

Modeliranje rezidualnih vodostaja Bakarskog zaljeva*Ivana Cerovečki i Mirko Orlić**Geofizički zavod, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb**Primljeno 17. veljače 1989, u konačnom obliku 21. travnja 1989.*

U ovom se radu analizira slučaj izuzetno visokih vodostaja zabilježenih u Bakarskom zaljevu 31. siječnja/1. veljače 1986. Usporedba rezidualnih vodostaja sa sinoptičkim kartama te s vremenskim nizovima tlaka zraka i vjetra nad Jadranom pokazala je da su ciklone uzrokovale dva poremećaja, koji su konstruktivnom superpozicijom doveli do stvaranja izuzetnih vodostaja. Nakon prolaska fronte vjetar je naglo oslabio, što je bilo uzrokom pojave slobodnih oscilacija (seša) koje su potrajale desetak dana.

Djelovanje tlaka zraka na razinu mora može se dobro reproducirati efektom inverznog barometra. Radi simuliranja utjecaja vjetra razvijen je jednodimenzionalni hidrodinamički numerički model. Pokazalo se da model daje dobre rezultate ako se vjetar izmjeren na obalnim postajama transformira u vjetar nad morem prema empirijskoj relaciji što ju je objavio S.A.Hsu 1986. godine. Nadalje, uvjet za uspješnost modela je i odabir koeficijenta pridnenog trenja u iznosu $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, što je donja granica vrijednosti koje se navode u literaturi za područje Jadrana.

Modelling residual sea levels of the Bakar Bay

In this paper a case of extremely high sea levels, which were recorded in the Bakar Bay on 31 January/1 February 1986, has been analysed. The comparison of residual sea levels with synoptic weather charts and time series of both atmospheric pressure and wind over the Adriatic Sea has shown that cyclones induced two disturbances which were constructively superimposed and therefore caused extremely high sea levels. After a front passed by, the wind suddenly decreased in strength causing free oscillations (seiches) which persisted for approximately ten days.

It has been shown that the influence of atmospheric pressure on the sea can well be represented by the inverted barometer effect. In order to simulate the wind effect, one-dimensional hydrodynamical numerical model has been developed. It was found that the model gives good results when land-based wind data are transformed into offshore data according to empirical relation published by S. A. Hsu in 1986. Moreover, it turned out that very good agreement between the observed and predicted levels can be obtained by using the value of $5 \cdot 10^{-4}$ m/s for bottom friction coefficient, which equals the lower limit of values cited in the literature for the Adriatic area.

1. Uvod

Godine 1989. navršava se 60 godina otkako je zagrebački Geofizički zavod uspostavio u Bakru, u dnu Bakarskog zaljeva, mareografsku postaju. Mareograf je bilježio vo-

dostaje od 1929. do 1939. godine. Nakon prekida u vrijeme rata, postaja je obnovljena 1949. godine, na istom mjestu i uz odabir iste mareografske konstante, te radi i danas.

Mareografske registracije redovito su obrađivane i objavljivane. Srednji mjesečni i godišnji vodostaji, kako predratni tako i poratni, upućivani su odgovarajućoj međunarodnoj službi (Permanent Service for Mean Sea Level, Birkenhead, Velika Britanija) i tamo objelodanjivani. Detaljniji podaci objavljuvani su od 1954. godine u publikacijama Hidrografskog instituta JRM iz Splita. Svi originalni mareogrami arhivirani su u Geofizičkom zavodu u Zagrebu te predstavljaju najdulji vremenski niz jednog oceanografskog parametra registriranog u našoj zemlji.

Podaci bakarskog mareografa poslužili su kao osnova za izradu brojnih znanstvenih radova. Analizirajući upravo bakarske podatke, domaći istraživači često su otvarali nova područja fizičko-oceanografskih izučavanja u nas. Tako su Goldberg i Kempni (1938) dali pionirsku studiju kratkoperiodičnih seša, Kasumović je načinio prvu ručnu harmonijsku analizu morskih doba (1952, 1955) te ranu analizu utjecaja sinoptičkih atmosferskih poremećaja na more (1958), Zore (1960, 1965, 1968, 1969) je započela istraživati sezonske oscilacije razine mora, a Kovačević i Orlić (1988) su izveli prvu harmonijsku analizu na elektroničkom računalu. Domaći istraživači koristili su se bakarskim podacima još pri izučavanju srednje razine mora (Škreb, 1936; Kasumović, 1950, 1959; Šegota, 1976) te dugoperiodičnih seša (Kasumović, 1963). I strani znanstvenici često su se služili bakarskim podacima, u analizi sezonskih oscilacija razine mora (Polli, 1941, 1946; Pattullo et al., 1955; Woodworth, 1984), srednjeg vodostaja (Mosetti, 1969; Barnett, 1984; Pirazzoli, 1986) i plimnih oscilacija (Rickards, 1985).

