

Utjecaj lukobrana na valno polje luke Makarska

Vedran Petrov, Mijo Vranješ

Ključne riječi

lukobran,
luka Makarska,
valno polje,
valovi,
numeričko modeliranje,
zaštita akvatorija

Key words

breakwater,
Makarska Port,
wave field,
waves,
numerical modelling,
maritime zone protection

Mots clés

brise-lames,
port de Makarska,
champ de vagues,
ondes,
modélisation numérique,
protection de la zone
maritime

Ключевые слова

волнолом,
гавань Макарска,
волновое поле,
волны,
цифровое моделирование,
защита акватории

Schlüsselworte

Hafendamm,
Hafen Makarska,
Wellenfeld,
Wellen,
numerisches Modellieren,
Schutz des Aquatoriums

V. Petrov, M. Vranješ

Stručni rad

Utjecaj lukobrana na valno polje luke Makarska

U radu je prikazana analiza valnog polja u luci Makarska numeričkim modeliranjem postojećeg stanja (bez lukobrana) i varijantnih rješenja planiranog lukobrana. Analizirana je učinkovitost lukobrana pri djelovanju valova iz smjerova W-pulenat, SW-lebić, S-oštro, SSE-jugo. Temeljem usporedbe rezultata numeričkih simulacija promjene valnog polja, predloženo je optimalno rješenje lukobrana za zaštitu akvatorija luke od valova. Analiza je provedena numeričkim modelom Artemis-Telemac.

V. Petrov, M. Vranješ

Professional paper

Influence of breakwater on the wave field in Makarska Port

The authors present an analysis of wave field in Makarska Port based on numerical modelling of the existing situation (without breakwater), and according to alternative solutions for the planned breakwater. The performance of breakwater with respect to wave action from W-pulenat, SW-lebić, S-oštro, and SSE-jugo, is analyzed. Based on comparison of results obtained by numerical simulation of changes in wave field, a breakwater solution ensuring optimum protection of port area against wave action is recommended. The analysis is based on the Artemis-Telemac numerical model.

V. Petrov, M. Vranješ

Ouvrage professionnel

L'influence de brise-lames sur le champ de vagues dans le port de Makarska

Les auteurs présentent une analyse du champ de vagues dans le port de Makarska basée sur la modélisation numérique de la situation existante (sans brise-lames), et selon les solutions alternatives pour le brise-lames planifié. Le comportement du brise-lame par rapport à l'action des vagues de la direction W-pulenat, SW-lebić, S-oštro et SSE-jugo, est analysé. En se basant sur la comparaison des résultats obtenus par al simulation numérique des changements du champ de vagues, une solution de brise-lame, assurant une protection optimum de la zone de port contre l'action des vagues, est recommandée.

В. Петров, М. Враньеш

Отраслевая работа

Влияние волнолома на волновое поле гавани Макарска

В работе показан анализ волнового поля гавани Макарска, проведенный посредством цифрового моделирования существующего состояния (без волнолома), и вариантных решений запланированного волнолома. Проведен анализ эффективности волнолома при воздействии волн из направлений W-пуленат, SW-лебиц, S-оштро, SSE-юго. На основании сравнения результатов цифрового моделирования изменения волнового поля предложено оптимальное решение волнолома для защиты акватории гавани от волн. Анализ проводился с использованием цифровой модели Artemis-Telemac.

V. Petrov, M. Vranješ

Fachbericht

Einfluss des Hafendammes auf das Wellenfeld des Hafens Makarska

Im Artikel ist eine Analyse des Wellenfelds im Hafen Makarska durch numerisches Modellieren des gegenwärtigen Zustands (ohne Hafendamm) und von Variantenlösungen des geplanten Hafendammes dargestellt. Analysiert ist die Wirksamkeit des Hafendammes bei Wellen aus den Richtungen W - (pulenat), SW - (lebić), S - (oštro) und SSE - (jugo). Auf Grund des Vergleichs der Ergebnisse numerischer Simulationen der Änderung des Wellenfelds ist eine optimale Lösung des Hafendammes für den Schutz des Hafenaquatoriums vorgeschlagen. Die Analyse wurde mit dem numerischen Modell Artemis-Telemac durchgeführt.

Autori: **Vedran Petrov**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Mijo Vranješ**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split

1 Uvod

Projektiranje lukobrana je složena zadaća koja iziskuje poznavanje (i) parametara dolaznog vala (visina, period, smjer, direkcijska disperzija i dr.), (ii) promjenu valnog polja u akvatoriju luke uslijed deformacija i gubitka energije vala.

Dosadašnja praksa projektiranja lukobrana u Hrvatskoj je takva da se transformacija dolaznoga valnoga spektra u akvatoriju luke analizira uglavnom empirijskim inženjerskim metodama, npr. Horikawa [21, 22]. Navedene metode daju pouzdane rezultate za tipske oblike pomorskih građevina, na pravilnoj morfologiji morskog dna, za izolirane slučajeve (npr. samo za difrakciju). Međutim, njima nisu obuhvaćeni složeni oblici građevina i morfologije dna, a pogotovo istodobni učinci različitih valnih transformacija (difrakcija, refrakcija, refleksija, itd.), pa stoga primjena u realnim uvjetima često nije primjerena. Modelskim ispitivanjem, fizikalnim ili numeričkim, moguće je obuhvatiti sve dominantne efekte te tako dobiti vjerniju sliku stvarnog stanja. U ovom je radu prikazan postupak numeričke analize valnog polja na primjeru luke Makarska, kao osnove pri izradi projekta lukobrana.

