

UDK 672.22:532.5+551.55

Primljeno 15. 10. 2009.

Usporedba modeliranih i mjerenih površinskih vjetrovih valova

Goran Lončar, Eva Ocvirk, Vladimir Andročec

Ključne riječi

površinski vjetrovi valovi, numeričko modeliranje, mjerenje, Jadran, regionalna domena, lokalna domena, korelacija

Key words

surface wind waves, numerical modelling, measurement, Adriatic, regional domain, local domain, correlation

Mots clés

vagues de vent de surface, modélisation numérique, mesure, Adriatique, domaine régional, domaine local, corrélation

Ключевые слова

поверхностные ветровые волны, цифровое моделирование, измерение, Адриатика, региональная область, локальная область, корреляция

Schlüsselworte

oberflächliche Windwellen, numerisches Modellieren, Messung, Adria, regionale Domäne, lokale Domäne, Korrelation

G. Lončar, E. Ocvirk, V. Andročec

Izvorni znanstveni rad

Usporedba modeliranih i mjerenih površinskih vjetrovih valova

Prikazana je usporedba rezultata mjerenja i numeričkog modeliranja površinskih vjetrovih valova na Jadranu. Model za valno generiranje uzima podatke o vjetru iz prognoze Aladin. Rabljene su dvije modelske prostorne domene: regionalna (Jadran) i lokalna (kanalski sustav jugoistočnog Jadrana). U lokalnoj domeni upotrijebljena je detaljnija prostorna diskretizacija. Stupanj korelacije izmjerenih i modeliranih vrijednosti primarno ovisi o pouzdanosti ulaznih podataka o vjetru.

G. Lončar, E. Ocvirk, V. Andročec

Original scientific paper

Comparison of modelled and measured surface wind waves

The comparison between measurement data and numerical modelling results for surface wind waves on the Adriatic is presented. The wave generation model receives wind data from the Aladin forecast. Two spatial model domains are used: regional (Adriatic) and local (south-eastern Adriatic channel system). A detailed spatial discretisation is used in the local domain. The degree of correlation between the measured and modelled values is primarily dependent on the reliability of input wind data.

G. Lončar, E. Ocvirk, V. Andročec

Ouvrage scientifique original

La comparaison entre les vagues de surface modélisées et mesurées

La comparaison entre les données de mesure et les résultats de modélisation numérique est présentée pour les vagues de vent de surface sur l'Adriatique. Le modèle de génération des vagues reçoit les données sur le vent à partir du système des prévisions d'Aladin. Deux domaines de modélisation d'espace ont été utilisés: régional (Adriatique) et local (système de canaux de l'Adriatique sud-est). Une discrétisation spatiale détaillée est utilisée dans le domaine local. Le degré de corrélation entre les valeurs mesurées et les valeurs modélisées dépend essentiellement de la fiabilité des données d'entrée sur le vent.

Г. Лончар, Е. Оцвирк, В. Андрочец

Оригинальная научная работа

Сравнение моделированных и измеренных поверхностных ветровых волн

Описывается сравнение результатов измерений и цифрового моделирования поверхностных ветровых волн на Адриатике. Для модели генерирования волн использовались данные о ветре из прогноза Аладин. Используются модели для двух пространственных областей: региональной (Адриатика) и локальной (система каналов юго-восточной Адриатики). В локальной области применена детальная пространственная дискретизация. Степень корреляции измеренных и моделированных величин преимущественно зависит от надежности входных данных о ветре.

G. Lončar, E. Ocvirk, V. Andročec

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Vergleich der modellierten und gemessenen oberflächlichen Windwellen

Dargestellt ist ein Vergleich der Messungsergebnisse und des numerischen Modellierens von oberflächlichen vom Wind verursachten Wellen an der Adria. Das Modell nimmt für das Wellengenerieren Angaben über den Wind aus der Prognose Aladin. Benützt waren zwei modellräumliche Domänen: die regionale (Adria) und die lokale (Kanalsystem der südöstlichen Adria). In der lokalen Domäne benützte man eine detailliertere Diskretisation. Die Korrelationsstufe der gemessenen und modellierten Werte ist von der Glaubwürdigkeit der Eingangsdaten über den Wind abhängig.

Autori: Doc. dr. sc. **Goran Lončar**, dipl. ing. građ.; mr. sc. **Eva Ocvirk**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Vladimir Andročec**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za Hidrotehniku, Zagreb

1 Uvod

Važan element u provedbi proračuna stabilnosti hidrotehničkih konstrukcija, poput platformi na otvorenom moru ili valobrana u priobalju, jest analiza dinamičkog opterećenja izazvanog valovima. Zbog toga je vrlo važno omogućiti praćenje vjetrovalne klime na području planiranih građevinskih hidrotehničkih aktivnosti sa što većom prostornom i vremenskom rezolucijom. Mjerenje valova valografima vremenski je i financijski zahtjevno, a dobivene informacije mjerodavne su za sam lokalitet provedenog promatranja (monitoringa). U novije se vrijeme valografska mjerenja obavljaju u svrhu baždarenja numeričkih modela s kojima se omogućava prostorna interpolacija rezultata na proizvoljno detaljnim prostornim i vremenskim mjerilima.

Za aktiviranje operativnoga prognostičkog modela valne dinamike potrebni su i podaci o polju vjetrovog djelovanja iznad analiziranog područja, također iz operativnoga atmosferskog modela. U Državnom je hidrometeorološkom zavodu Hrvatske trenutno operativno funkcionalan atmosferski model ALADIN u hidrostatskoj verziji osnovanoj na primitivnim jednadžbama s numeričkom implementacijom razvijenom u kooperaciji s nekoliko nacionalnih meteoroloških institucija. Model proizlazi iz globalnog ARPEGE (*Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle*) modela od Meteo-France [1], s kojim izmjenjuje i podatke o većini fizikalnih relevantnih parametara potrebnih za definiranje rubnih uvjeta [2]. Model Aladin koristi se prostornom rezolucijom dostatnom za razlučivanje intenzivnih izmjena u smjerovima i intenzitetima prevladavajućih vjetrova na području Jadrana [3, 4]. Upravo je izlazni skup podataka o brzinama i smjerovima vjetra iz modela Aladin uporabljen za numeričko spektralno modeliranje valne klime na području Jadrana u periodu 1. 4. 2008. - 1. 7. 2008.

Za potrebe verifikacije numeričkog modela valne dinamike iskorišteni su podaci o mjerjenjima valova koja je u okviru provedbe Programa praćenja Jadranskog mora [5] proveo Hidrografski institut u Splitu. Mjerenja su provedena u razdoblju od studenog 2007. do veljače 2009. u dvjema valografskim postajama. Postaja V1 ($\varphi = 44^{\circ} 44,5' N$ i $\lambda = 13^{\circ} 10,2' E$) smještena je u području otvorenog mora sjevernog Jadrana, a druga postaja V2 ($\varphi = 43^{\circ} 29,3' E$ i $\lambda = 16^{\circ} 27,9' N$) ispred grada Splita (slika 1.).