U ovom radu pažnju ćemo obratiti rezidualnim vodostajima, također na osnovi registracija bakarskog mareografa. Rezidualne vodostaje dobivamo tako da od registriranih vodostaja oduzmemo vodostaje dobivene harmonijskom analizom i sintezom morskih doba. Smatra se da varijabilnost takvih – rezidualnih – vodostaja potječe prvenstveno od djelovanja atmosferskih faktora (tlaka zraka, vjetra) na more. Opisani postupak linearne dekompozicije meteoroloških i plimnih efekata moguće je provesti u bazenima u kojima je udovoljeno pretpostavci linearnosti. Za Jadran se općenito smatra da zadovoljava tu pretpostavku budući da su tipični iznosi denivelacija znatno manji od dubina.

Rezidualni vodostaji sadrže informaciju o prisilnim i slobodnim oscilacijama razine mora. Prisilno kolebanje razine mora javlja se zbog sporih promjena vjetra ili atmosferskog tlaka iznad mora, a slobodne oscilacije (seši) stvaraju se prilikom naglih promjena atmosferskih faktora. Obje ove klase oscilacija detaljno su izučavane za područje Jadrana. Dosada dobiveni rezultati prikazani su u preglednim člancima, kako za prisilne oscilacije (Orlić i Jeftić, 1981; Franco et al., 1982) tako i za slobodne oscilacije (Buljan i Zore-Armanda, 1976; Franco et al., 1982).

Osnovni je predmet ovog istraživanja jedan noviji slučaj izuzetno visokih rezidualnih vodostaja. Iscrpna analiza odabranog slučaja omogućit će dublje spoznavanje mehanizama koji dovode do pojave uspora tj. do prisilnog kolebanja vodostaja i – nakon toga – do stvaranja seša. Osim toga razvit će se jednodimenzionalni hidrodinamički numerički model kako bi se teorijskim putem reproducirali izmjereni vodostaji. To je prvi takav model načinjen u našoj zemlji; on se ponešto razlikuje od dosada formuliranih

(talijanskih) modela za područje Jadrana – posebno u načinu kako je uvedeno djelovanje vjetra i u odabiru numeričke sheme.

U drugom poglavlju analizirani su rezidualni vodostaji zabilježeni u Bakru te je upozoreno na njihovu vezu s vremenskim promjenama tlaka zraka i vjetra i sa sinoptičkim atmosferskim poremećajima. Treće poglavlje sadrži opis numeričkog modela. Nadalje, prikazani su i uspoređeni empirijski i teorijski vodostaji (četvrto poglavlje), a u zaključku (peto poglavlje) rekapitulirani su osnovni rezultati i njihova ograničenja.

2. Podaci

2.1. Vodostaj

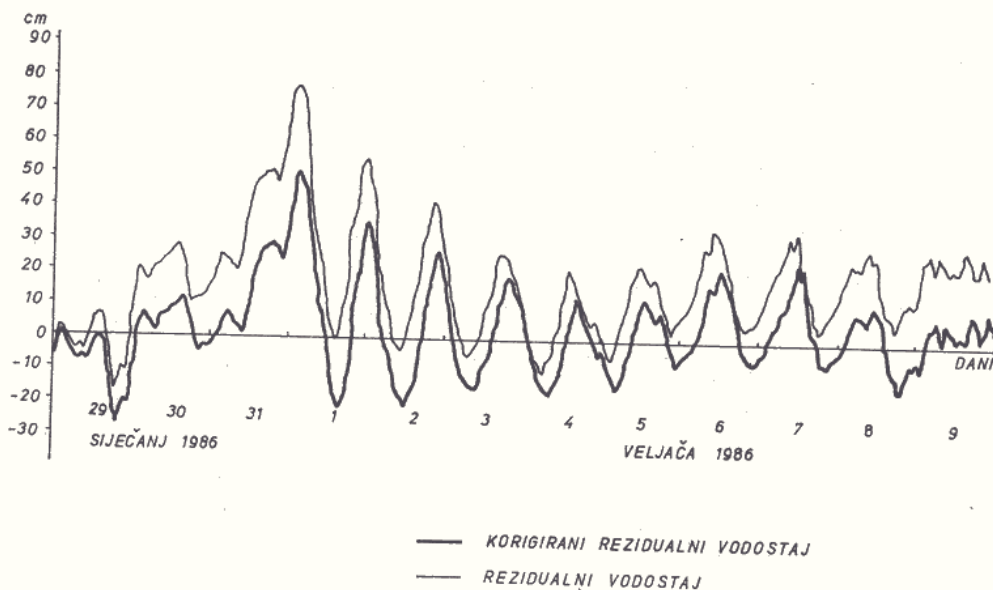
U noći između 31. siječnja i 1. veljače 1986. godine zabilježeni su u Bakru (slika 1) izuzetno visoki vodostaji s najvišim vrijednostima do 169 cm. Nakon toga se na mareogramu uočava osciliranje razine mora koje traje više dana.