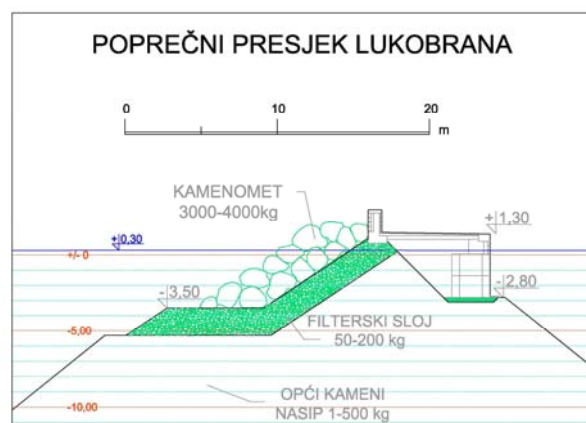


Slika 1 Postojeće stanje luke Makarska

Luka Makarska smještena je u prirodno zaštićenoj uvali (slika 1.), zatvorenoj s jugoistoka rtom Osejava, a sa sjeverozapada poluotokom Sv. Petar. Uvala je oduvijek bila prirodna luka uz koju se kroz povijest razvijalo naselje odnosno današnji grad Makarska. Izgradnja lukobrana vrlo je osjetljiva zadaća s aspekta ostvarivanja zadovoljavajućih maritimnih uvjeta u akvatoriju luke, te istodobno prihvatljivog rješenja s aspekta krajobraznog uređenja. Ukupna ploština akvatorija luke iznosi oko 106.000 m². U zapadnom dijelu akvatorija smještena je sportska luka kojom se koristi lokalno stanovništvo za

privez malih brodica. Središnji dio, između dvaju gatova, služi za putnički i trajektni promet. Istočni je dio luke gotovo neiskorišten jer je nezaštićen od valova iz smjerova sektora III (od valova iz smjera S do valova iz smjera W). Planiranim lukobranom pružit će se zaklon plovilima prvenstveno u istočnom dijelu luke, a time i znatno povećati postojeći kapacitet.

Lukobran je predviđen kao klasičan nasuti lukobran obložen kamenom („školjera“) s vanjske strane i s vertikalnom obalnom konstrukcijom s unutrašnje strane lukobrana (slika 2.). Varijantna su rješenja preuzeta iz idejnog rješenja lukobrana [2].



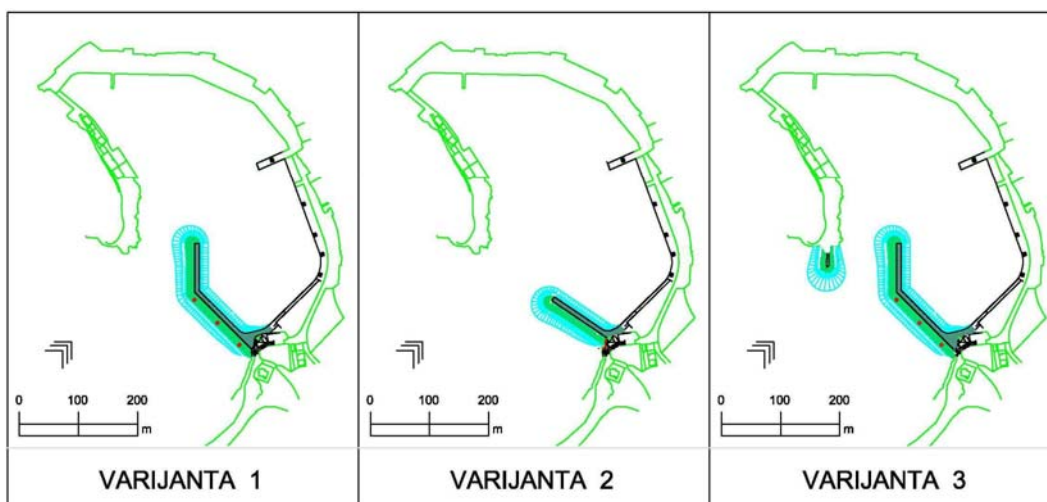
Slika 2. Poprečni presjek lukobrana u tijelu lukobrana na 60 m od hvatišta [2]

U radu su analizirane tri varijante (slika 3.).

U varijanti 1. (slika 3.a) lukobran je postavljen s istočne obale luke Makarska u duljini od 135 + 82 metra uz lom osi. U varijanti 2. (slika 3.b) lukobran je smješten na isto mjesto samo je kraći i iznosi 111 m bez loma osi. Varijanta 3. (slika 3.c) ima lukobran isti kao i u varijanti 1. te još jedan dodatni manji lukobran postavljen na zapadnu obalu ulaza u luku u duljini od 20 m. Da bi se poboljšala izmjena mora između štice dijela luke i otvorenog mora, u korijenu lukobrana (pri obali) predviđeni su otvori odgovarajuće ploštine koji su smješteni na odgovarajućoj dubini da energija valova ne bi prolazila u luku.

Modelom je analiziran samo utjecaj valova nastalih od puhanja vjetrova. Ostali su generatori valnog polja zanemareni. Razlog tomu jest što su vjetrovi valovi zastupljeni oko 60 % vremena i imaju najveću specifičnu energiju, odnosno za promatrani slučaj imaju dominantan utjecaj. Razmatrani su valovi nastali zbog puhanja vjetrova pulenat (W), lebić (SW), oštro (S) i jugo (SSE). Na osnovi analize predloženo je najpovoljnije rješenje lukobrana s aspekta zaštite akvatorija luke od valova.

Izgled i dimenzije, ali i funkcionalnost planiranog lukobrana s aspekta maritimnih uvjeta u luci moguće je rela



Slika 3. Varijantna rješenja lukobrana

ativno jeftino i brzo analizirati primjenom numeričkih modela. U nastavku (točka 2.) dani su teorijske osnove prihvaćenoga modela, zatim opis ulaznih podataka u točki 3., te potom rezultati numeričkih simulacija (točka 3.) i zaključak (točka 4.) analize valnog polja luke Makarska za postojeće stanje i tri varijantna rješenja planiranog zahvata.