Registracija na postaji V1 interesantna je zbog relativno dugačkih privjetrišta za vjetrove iz smjerova SE-jugo (700 km), NE-bura (50 km) i SW-lebić (100 km). S druge strane, istočna obala srednjeg i južnog Jadrana sadrži velik broj otoka s razvijenim kanalskim sustavom. U takvim područjima privjetrišta su relativno kratka i predstavljaju limitirajući faktor u razvoju valova, pa trajanje vjetra ne predstavlja ograničavajući faktor u prijenosu energije s vjetra na valove. Zbog toga je za verifikaciju rezultata modela u uvjetima izraženije ograničenog privjetrišta i odabrana pozicija valografske postaje V2, smještene u Bračkom kanalu.

Modeliranje valova prikazano u ovom radu provedeno je dvojako. Prvenstveno je analizirana cjelokupna regionalna prostorna domena kojom je obuhvaćeno područje cijelog Jadrana. Rezultati mjerenja značajnih H_s i maksimalnih H_{maks} valnih visina te vršnih valnih perioda T_p uspoređeni su s rezultatima provedenih modelskih analiza. Nakon toga analiziran je utjecaj povećanja rezolucije u batimetrijskim podlogama i u prostornoj diskretizaciji modelske domene na točnost rezultata modeliranja. Za to je rabljena lokalna modelska prostorna domena kojom je obuhvaćeno samo područje Splitskog i Bračkog kanala.

Proces generiranja valova od njihove inicijalizacije do razvijenog stanja prijenosa energije s vjetra na valove



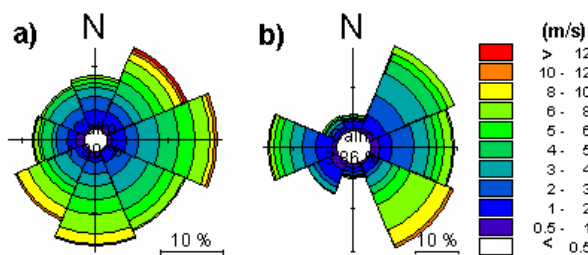
Slika 1. Pozicije valografskih postaja V1 i V2 za baždarenje numeričkog modela

do sada nije potpuno razriješen. Doprinos u općoj teoriji generiranja valova dali su Lamb [6], Phillips [7] i Miles [8], a u numeričkoj implementaciji teorijskih osnova Donelan [9], Cavaleri i Malanotte-Rizzoli [10] te Janssen [11, 12, 13, 14] i Johnson [15, 16]. Pioniri istraživanja o značajnim valnim visinama u području ograničenih privjetrišta dali su Sverdrup i Munk [17] te Bretschneider [18]. U novije vrijeme vrlo značajan doprinos istraživanju dali su između ostalih Kahma i Calkoen [19].

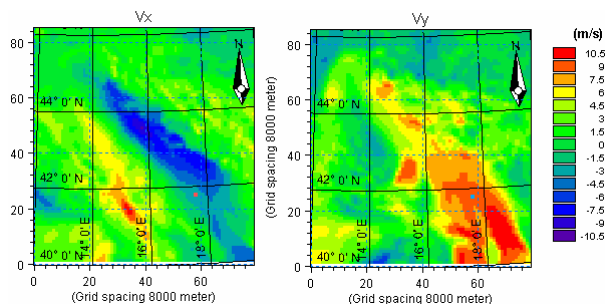
2 Podaci o vjetru i valovima

Za potrebe numeričke analize valnog generiranja na cjelokupnom istraživanom području iskoristeni su izlazni podaci o brzinama i smjerovima vjeta na 10 m od površine (iznad kopna ili mora) iz prognostičkoga atmosferskoga numeričkoga modela Aladin. Hrvatska verzija operativnog modela Aladin provodi se na prostornoj domeni koja pokriva područje Hrvatske s horizontalnom rezolucijom od 8 km i vremenskom rezolucijom od 3 sata [4, 20].

Ruže vjetrova za razdoblje provedenih analiza dobivene na temelju rezultata iz modela Aladin na pozicijama koje odgovaraju položaju valografa V1 i V2 prikazane su na slici 2.

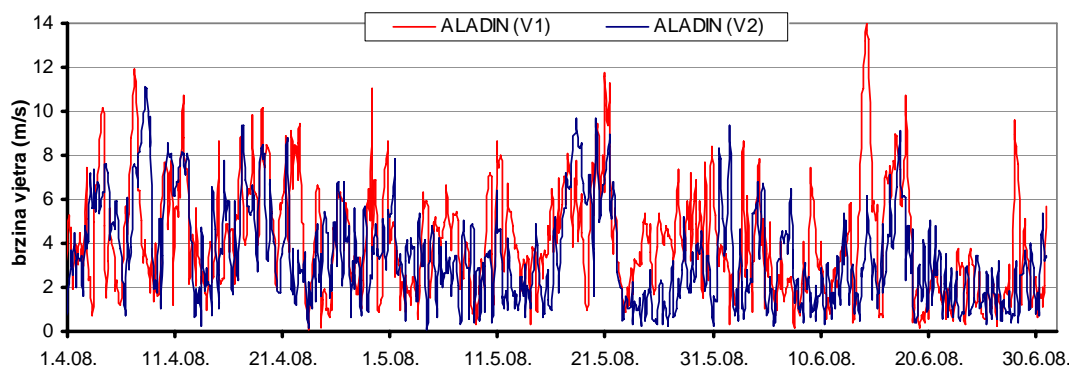


Slika 2. Ruže vjetrova za razdoblje provedenih analiza na temelju rezultata iz modela Aladin na pozicijama valografa V1 i V2

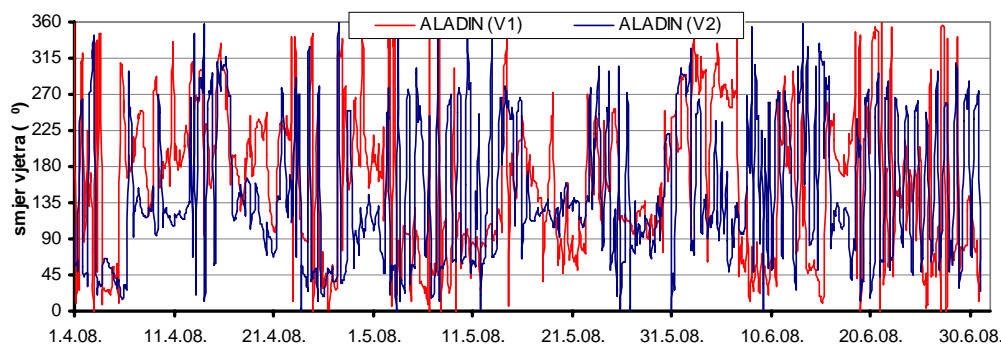


Slika 3. Polja komponenta brzine vjetrova na 10 m iznad površine dobivena atmosferskim modelom ALADIN za termin 8. 4. 2008. 9:00

Prosječna se vjetrova klima u promatranom razdoblju može rezimirati na sljedeći način: ruža vjetrova u točki V1



Slika 4. Vremenski niz podataka o brzini vjetrova dobiven na temelju rezultata iz modela Aladin na položaju valografa V1 i V2 tijekom provedenih analiza (na 10 m iznad površine mora)



