni pravac.

Literatura

1. Briggs, M.J., Donnell, B.P., Demirbilek, Z. (2004), *How to Use CGWAVE with SMS: An Exemple for Tedious Creeek Small Craft Harbour*, US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL. CHETN-1-68
2. Demirbilek, Z., Panchang, V. (1999), *CGWAVE: A Coastal Surface Water Wave Model of the Mild Slope Equation*, Tecnicl report CHL-98
3. *Hidrauličko modelsko ispitivanje lukobrana i lučice Perazića Do* (1974), Institut za vodoprivredu 'Jaroslav Černi', Beograd
4. *Idejni Projekat uređenja obale u uvali Perazića Do*, (2004), Neimar-inženjering, d.o.o. Beograd