2 Postavke modela

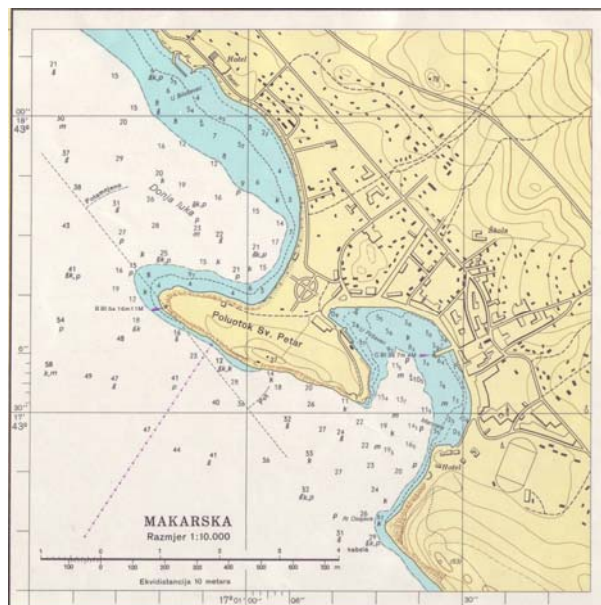
2.1 Teorijske osnove modela

Primijenjen je modul ARTEMIS [3, 4, 5], namijenjen ponajprije analiziranju deformacija valova u lukama ili malim zaljevima, a sastavni je dio TELEMAC [6] programskog paketa za rješavanje svih vrsta hidrodinamičkih zadataka. Telemac-Artemis je priznati svjetski model provjeren na velikom broju primjera [5]. Artemis rješava jednadžbu eliptičnog (knoidalnog) vala na blago nagnutom dnu (engl. *elliptic mild slope equation*) koristeći se tehnikom konačnih elemenata prema izrazu Berkhoffa [7]. Jednadžba je izvedena iz osnovnih Navier-Stokes jednadžbi [8] uzimajući u obzir nekoliko hipoteza od kojih su dvije najznačajnije: valovi su male strmine i dno je blagog nagiba. Dodajući izraze za disipaciju energije, osnovna jednadžba blagog nagiba prilagođena je za plitkovodno područje. Glavni su izlazni parametri u svakom čvoru numeričke mreže: valna visina, faza i smjer vala. Modelom su tretirane sljedeće fizikalne pojave: refleksija, difrakcija, refrakcija, direkcijska disperzija, trenje s dnom, slom vala, priobalne valne struje (engl. *wave-driven currents*). Valna se analiza temelji na spektralnom prikazu nadolazećeg vala, tj. razina vodnog lica u određenoj točki proračuna se kao superpozicija konačnog broja monokromatskih valnih komponenta, gdje se pritom svaki od tih valova kreće svojom pripadnom brzinom koja je funkcija perioda, dubine i smjera.

Incidentni val zadan je usmjerenim valnim spektrom, gdje neusmjerena spektralna gustoća promjene razine mora ovisi o frekvenciji, dok je njezina usmjerena raspodjela u ovisnosti o smjeru otklona od glavnog pravca rasprostiranja valova (Goda [1]). Osnovnoj jednadžbi za širenje vala dodani su izrazi Booija [9], Battjesa i dr. [10] i De Girolama i dr. [11] kojima su tretirani slom vala i trenje s dnom. Na taj su način obuhvaćeni glavni disipacijski efekti.

2.2 Prostorna domena numeričkog modela

Prostorna domena numeričkog modela izrađena je na temelju raspoloživih batimetrijskih podloga iz pomorske karte [12] (slika 4.) i detaljnoga geodetskog premjera akvatorija [13]. Domena modela referencirana je na hidrografsku nulu

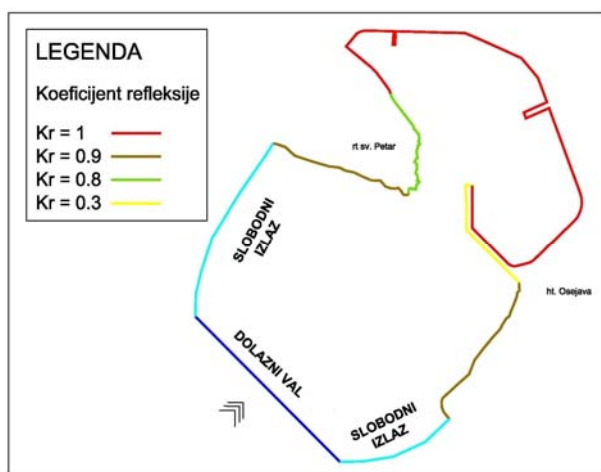


Slika 4. Batimetrijska podloga - pomorska karta (HHI)

Na temelju digitalizirane batimetrije, generirana je numerička mreža trokutastih konačnih elemenata. Prostorni inkrement u numeričkom modelu iznosi $\Delta x = 4$ m, zbog čega je u numeričkim čvorovima za koje nema izmjerenih vrijednosti dubina primijenjena linearna interpolacija. Relativno gusta mreža čvorova nužna je da bi se zadovoljavajuće opisala prostorno-vremenska distribucija valnih parametara.