Slika 5. Vremenski niz podataka o smjeru vjetrova dobiven na temelju rezultata iz modela Aladin na položaju valografa V1 i V2 tijekom provedenih analiza (na 10 m iznad površine mora)

pokazuje da je dominantan vjetar iz smjera E (20 %), iz smjera S (18 %) i smjera NE (16 %). Zamjetna je i čestina vjetrova iz smjera SW (12 %) i SE (15 %). Najmanje su zastupljeni smjerovi od W-N. Jaki vjetar brzine ≥ 12 m/s javlja se samo iz smjera bure s čestinom manjom od 1,0 %. Nadalje, vjetar brzine ≥ 10 m/s javlja se još i iz smjerova E i SW. Ruža vjetra u točki V2 pokazuje da je dominantan vjetrovir iz smjera SE i NE (oba učestalosti oko 20 %), s čestinom od 18 % javlja se vjetar iz smjera E. Najmanje su zastupljeni smjerovi S, NW-N i SW. Vjetar brzine ≥ 10 m/s javlja se samo iz smjera SE. Tišina ima prema anemografskom zapisu u točki V1 1,8 %, a u točki V2 3,86 %

Za ilustraciju je na slici 3. dan primjer rezultatnih polja komponenata brzine vjetra na 10 m od površine iz atmosferskog modela ALADIN u terminu 1. 5. 2008. 0:00.

Na slikama 4. i 5. prikazane su vremenske promjene tijekom vremena u izmjeni brzina i smjerova vjetra.

Za mjerenje valova na valografskim postajama V1 i V2 upotrijebljen je valograf tvrtke Datawell, koji se sastoji od plutače (tipa MKIII) s ugrađenim GPS prijemnikom i digitalnim uređajem za registriranje podataka. Prijenos podataka s mjerne plutače do registratora obavlja se upotrebom radio i GSM komunikacije. Valograf kontinuirano mjeri valove do visine 20 m i u rasponu razdoblja od 2 do 30 s. Valografski bilježeni podaci sadržavaju standardne valne statistike za razdoblja od 30 minuta. S obzirom na tehničke neprilike koje su se pojavile u radu valografa V2, snimka vršnih spektralnih razdoblja T_p nije upotrebljiva te nije ni uključena u nastavku prikazanim rezultatima.

3 Numerički model

Numerička analiza dinamike značajnih valnih visina provedena je spektralnim numeričkim modelom MIKE 21/SW (www.dhigroup.com) koji je minimalno modificiran radi prilagodbe za primjenu na Jadranu. Numeričkim modelom valne dinamike omogućena je analiza generiranja, deformiranja i zamiranja gravitacijskih vjetrovnih valova.

Osnovna jednadžba analiziranog procesa jest jednadžba očuvanja valnog djelovanja $N(X,t,\omega,\theta) = E(X,t,\omega,\theta)/\omega$, definiranog omjerom gustoće energije valnog spektra E i kutne frekvencije ω :

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (VN) = \frac{(I+P)}{\omega} \quad (1)$$

gdje je: t vrijeme, $X(x,y)$ kartezijeve koordinate, $V = (c_x, c_y, c_\omega, c_\theta)$ brzina valne grupe u 4-dimenzijskoj (X,ω,θ) domeni, I,P članovi izvora i ponora, ∇ diferencijalni operator u 4-dimenzijskoj (X,ω,θ) domeni, θ smjer val-

nog napredovanja, ω kutna frekvencija izražena jednadžbom linearne valne disperzije $\omega = \sqrt{gh \tanh(kd)}$, $k = 2\pi/L$ valni broj, L duljina vala, d dubina vode.

Četiri karakteristične brzine c_x, c_y, c_ω i c_θ definirane su jednakostima $(c_x, c_y) = dX/dt$, $c_\omega = d\omega/dt$, $c_\theta = d\theta/dt$.

Član izvora I definiran je prema rezultatima istraživanja prikazanih u radovima Janssen [13, 14] u kojima je pokazano da intenzitet valnog generiranja ovisi o vremenu proteklom od inicijalizacije vala:

$$I(f,\theta) = \gamma E(f,\theta) \quad (2)$$

gdje je: $f = \omega/2\pi$ valna frekvencija, γ intenzitet valnog generiranja.

Intenzitet valnoga generiranja definiran je izrazom koji je predložio Janssen [14]:

$$\gamma = \omega \frac{\rho_Z}{\rho_V} \left(\frac{1,2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu \right) \left[\frac{u_*}{c} \cos(\theta - \theta_{VJ}) \right] \quad (3)$$

gdje je: ρ_Z, ρ_V gustoće zraka i vode, κ Karmanova konstanta (0,4), θ_{VJ} smjer vjetra, θ smjer vala, u_* brzinsko trenje od vjetra, $c = \omega/k$ fazna brzina vala, μ bezdimenzijska kritična visina vala definirana izrazom $\mu = \kappa z_0 \exp(\kappa/m)$, z_0 hrapavost morske površine inducirana djelovanjem vjetra.

Parametar z_0 definiran je odnosom:

$$z_0 = \frac{z_{CHARNOCK} u_*^2}{g} \left(1 - \frac{\tau_V}{\rho_Z u_*^2} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

gdje je: τ_V naprezanje na morskoj površini inducirano djelovanjem vjetra, $z_{CHARNOCK}$ modelska konstanta (0,01 [14]).

Članom ponora P obuhvaća se disipacijski proces izazvan površinskim lomovima valova (engl. *whitcapping*) koji je u modelu inkorporiran prema radu Komen [21]. Formulacija člana P izražena je sljedećom jednadžbom:

$$P(f,\theta) = -C_{dis} \left(\frac{\alpha}{\alpha_{PM}} \right)^m \left[(1-\delta) \left(\frac{k}{\bar{k}} \right)^2 \right] \bar{\omega} E(f,\theta) \quad (5)$$

gdje su: C_{dis} i δ baždarni koeficijenti, $m = 4$, α sveukupni nagib valnog polja, α_{PM} nagib valnog polja u Pierson-Moskowitz valnom spektru, $\bar{\omega}$ srednja kutna frekvencija, \bar{k} srednji valni broj.

Numerički model zasnovan je na diskretizaciji geografsko-prostorne i spektralne domene s konačnim volumenima. U prostornoj je domeni uporabljena nestrukturirana mreža načinjena od nepreklopajućih trokutastih

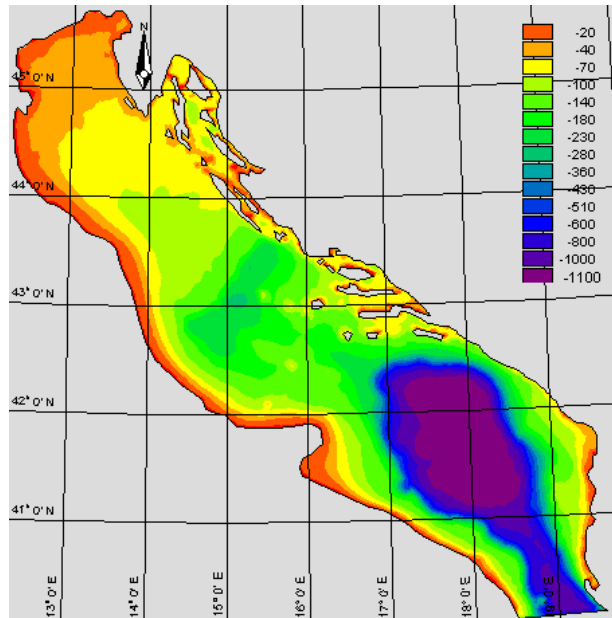
čelija, a u frekventnoj je domeni uporabljena logaritamska distribucija.