2.3 Rubni uvjeti

Numerički opis stupnja refleksije od obalne crte i/ili lukobrana te disipacija energije vala u prostornoj domeni modela ostvareni su upotrebom upijajućih rubova modela (engl. *free exit type boundary*) i refleksijskih rubova modela (engl. *solid type boundary*) s empirijskim koeficijentima. Na osnovi uvida u postojeće stanje obalnih građevina i literaturnih podataka [1, 14, 15], odabrani su koeficijenti refleksije za segmente obalne linije (slika 5.). Za čvrstu granicu modela definirani su koeficijenti refleksije, dok je pomak u fazi vala zanemaren. Koeficijent refleksije iznosi od 1 do 0,3, što predstavlja čvrst nepropusni vertikalni zid i lukobran od velikih kamenih blokova složenih u blagom nagibu.



Slika 5. Domena i rubni uvjeti modela (var1-SW)

Upijajućim rubom modela onemogućuje se refleksija valova od „krutih“ granica numeričkog modela koje nisu prisutne u stvarnosti, odnosno širenje valne energije izvan područja primarnog interesa. Granica modela tipa „slobodni izlaz“ omogućuje da valna energija izlazi iz područja modela bez refleksije, dok je na granici tipa „dolazni val“ zadan rubni uvjet odnosno dolazni valni spektar, s tim da valna energija iz modela slobodno može izaći (radijacijski rubni uvjet). Za svaku se varijantu radio odgovarajući skup refleksijskih svojstava obalne linije.

2.4 Opis incidentnog vala

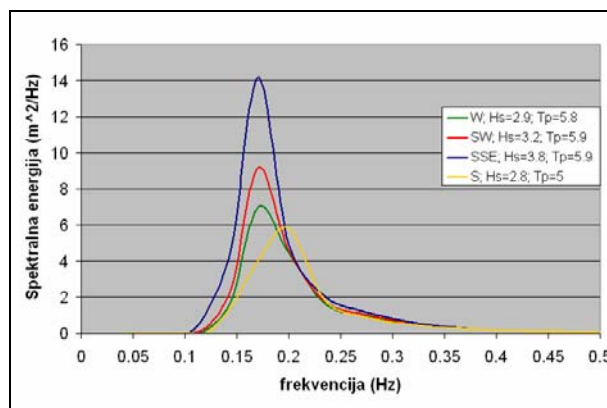
Dolazni val može se odrediti izravnim mjerenjem visine valova *in situ* ili analizom djelovanja vjetra na područje mora koje ima utjecaj na promatranu luku. Zbog nepo-

stojanja terenskih mjerenja valova, parametri valnog spektra dobiveni su analizom djelovanja vjetra na stvaranje valova, na temelju raspoloživih podataka o vjetru (trajanje, brzina i smjer vjetra) s meteorološke postaje Makarska ($\varphi = 43^{\circ}17'N$, $\lambda = 17^{\circ}1'E$). Iz uzorka vjetra prognozirani su maksimalni satni srednjaci brzine vjetra za pojedine smjerove, s povratnim periodom od 100 godina. Za prognozirane brzine vjetra i pripadna privjetrišta, modelom za priobalna područja SWAN [23] dobiveni su parametri valnog spektra za povratno razdoblje od 100 godina, H_s^{100god} i T_p^{100god} , za pripadne smjerove djelovanja vjetra odnosno valova. Vrijednosti parametara valnog spektra za pojedine smjerove preuzete su iz studije o utjecaju na okoliš lukobrana Makarska [16].

Za potrebe definiranja otvorene granice modela odnosno dolaznog vala primijenjeni su dubokovodni valni spektri tipa JONSWAP [17] ($\gamma = 3,3$), povratnog perioda od 100 godina, sa statističkim obilježjima (T_p - vršni period i H_s - značajna visina vala) prema smjerovima puhanja vjetra:

- W $H_s = 2,9$ m, $T_p = 5,8$ s (pulenat)
- SW $H_s = 3,2$ m, $T_p = 5,9$ s (lebić)
- S $H_s = 2,8$ m, $T_p = 5,0$ s (oštro)
- SSE $H_s = 3,8$ m, $T_p = 5,9$ s (jugo)

S obzirom na ograničenost računalnih resursa, iskorišten je frekvencijski dio spektra od $f_{min} = 0,1$ Hz do $f_{max} = 0,33$ Hz odnosno valni spektar dobiven superpozicijom monokromatskih valnih komponenata s minimalnim periodom od $T_{min} = 3,0$ s do valova s maksimalnim periodom od $T_{max} = 10$ s.



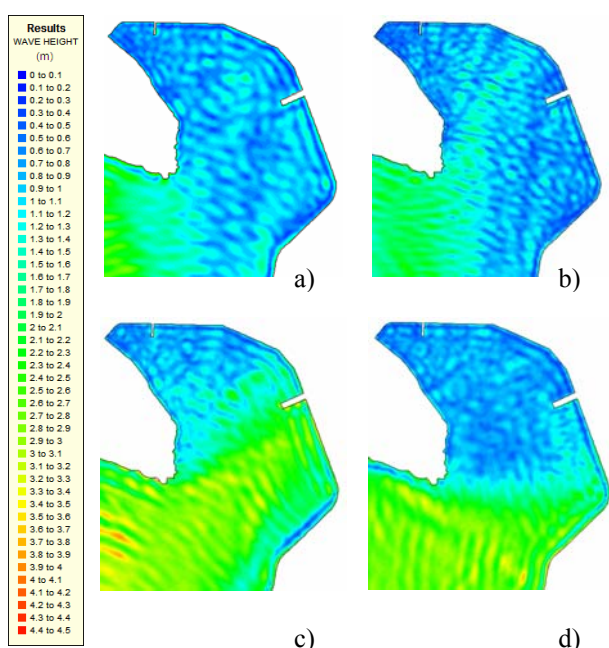
Slika 6. Prikaz distribucije energije analiziranih dubokovodnih incidentnih valnih spektara ispred luke Makarske za povratni period od 100 god. (JONSWAP spektar, $\gamma = 3,3$)

Na slici 6. prikazana je distribucija energije incidentnog vala s obzirom na frekvencijski raspon, iz čega se vidi kako zanemareni dio spektra ($f_{min} = 0,1$ Hz $< f > f_{max} = 0,33$ Hz) predstavlja minorni udjel u ukupnoj energiji dolaznog vala.

Zbog nepostojanja terenskih mjerenja preuzeti su podaci iz literature o direkcijskoj raspodjeli valnog spektra [18, 19, 20]. Naime oko 85 % energije vala širi se u relativno uskoj zoni ($\pm 30^\circ$) oko dominantnog smjera širenja vala. U modelu valni spektri imaju direkcijsku disperziju od 30° . Oblik direkcijske distribucije određen je parametrom s . U modelu je usvojena vrijednost $s_{\max} = 10$, što je karakteristično za vjetrove valove [1], [18].

3 Rezultati

Na osnovi navedenih postavki modela izvršene su numeričke simulacije postojećeg stanja (bez lukobrana) i opisanih varijanta lukobrana.

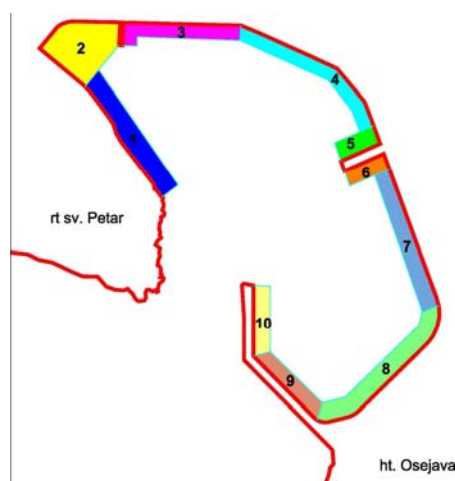


Slika 7. Prikaz značajnih valnih visina u akvatoriju luke Makarska – postojeće stanje: a) smjer SSE, b) smjer S, c) smjer SW, d) smjer W

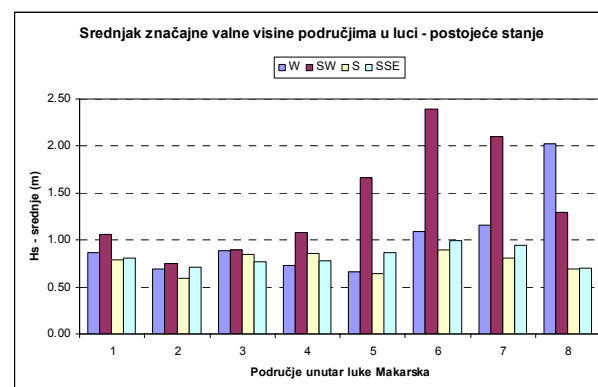
Prirodni položaj luke osigurava relativno dobru zaštitu od valova. Od valova koji dolaze s istoka luka je zaštićena rtom Osejava, dok je od zapadnih vjetrova zaštićena poluotokom sv. Petar. Sjeverni vjetrovi praktički nemaju utjecaja jer nemaju privjetrišta gdje bi se razvili valovi. Najveća opasnost prijeti od valova iz III. kvadranta (slika 7.), od kojih najveći utjecaj ima lebić odnosno val iz SW smjera (slika 7.c). Iako je jugo (SSE) (slika 7.a) najučestalije i ima znatno veću energiju od lebića, zbog ogiba oko rta Osejava ne prenosi većinu energije na akvatorij luke te ima manji utjecaj.

Kako bi se lakše odredio utjecaj pojedinih valova odabrana su karakteristična područja akvatorija luke (slika 8.) na kojima su proračunani srednjaci značajne visine vala. Značajna visina vala u luci pri postojećem stanju izgradnje kreće se u rasponu 0,6 m do 1,0 m u zapadnom dije-

lu, dok u istočnom dijelu iznosi između 0,6 m i 2,4 m (slika 9.). Najugroženije područje je oko „velikog mula“ (zona 6) koji je izložen izravnom udaru valova iz SW smjera. Postojeće stanje luke donekle osigurava dobru zaštitu plovila u svom sjeverozapadnom dijelu. Međutim, zatvaranjem uvale lukobranom na njezinu jugoistočnom dijelu znatno bi se smanjila visina valova u cijeloj luci, a pogotovo u istočnom dijelu akvatorija, gdje visina vala na pojedinim dijelovima premašuje 2 m za slučaj valova iz smjera W i SW (slika 9.). Na taj bi se način znatno povećao korisni kapacitet luke i osigurala veća sigurnost plovila na vezu.