Za spektralnu diskretizaciju frekvencijske domene upotrijebljena je logaritamska ljestvica od minimalne frekvencije 0,08 Hz (valni period 12,5 s) do maksimalne frekvencije 0,95 Hz (valni period 1,05 s) u 26 diskretnih koraka. Spomenutim rasponom osigurava se obuhvat svih relevantnih spektralnih perioda koji se mogu očekivati u analiziranom području. Modelom su obuhvaćeni procesi valnog generiranja s vjetrom, međusobnih valnih nelinearnih interakcija, refrakcije i „šolinga“¹ te disipacijskog procesa pri površinskim lomovima valova. Primijenjeni su disipacijski koeficijenti s konstantnim vrijednostima 3,5 i 0,5 [16].

Vremenska se integracija provodi s frakcionalnim koracima, pri čemu je za propagaciju valnog djelovanja primijenjena multisekvencijska Eulerova eksplicitna metoda. Članovi izvora i ponora tretiraju se prema metodologiji definiranoj u radovima [21] i [22]. Konvektivni fluksevi proračunani su *upwind* numeričkom shemom prvog reda.

4 Prostorne domene, rubni i početni uvjeti

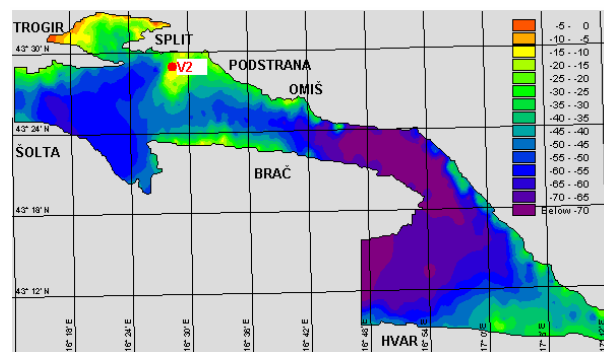
Na slici 6. prikazana je prostorna domena regionalnog modela kojom je obuhvaćeno područje cijelog Jadrana,



Slika 6. Prostorna domena regionalnoga numeričkog modela s batimetrijskom podlogom (primijenjena prostorna rezolucija batimetrijskih podataka je 60'')

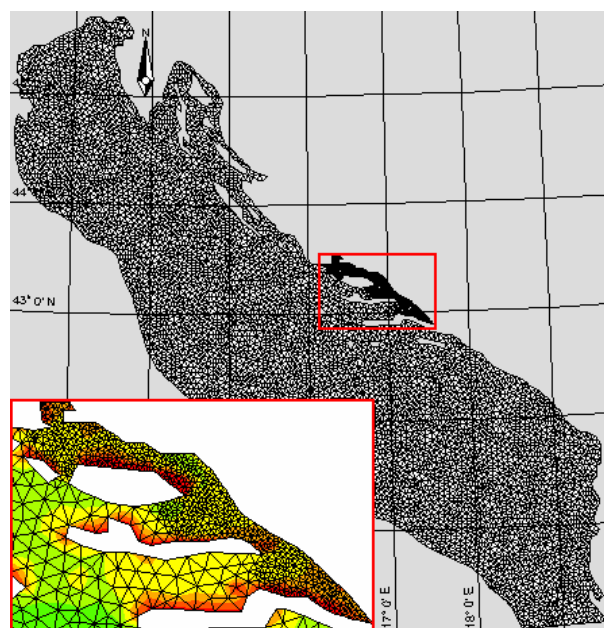
¹ „šoling“, od engl. *shoal* tj. pličak, pojava je koja nastaje kad valovi dolaze u područje manje dubine vode. Brzina i duljina vala se u plitkoj vodi smanjuju, a energija se povećava pa visina vala raste.

a na slici 7. prostorna domena lokalnog modela koja obuhvaća područje Splitskog i Bračkog kanala. Prikaz je dan s batimetrijskim podlogama zasnovanim na rasterskoj mreži podataka o dubinama s prostornim rezolucijama od 60'' (regionalna domena) i 7,5'' (lokalna domena).

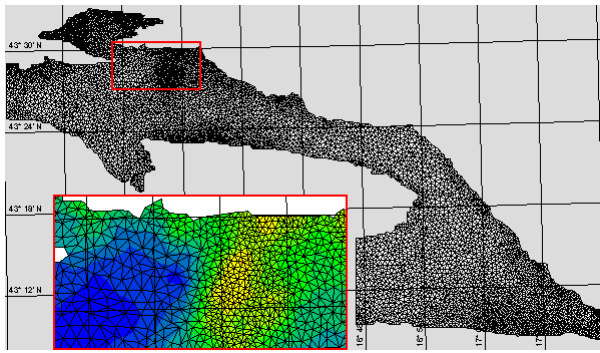


Slika 7. Prostorna domena lokalnog numeričkog modela s batimetrijskom podlogom (primijenjena prostorna rezolucija batimetrijskih podataka je 7,5'')

Na slikama 8. i 9. prikazana je modelska diskretizacija regionalne i lokalne prostorne domene s nestrukturiranom mrežom. Udaljenosti su između numeričkih čvorova postavljene u težištima konačnih volumena varijabilne. U slučaju regionalne domene nalaze se u rasponu od 750 m do 4800 m, a u slučaju lokalne domene od 50 m do 500 m. Obje modelske domene nemaju otvorenih granica, a sve su krute granice potpuno apsorpcijske (nema refleksije). Početni uvjeti u terminu 1. 4. 2008. 0:00 definirani su nultim valnim spektrom, odnosno odsustvom inicijalnoga valnoga gibanja na cijelom području prostornih domena.



Slika 8. Diskretizacija prostorne domene regionalnog modela s nestrukturiranom mrežom

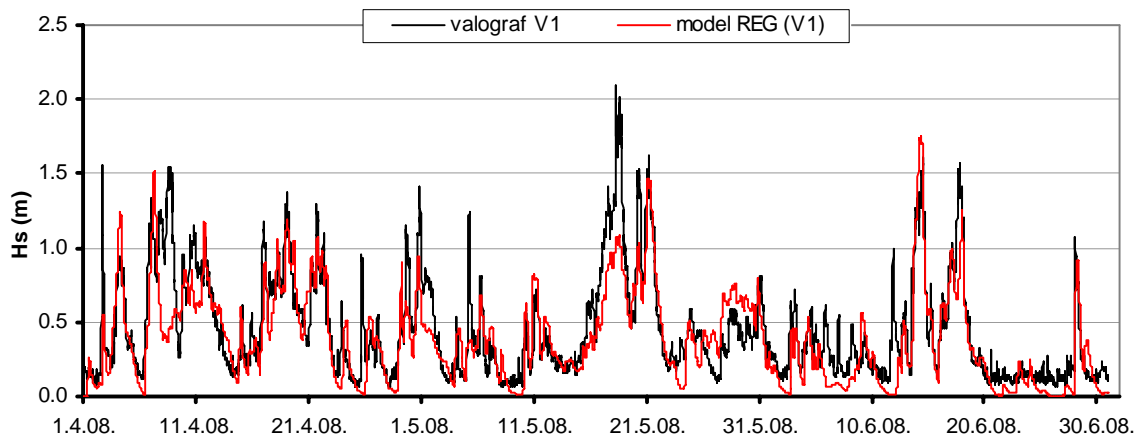


Slika 9. Diskretizacija prostorne domene lokalnog modela s nestrukturiranom mrežom