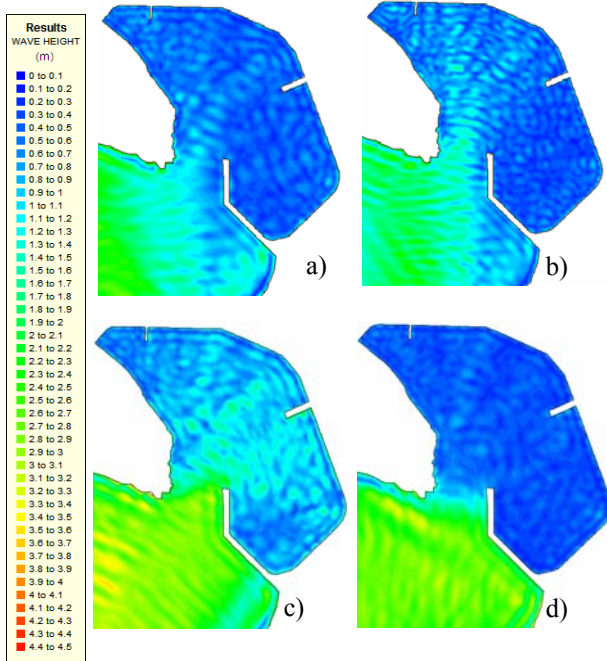


Slika 8. Karakteristična područja luke Makarska



Slika 9. Srednjak značajne valne visine po područjima u luci - postojeće stanje

Varijanta 1. lukobrana pokazuje kako bi se zatvaranjem luke znatno smanjila visina vala u luci (slika 10.). Smanjenje u odnosu na postojeće stanje je manje izraženo u zapadnom dijelu luke gdje iznosi oko 25 % odnosno oko 0,25 m, dok u istočnom dijelu - riva iza lukobrana, iznosi oko 55 % ili oko 1,15 m. Očekivano, valovi iz SW smjera (lebić) i u slučaju kad luku štiti lukobran i dalje najviše energije unose u akvatorij luke te su mjerodavni za odabir dispozicije lukobrana. Učinak varijantnih rješenja lukobrana analiziran je s obzirom na utjecaj SW valova (slike 11. i 12.).

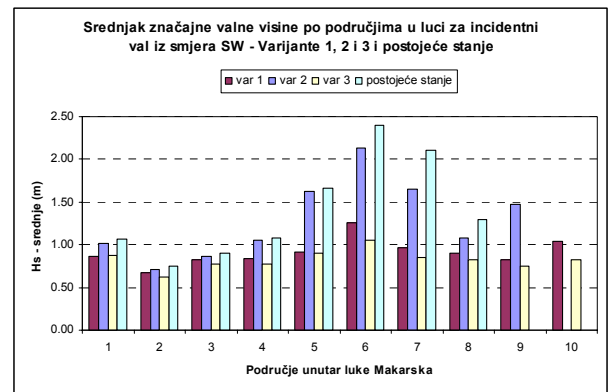


Slika 10. Prikaz značajnih valnih visina u akvatoriju luke Makarska - VARIJANTA 1: a) smjer SSE; b) smjer S; c) smjer SW; d) smjer W

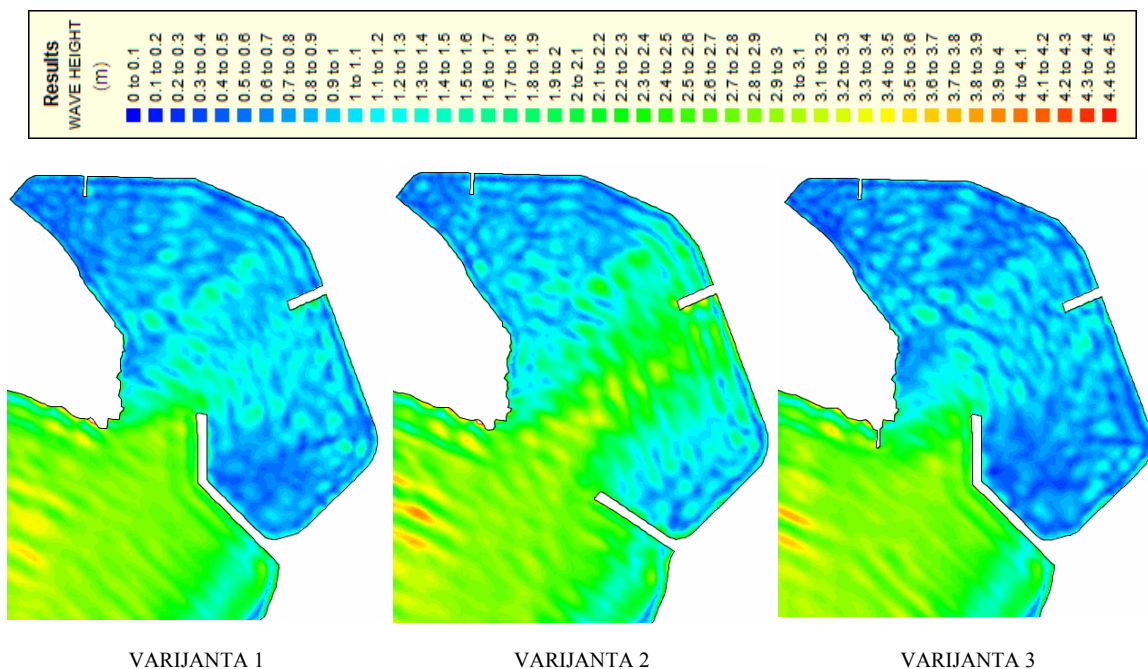
Varijanta 2. nastala je s težnjom da se što više otvori vizura s rive prema moru, odnosno što više smanje gabariti lukobrana. Manjim dimenzijama lukobrana umanjena je i njegova učinkovitost u obrani od valova (slika 11.b). Lukobran smanjuje visinu vala iz SW smjera maksimalno 25 % u odnosu prema postojećem stanju, tj. oko

45 cm u zoni 6 (slika 12.). U tom je slučaju još uvijek istočni dio luke previše otvoren i visina vala na pojedinim dijelovima premašuje 2 m. Široki ulaz u luku omogućuje izravne udare valova na predio oko „velikog mula“ (zona 6), koji se refleksijom o čvrste vertikalne stijenke rive šire na ostali dio luke.

Dodatni lukobran na poluotoku sv. Petar u varijanti 3. (slika 11.c) ima za cilj povećati učinkovitost zaštite luke, pogotovo za dominantni smjer SW (lebić). U odnosu na postojeće stanje, visina vala u luci je manja i do 60 % odnosno 1,35 m (slika 12.). Poboljšanje u odnosu prema varijanti 1. najuočljivije je u istočnom dijelu luke, i to: na dijelu oko „velikog mula“ (zona 6) gdje smanjuje visinu vala za dodatnih 0,21 m ili 20 % (slika 12.), te u sjeni lukobrana (zona 10) za 0,22 m ili 25 % u odnosu na varijantu 1. U zapadnom dijelu akvatorija luke varijante 1. i 3. ostvaruju gotovo isti učinak.