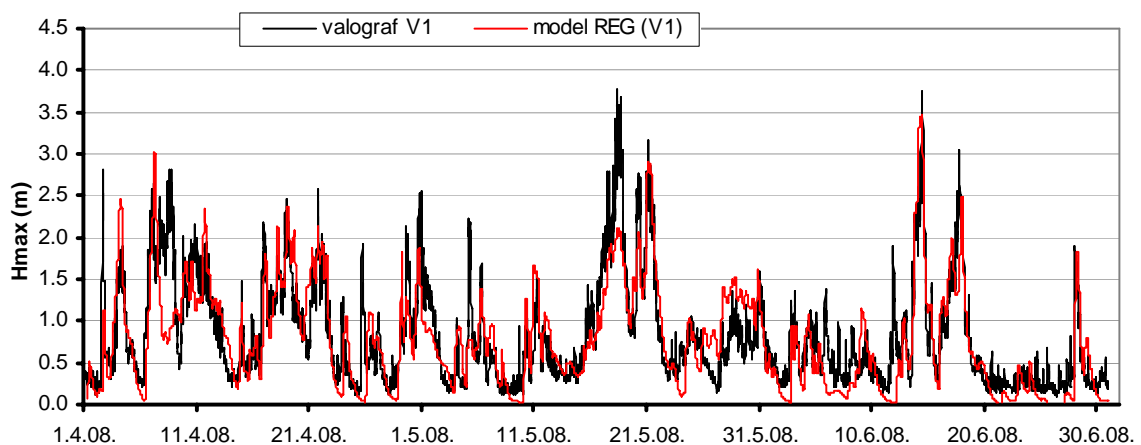
5 Rezultati provedenih analiza

Na slikama 10. i 11. prikazana je usporedba izmjerenog i modeliranog niza značajnih i maksimalnih valnih visina na poziciji valografa V1 tijekom analiziranog razdoblja.

Sa slika 10. i 11. može se uočiti da na poziciji valografa V1 model najbolje opisuje izmjerene vrijednosti za djelovanja bure (NE smjer vjeta - 21.5. i 14.6.), a nešto lošije za djelovanja lebića (SW smjer vjeta - 7.4., 19.4., 22.4., 29.4., 18.6.). U terminu djelovanja tramontane (N smjer vjeta - 4. 4. 2008.) modelske vrijednosti premašuju izmjerene. Interesantna je i situacija u terminima djelovanja juga (SE smjer vjeta - 11. 4. 2008., 17-18.5., 17.6.), posebice u razdoblju 17-18.5. kada modelske vrijednosti znatno podbacuju s obzirom na izmjerene. Razlog odstupanja modelskih vrijednosti od izmjerenih vrijednosti H_s i H_{maks} je vjerojatno loša prognoza intenziteta vjeta iz atmosferskog modela Aladin. Srednja vrijednost brzine vjeta dobivena modelom Aladin tijekom razdoblja 17.-18.5. na poziciji V1 iznosi 6,2 m/s. Ako se pretpostavi da je ta brzina konstantna na cijelom privjetrištu od 700 km, te ako se upotrijebi Groen-Dorrensteinov dijagram, dobiva se značajna valna visina $H_s = 1$ m, a što je vrlo blisko modelskoj vrijednosti. Na slici 12.

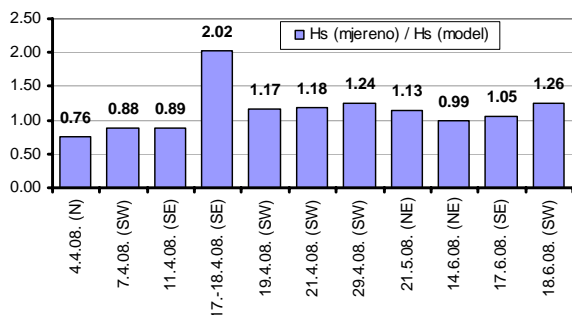


Slika 10. Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza značajnih valnih visina H_s na poziciji valografske postaje V1 (rezultati dobiveni regionalnim modelom)



Slika 11. Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza maksimalnih valnih visina H_{max} na poziciji valografske postaje V1 (rezultati dobiveni regionalnim modelom)

prikazani su omjeri izmjerenih i modeliranih H_s na poziciji valografa V1 u spomenutim terminima pri pojavi ekstreme valnih visina.



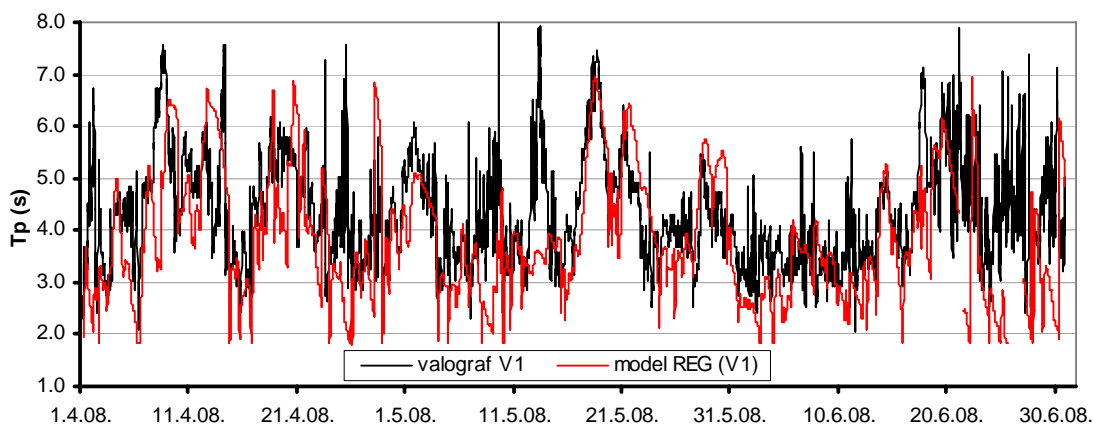
Slika 12. Omjeri izmjerenih i modeliranih značajnih valnih visina na poziciji valografa V1 u terminima u kojima se pojavljuju ekstreme valnih visina tijekom analiziranog razdoblja

Srednja vrijednost omjera maksimalnih i značajnih valnih visina H_{maks}/H_s tijekom analiziranog razdoblja na

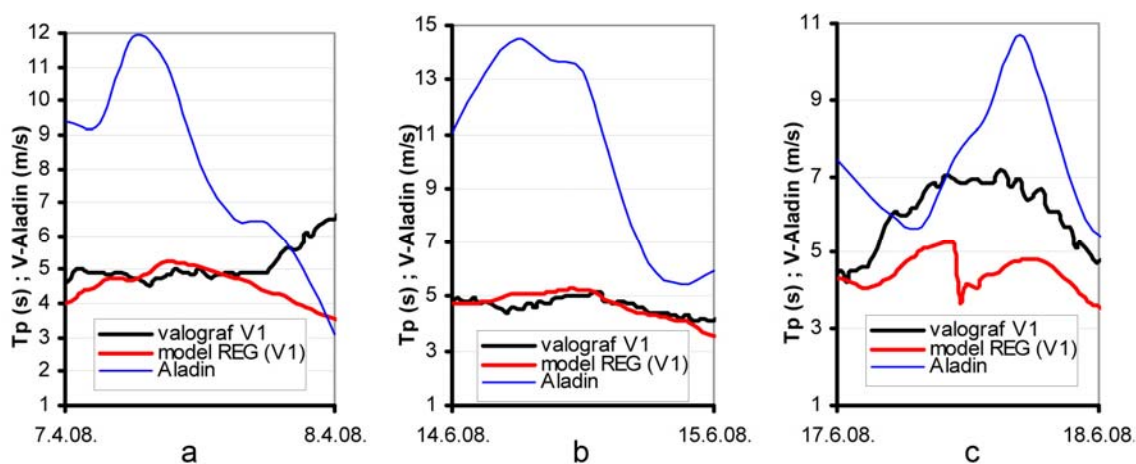
poziciji valografa V1 iznosi 1,84 na temelju mjerenja i 2,0 na temelju modeliranja. Obje vrijednosti pripadaju literaturno referenciranom rasponu $H_{maks}/H_s=1,6\div 2,0$ [22].

Na slici 13. prikazana je usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza vršnih spektralnih perioda T_p , također za poziciju valografa V1.

Prema rezultatima sa slike 13., izmjerene vrijednosti T_p prosječno su veće od modeliranih 19 %. Najizraženije relativne razlike pojavljuju se za vjetrovih tišina kada modelske vrijednosti značajnih valnih visina H_s i pripadnih perioda T_p poprimaju vrijednosti bliske nuli. Nadalje, omjeri spektralnih vršnih perioda T_p (stohastička veličina) i značajnih perioda $T_{1/3}$ (statistička veličina), u situacijama pojave ekstreme valnih visina pri djelovanju vjetrova iz različitih smjerova (7.4.-lebić; 17.-18.5.-jugo; 14.6.-bura), iznose 1,1 (7. 4. 2008.), 1,14 (17.-18. 5. 2008.) i 1,08 (14. 6. 2008.). Relativno visoka vrijednost $T_p/T_{1/3} = 1,14$ upućuju na činjenicu da pri djelovanju vjetra



Slika 13. Usporedba izmjerenog i modeliranog vremenskog niza vršnih spektralnih perioda T_p na poziciji valografske postaje V1 (rezultati dobiveni regionalnim modelom)

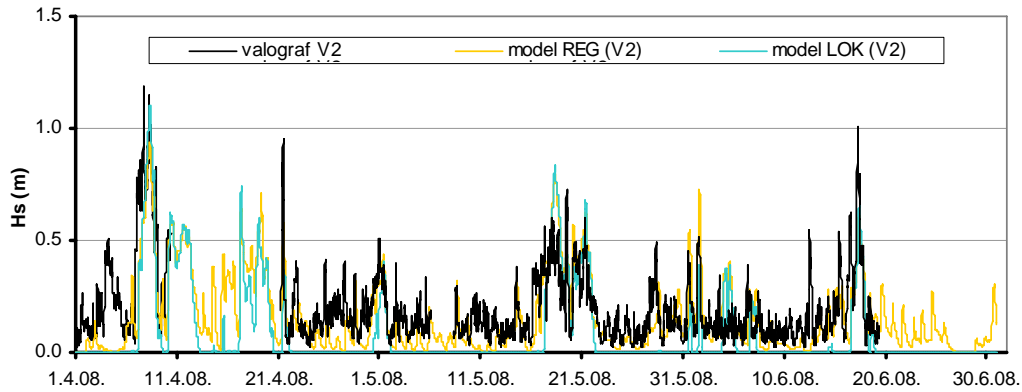


Slika 14. Razvoji vršnih perioda T_p na poziciji valografa V1 tijekom 24 sata u situacijama s djelovanjem lebića (a), bure (b) i tranzicije iz juga u lebić (c) te promjena intenziteta vjetra tijekom vremena dobivena modelom Aladin

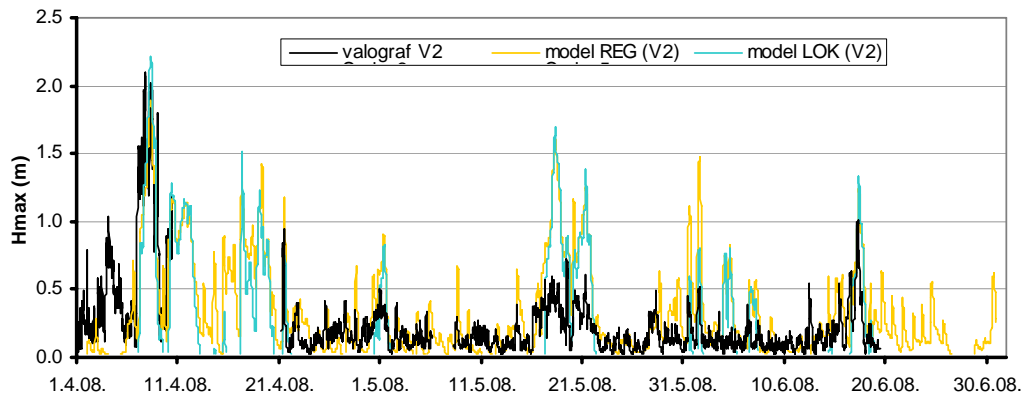
iz smjera SE (jugo) valografska postaja V1 ima karakteristiku točke u otvorenom moru a ne točke u području ograničenog privjetrišta. Djelovanje vjetrova u uvjetima ograničenih privjetrišta (SW≈100 km ; NE≈50 km) rezultira i smanjenjem omjera na vrijednosti $T_p/T_{1/3} = 1,1$ (SW-7.04.) i $T_p/T_{1/3} = 1,08$ (NW-14.06.). U situacijama izraženo ograničenog privjetrišta omjer $T_p/T_{1/3}$ literaturnim referencijama definiran je s vrijednosti 1,05 [22]. Iako na valografskoj postaji V2 nije ostvarena registra

cija T_p i $T_{1/3}$, pretpostavlja se da pripadna ograničena privjetrišta uzrokuju konvergenciju omjera $T_p/T_{1/3}$ k vrijednosti 1,05.