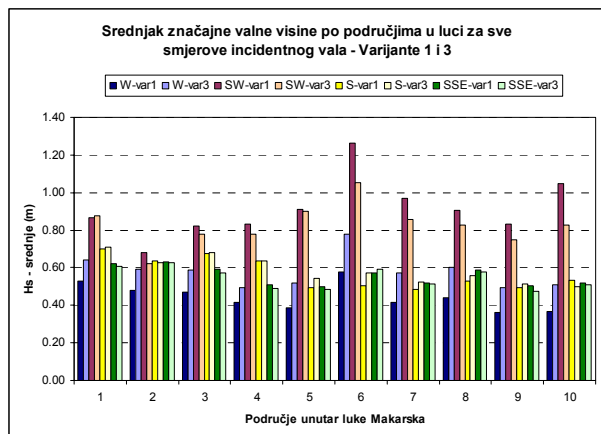


Slika 12. Srednjak značajne valne visine po područjima u luci - lebić



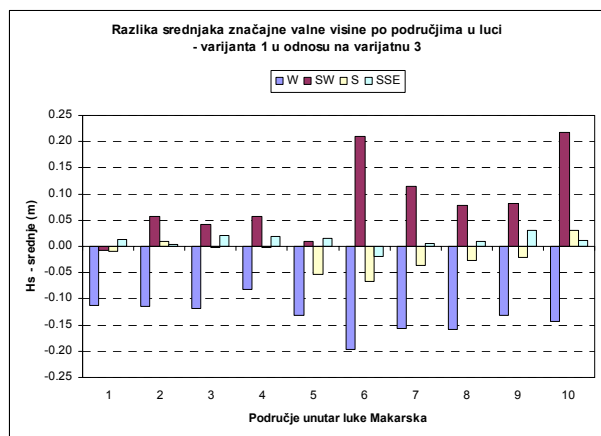
Slika 11. Prikaz značajnih valnih visina u akvatoriju luke Makarska po varijantama: smjer SW

Analizom učinkovitosti lukobrana na dominantni smjer valova SW - lebić, utvrđeno je kako varijanta 2. predstavlja znatno nepovoljnije rješenje s aspekta maritimnih uvjeta u luci od varijanata 1. i 3. koje pružaju puno bolju zaštitu. Dodatni lukobran na zapadnoj strani ulaza u luku (poluotok sv. Petar) u varijanti 3. povećava zaštitu luke od lebića u odnosu na varijantu 1. i to samo u istočnom dijelu luke (visina vala manja i do 0,2 m), dok u zapadnom dijelu ostvaruju isti učinak (slika 12.) te stoga varijanta 3. ima prednost pred varijantom 1.



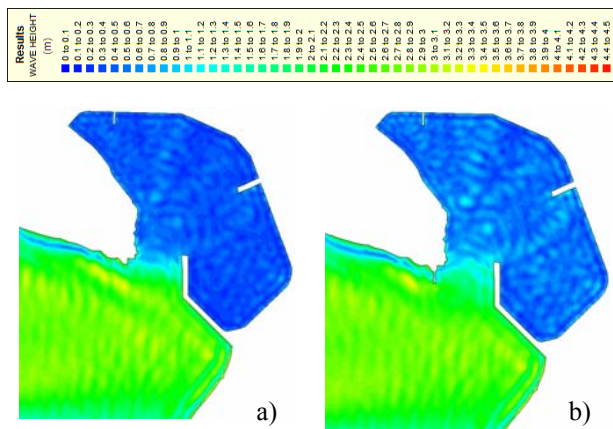
Slika 13. Srednjak značajne valne visine po područjima u luci - VARIJANTA 1. i 3.

Daljnjom analizom varijanti 1. i 3. može se vidjeti kako dodatni lukobran ima dvojak efekt, tj. dok za valove iz smjera SW i SSE smanjuje visinu vala u luci, za valove iz smjera S i W uzrokuje njihovo uvećanje (slika 13.). Bolje se to uočava na grafikonu (slika 14.) gdje je prikazana razlika valnih visina varijanti 1. i 3. (H_1-H_3). Promjene visine vala za smjerove S i SSE su zanemarljive i iznose +/-5 cm, odnosno do 20 % je razlika. Najizraženija promjena javlja se u slučaju djelovanja valova iz smjera W značajno povećana visina vala u cijeloj luci, za 10-20 cm odnosno 15-25 %, varijanta 3. u odnosu na varijantu 1. (slike 14. i 15.).



Slika 14. Razlika srednjaka značajne valne visine varijanti 1. i 3. (H_1-H_3) po područjima u luci za sve incidentne smjerove vala

ako valovi iz smjera W ne mogu izravno ući u luku, refleksijom od strme obale rta Osejava valovi dopijevaju direktno na ulaz u luku. U slučaju varijante 3. valovi još lakše ulaze jer dodatni lukobran djeluje kao ljevak i kanalizira reflektirane valove u akvatorij luke (slika 15.b).



Slika 15. Prikaz značajnih valnih visina u akvatoriju luke Makarska - (inc. val: smjer W): a) VARIJANTA 1; b) VARIJANTA 3.

4 Zaključak

Provedena je numerička analiza promjene valnog polja u luci Makarska za varijantna rješenja planiranog lukobrana. Analizirana je učinkovitost lukobrana pri djelovanju vjetrovih valova 100-godišnjeg povratnog perioda iz smjerova W-pulenat, SW-lebić, S-oštro, SSE-jugo.