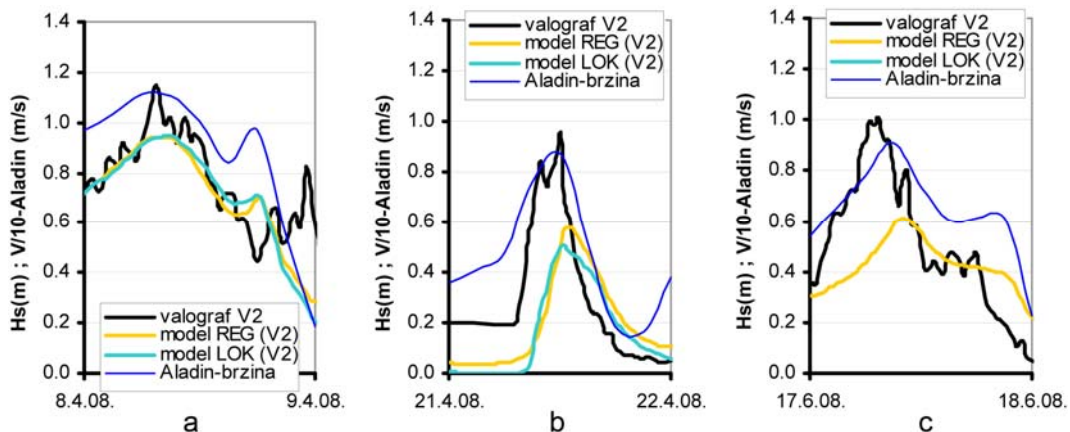
Na slici 14. prikazani su razvoji vršnih perioda T_p na poziciji valografa V1 tijekom jednog dana u situacijama s djelovanjem lebića (slika 14.a), bure (slika 14.b) i tranzicije iz juga u lebić (slika 14.c). Na dijagramima je ucrtana i promjena intenziteta vjetra tijekom vremena dobivena iz modela Aladin.



Slika 15. Usporedba izmjerene i modelirane promjene značajnih valnih visina H_s tijekom vremena na poziciji valografske postaje V2 (rezultati dobiveni regionalnim i lokalnim modelom)



Slika 16. Usporedba izmjerene i modelirane promjene maksimalnih valnih visina H_{max} tijekom vremena na poziciji valografske postaje V2 (rezultati dobiveni regionalnim i lokalnim modelom)



Slika 17. Izmjerene i modelirane (regionalni i lokalni model) značajne valne visine na poziciji valografa V2 u danima s registriranim ekstremima tijekom analiziranog razdoblja (prikazan je i dnevni razvoj brzina vjetra podijeljen sa 10)

Sa slike 14.a može se uočiti da padajući intenzitet vjetra uzrokuje smanjenje modelskih vrijednosti T_p . Međutim, na valografu V1 registrirano je postupno povećanje T_p , vjerojatno kao posljedica pojačanja intenziteta vjetra prisutnog u stvarnom-prirodnom procesu. Na slici 14.b uočava se dobra korelacija modelskih i izmjerenih T_p , očito kao posljedica dobre prognoze smjera i intenziteta vjetra dobivene modelom Aladin, a primijenjene na numeričkom modelu valnog generiranja. Slika 14.c ocrta situaciju u kojoj model Aladin daje relativno naglu promjenu u prevladavajućem smjeru vjetra iz smjera juga (SE) u smjer lebića (SW). Zbog skraćivanja pripadnog privjetrišta sa 700 km (SE privjetrište) na 100 km (SW privjetrište), numerički model valnog generiranja daje naglo smanjenje vršnog spektralnog perioda T_p sa 5,2 s na 3,7 s.

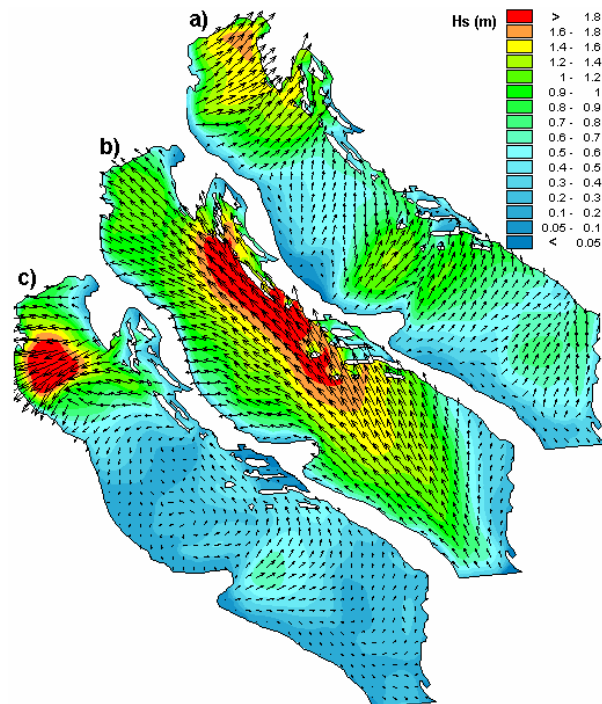
Na slici 15. prikazana je usporedba izmjerenih i modeliranih (regionalni i lokalni model) značajnih valnih visina H_s , a na slici 16. usporedba maksimalnih valnih visina H_{max} na poziciji valografa V2. Prema rezultatima prikazanim na slikama 15. i 16., zaključuje se da rezultati H_s i H_{maks} dobiveni lokalnim modelom bolje opisuju izmjerene ekstremne vrijednosti. Prema tome, relativno gledano lokalni model bolje pokriva potrebe projektiranja. S druge strane, u razdobljima djelovanja vjetrova s vrlo slabim intenzitetom, lokalni model ne uspijeva generirati valove malih valnih visina zbog pretpostavljenog spektra nulte snage na području rubnih uvjeta lokalnog modela.

Na slici 17. prikazan je razvoj H_s na poziciji valografa V2 u danima s registriranim ekstremima tijekom analiziranog razdoblja. U danima 8. 4. 2008. (slika 17.a) i 17. 6. 2008. (slika 17.c) prevladavajući modelski smjer vjetra (Aladin) bilo je jugo (ESE/SE), dok je 21. 4. 2008. (slika 17.b) smjer bio promjenljiv - od bure preko juga do lebića (NE→SE→SW). Na dijagramima je ucrtan i dnevni razvoj brzina vjetra podijeljen sa 10, radi grafičke prilagodbe.

Na slici 18. prikazana su polja značajnih valnih visina H_s dobivena regionalnim modelom u terminima postignutih ekstrema pri djelovanju lebića (slika 18.a - 7. 4. 2008. 8:30), juga (slika 18.b - 18. 5. 2008. 9:30) i bure (slika 18.c - 14. 6. 2008. 6:00) na poziciji valografa V1.

Sa slike 18. može se uočiti da pri prostornom relativno homogenom djelovanju juga važnu ulogu ima i nehomogenost polja brzine vjetra. Maksimalne valne visine pojavljuju se u području vanjske crte otoka srednjeg Jadrana (slika 18.b). S druge strane, zbog pada brzina vjetra, bez obzira na povećanje privjetrišta u smjeru pružanja osi jadranskog bazena, na području zapadne obale Istre pojavljuju se znatno manje valne visine. Za djelovanja lebića (slika 18.a) također se može uočiti

prostorno nehomogeno polje značajnih valnih visina kao posljedica prostorno nehomogene vjetrove uzbude, pri čemu je najsjeverniji dio Istre izložen najintenzivnijem



Slika 18. Modelsko polje značajnih valnih visina H_s (regionalni model) s vektorima valnog djelovanja u terminu postizanja ekstrema na poziciji valografa V1 (a - 7. 4. 2008. 8:30 ; b-18. 5. 2008. 9:30 ; c-14. 6. 2008. 6:00)

valnom djelovanju. Na slici 18.c uočava se i lokalni utjecaj bure koja je u prikazanom terminu bila ograničena na područje sjevernog Jadrana.

6 Zaključak

Numeričkim modelom valnog generiranja provedena je analiza promjene značajnih i maksimalnih valnih visina tijekom vremena te vršnih spektralnih razdoblja gravitacijskih vjetrovih valova na području Jadrana. Rezultati modelskih analiza uspoređivani su s rezultatima mjerenja na dvije valografske postaje tijekom razdoblja 1. 4. 2008. – 1. 7. 2008. Za generiranje valova na području modelskih prostornih domena korišteni su podaci o brzinama i smjerovima vjetra iz prognostičkoga atmosferskog modela Aladin. Numerička analiza valnog generiranja provedena je na dvije prostorne domene. Prva prostorna domena obuhvaća područje cijelog Jadrana i diskretizirana je grubljom nestrukturiranom mrežom konačnih volumena. Druga prostorna domena ima lokalni karakter te pokriva područje Bračkog i Splitskog kanala uz finije prostorne rezolucije.

Rezultati provedenog istraživanja pokazali su sljedeće:

- na poziciji valografa V1 model dobro opisuje promjenu značajnih i maksimalnih valnih visina tijekom vremena za djelovanja bure i lebića, dok u razdoblju djelovanja juga model daje premale vrijednosti u usporedbi s izmjerenim, zasigurno kao posljedica uporabe premalih brzina vjetra usvojenih iz modela Aladin;
- srednja vrijednost omjera maksimalnih i značajnih valnih visina u analiziranom razdoblju na poziciji valografa V1 iznosi 1,84 na temelju mjerenja i 2,0 na temelju modeliranja;
- izmjerene vrijednosti spektralnih vršnih razdoblja na poziciji valografa V1 prosječno su veće od modeliranih za 19 %, uz napomenu da se izraženije relativne razlike pojavljuju samo za vjetrenih tišina;
- omjeri spektralnih vršnih razdoblja i značajnih razdoblja u situacijama pojave ekstreme valnih visina pokazuju da pri djelovanju vjetra iz smjera SE (jugo) valografska postaja V1 nije pod utjecajem ograničenog privjetrišta;
- pouzdanost rezultata modelskih polja značajnih i maksimalnih valnih visina te razdoblja i smjerova valnog djelovanja u najvećoj mjeri ovisi o pouzdanosti podataka za polje brzine vjetra;
- izmjerene ekstremne značajne i maksimalne valne visine na poziciji valografa V2 bolje su aproksimirane lokalnim nego regionalnim modelom. S obzirom na potrebe projektiranja u području priobalja, preporučuje se primjena rezultata dobivenih modelima koji se koriste detaljnijom prostornom diskretizacijom analizirane domene.

Konačno može se zaključiti da je vremenski niz mjerenja valova nedovoljan za donošenje konkretnih zaključaka primjenljivih u projektiranju hidrotehničkih projekata. Potom, očito je da bi se najveće poboljšanje na modelu postiglo primjenom mjerenih, a ne prognoziranih podataka o vjetru.

LITERATURA

- [1] Courtier, P.C.; Freydier, J. F.; Geleyn, F.; Rochas, M.: *The ARPEGE project at METEO-FRANCE*, Proceedings from the ECMWF workshop on numerical methods in atmospheric models, 1991, 193-231.
- [2] Cordoneanu, E.; Geleyn, J. F.: *Application to local circulation above the Carpathian-Black Sea area of a NWP-type meso-scale model*, Contributions to Atmospheric Physics, 71 (1998), 191-212.
- [3] Brzović, N.: *Factors affecting the Adriatic cyclone and associated windstorms*, Contributions to Atmospheric Physics, 72 (1999), 51-65, 1999.
- [4] Brzović, N.; Strelec-Mahović, N.: *Cyclonic activity and severe jugo in the Adriatic*, Physics and Chemistry of the Earth (B), 24 (1999), 653-657.
- [5] Andročec, V.; Beg-Paklar, G.; Dadić, V.; Djakovac, T.; Grbec, B.; Janeković, I.; Krstulović, N.; Kušpilić, G.; Leder, N.; Lončar, G.; Marasović, I.; Precali, R.; Šolić, M.: *The Adriatic Sea Monitoring Program - Final Report*, Zagreb, 2009.
- [6] Lamb, H.: *Hydrodynamic*, 6th edn, Dover publications, New York, pp.738,1932.
- [7] Phillips, O., M.: *On the generation of waves by turbulent wind*, Journal of Fluid Mechanics, 2 (1957), 417-445.
- [8] Miles, O., M.: *On the generation of surface waves by shear flows*, Journal of Fluid Mechanics, 3 (1957), 185-204.
- [9] Donelan, M.,A.: *A simple numerical model for wave and wind stress prediction*, National Water Research institute manuscript, Burlington, Canada, pp.28, 1977.
- [10] Cavaleri, L.; Malanotte-Rizzoli: *Wind wave prediction in shallow water: Theory and application*, Journal of Geophysical Research, 86-C11 (1981), 10961-10973.
- [11] Janssen, P., A., E., M.: *Wave induced stress and drag of airflow over sea waves*, Journal of Physical Oceanography, 19 (1989), 745-754.
- [12] Janssen, P., A., E., M.: *Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting*, Journal of Physical Oceanography, 21 (1991), 1631-1642.
- [13] Janssen, P., A., E., M.: *Experimental evidence of the effect of surface waves on the airflow*, Journal of Physical Oceanography, 22 (1992), 1600-1604.
- [14] Janssen, P., A., E., M.: *On the effect of ocean waves on the kinetic energy balance and consequences for the initial dissipation technique*, Journal of Physical Oceanography, 30 (1998), 1743-1756.
- [15] Johnson, H., K.: *On modelling wind-waves in shallow and fetch limited areas using method of Holthuijsn*, Booij and Herbers, Journal of Coastal Research, 14-3 (1998), 917-932.
- [16] Johnson, H., K. Kofoed-Hansen: *Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modelling*, Journal of Physical Oceanography, 30 (2000), 1743-1756.
- [17] Sverdrup, H., V., Munk, W., H.: *Empirical and theoretical relations between wind, sea and swell*, Trans. Am. Geophys. Union, 27 (1946), 823-827.
- [18] Bretschneider, C., L.: *The generation and decay of wind waves in deep water*, Trans. Am. Geophys. Union, 33-3 (1952), 381-389.
- [19] Kahma, K., K., Calkoen, C., J.: *Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves*, Journal of Physical Oceanography, 22-12 (1992), 1389-1405.
- [20] Ivatek-Sahdan, S., Tudor, M.: *Use of high-resolution dynamical adaptation in operational suite and research impact studies*, Meteorol. Z., 13 (2004), 99-108.
- [21] Komen, G., J.; Cavaleri, M.; Donelan, K.; Hasselman, S.; Hasselman, K.; Janssen, P., A., E., M.: *Modelling of dynamic of ocean surface waves*, Cambridge university press, Cambridge, pp.532, 1994.
- [22] Herzbach, H.; Janssen, P., A., E.: *Improvement of the short-fetch behaviour in the Wave Ocean Model (WAM)*, J. Atmos and Ocean Tech., 16 (1999), 884-892.
- [23] Goda, Y.: *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced series on ocean engineering, World Scientific Ed., New Jersey, pp.423, 2000.