Pri postojećem stanju značajna visina vala u luci iznosi 0,6 m do 1,0 m u zapadnom dijelu, dok u istočnom dijelu iznosi 0,6 m do 2,4 m, ovisno o smjeru incidentnog vala. Najveći utjecaj imaju valovi iz smjera SW, a najugroženije područje je oko „velikog mula“ (zona 6) koja je izložena izravnom udaru valova.

Varijantama lukobrana 1. i 3. ostvaruje se znatno poboljšanje u odnosu prema postojećem stanju. Za velike valove ($T = 100$ godina) visina vala u luci varira od 0,35 m do 0,65 m za smjer W, od 0,65 m do 1,25 m za smjer SW, od 0,5 m do 0,7 m za smjer S, od 0,45 m do 0,65 m za smjer SSE. Smanjenje značajne visine vala u luci iznosi od 0,25 m do 1,35 m, odnosno do 60 % od postojećeg stanja. Navedene varijante pružaju gotovo jednaku zaštitu od valova iz smjera S i SSE, dok za valove iz smjera W i SW imaju suprotan učinak. Dodatni lukobran u varijanti 3. (lukobran na strani rta sv. Petra) u odnosu na varijantu 1. smanjuje valnu visinu 5 cm do 20 cm u luci pri djelovanju lebića (SW) i povećava 10 cm do 20 cm pri djelovanju pulenta (W). Razlog je tome što dolazni val iz smjera W reflektira strma istočna obala izravno u smjeru ulaza u luku, a dodatni lukobran samo bolje kanalizira valnu energiju u akvatorij luke. S obzi-

rom da je utjecaj vala od lebića (SW) veći od svih ostalih koji djeluju na luku Makarska, varijanta 3. ima prednost, tj. opravdano je razmotriti izgradnju dodatnog lukobrana na strani rta sv. Petra odnosno kao alternativnu/dodatnu mjeru zaštite izvesti obalu središnjeg dijela luke (zone 3-7) u formi upijajućih komora za smanjenje refleksije.

Za razliku od tradicionalnih inženjerskih metoda utemeljenih na empirijskim izrazima (npr. Horikawa [21, 22]), modelskim (numeričkim i/ili fizikalnim) ispitivanjem mogu se najčešće obuhvatiti svi dominantni prirodni utjecaji i što je još važnije njihovi sinergijski učinci. Rezultat modeliranja približno je vjeran opis stvarnog stanja, što daje bolju osnovu pri izradi projekata pomorskih građevina.

LITERATURA

- [1] Goda, Y.: *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced series on ocean engineering, Vol. 15., New Jersey, 2000.
- [2] Nemico d.o.o.: *Idejni projekt „Glavni lukobran - Makarska“*, Split, 2007.
- [3] Artemis, User Manual, EDF, 1998.
- [4] Artemis, Theoretical Note, EDF, 1998.
- [5] Artemis, Validation note, EDF, 1998.
- [6] TELEMAC, User Manual, EDF, 2002.
- [7] Berkhoff J. C. W.: *Mathematical model for simple harmonic linear water waves. Wave refraction and diffraction*, Publication no.163, Delft Hydraulics Laboratory, the Netherlands, 1976.
- [8] Mei, C. C.: *Theory and applications of ocean surface waves*, Advanced series on ocean engineering, Vol. 23., New Jersey, 2005.
- [9] Booij, N.: *Gravity Waves on Water with Non-uniform Depth & Current*, Ph. D. thesis, Technical Univ. of Delft, the Netherlands, 1981.
- [10] Battjes, J. A., Janssen, J.P.F.M.: *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*, Proceeding of the 16th International Conference on Coastal Engineering, 1 (1978), 649-660
- [11] De Girolamo, P.; Kostense, J. K.; Dingemans, M. W.: *Inclusion of surf-breaking in a mild-slope model*, Computer Modelling in Ocean Engineering (1988) 221-229.
- [12] Hrvatski hidrografski institut: *Pomorska karta*, Split, 2007.
- [13] Nemico d.o.o.: *Batimetrijske podloge za lukobran Makarska*, Split, 2007.
- [14] US Army Corps of Engineers: *Coastal Engineering Manual - Part II*, 2008.
- [15] Lončar, G.; Andročec, V.; Petrov V.: *Analiza valnih deformacija na području luke Split*, Građevinar 61 (2009) 5, 445-453
- [16] Oikon d.d.: *Studija o utjecaju na okoliš „Izgradnja glavnog lukobrana u Makarskoj luci“*, Zagreb, 2008.
- [17] Hasselmann, K., et al.: *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*, Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, 1973.
- [18] Mitsuyasu H. et al.: *Observation of the directional spectrum of ocean surface waves using a cloverleaf buoy*, Journal of Physical Oceanography 5 (1975) 4, 3-41
- [19] Ewans, K. C.: *Observations of the directional spectrum of fetch-limited waves*, Journal of Physical Oceanography 28 (1998) 3, 495-512
- [20] Massel, S. R.: *Ocean Surface Waves: their physics and prediction*. Advanced series on ocean engineering, Vol. 11., New Jersey, 1996.
- [21] Horikawa, K.: *Coastal Engineering -- An introduction to Ocean Engineering*, University of Tokyo Press, 1978.
- [22] Horikawa, K.: *Nearshore Dynamics and Coastal Processes -- Theory, Measurement, and Predictive Models*, University of Tokyo Press, 1988
- [23] Ris, R. C.: *Spectral modelling of wind waves in coastal areas*, (Ph.D. Dissertation Delft University of Technology, Department of Civil Engineering), Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Report No. 97-4, Delft, The Netherlands. 1997.