Slika 1. Položaj mjernih postaja u Jadrani i razdioba bazena na poprečne presjeka po Sternecku (1919)
Figure 1. The location of measurement points in the Adriatic Sea and cross sections according to Sterneck (1919).

Da bismo eliminirali efekte morskih doba, od satnih vrijednosti registriranog vodostaja (dobivenih iz arhiva Geofizičkog zavoda u Zagrebu) oduzeli smo vrijednosti prognozirano vodostaja (preuzetih iz diplomske radnje V. Kovačević, 1986). Na taj

način su dobiveni rezidualni vodostaji u Bakru za razdoblje od 29. 1. do 9. 2. 1986. Satne vrijednosti rezidualnog vodostaja nacrtali smo u ovisnosti o vremenu (slika 2).



Slika 2. Usporedba rezidualnog vodostaja i rezidualnog vodostaja korigiranog za efekt tlaka zraka za postaju Bakar

Figure 2. The comparison of residual sea levels with adjusted residuals for the Bakar station.

Uočavamo da su se nakon glavnog uspora, koji se razvio u noći između 31. 1. i 1. 2. s maksimumom od 77 cm, generirali seši s periodom od oko 21 sat koji se mogu pratiti do 9. 2. kada naglo nestaju.

Rezidualne vodostaje željeli smo protumačiti djelovanjem atmosferskih faktora vezanih uz ciklone koje su u tom razdoblju prelazile preko Jadrana. Radi toga smo analizirali sinoptičku situaciju na Sredozemlju od 29. 1. do 9. 2. 1986. godine.

2.2. Sinoptička situacija

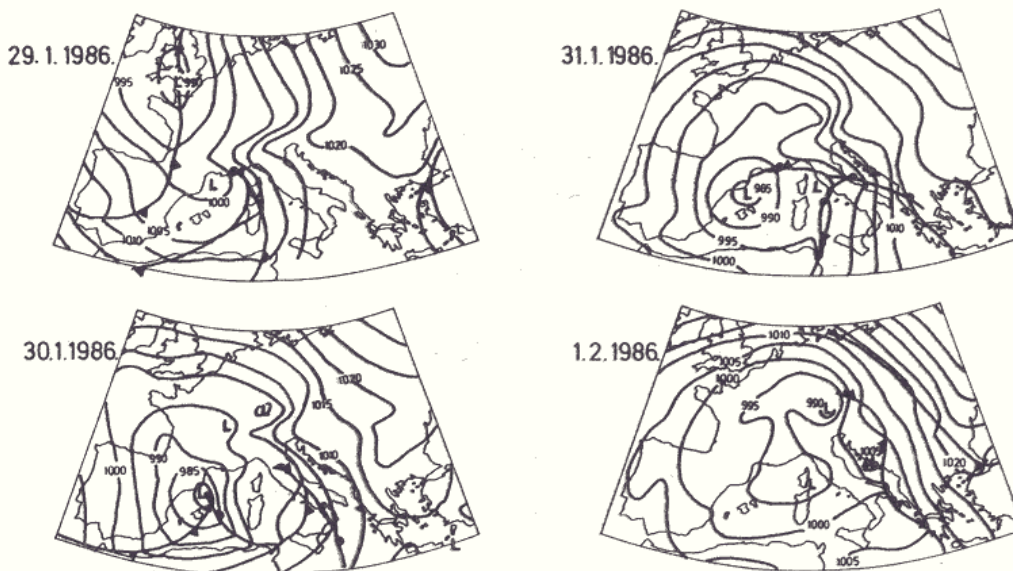
Sinoptičku situaciju u razmatranom razdoblju pratili smo iz meteoroloških karata dio kojih je prikazan na slici 3 (Deutscher Wetterdienst, 1986).

Dana 29. 1. nad područjem zapadnog Sredozemlja stacionira ciklona, dok je nad područjem Jadrana bilo bezgradijentno polje tlaka zraka. Duž cijele obale puhala je slaba bura.

Dana 30. 1. ciklona sa zapadnog Sredozemlja se pomakla prema istoku, dok se u zapadnom Sredozemlju formira nova ciklona. Na sjevernom Jadranu je puhala bura, a na srednjem i južnom jugo. Jadranu se približavala topla fronta.

Dana 31. 1. nad područjem Alpa formira se greben. Tijekom dana fronta je zahvatila južni Jadran te je puhalo pojačano jugo, dok je na sjevernom Jadranu još uvijek bila bura. Na sjevernom Jadranu opaža se nagli pad tlaka zraka: 38 hPa za 24 sata, što će

prema efektu inverznog barometra (npr. Groen i Groves, 1962) dovesti do povišenja razine mora od otprilike 38 cm.



Slika 3. Prizemne sinoptičke karte u 13 sati EMT
Figure 3. Surface synoptic weather charts at 1 p.m. EMT.

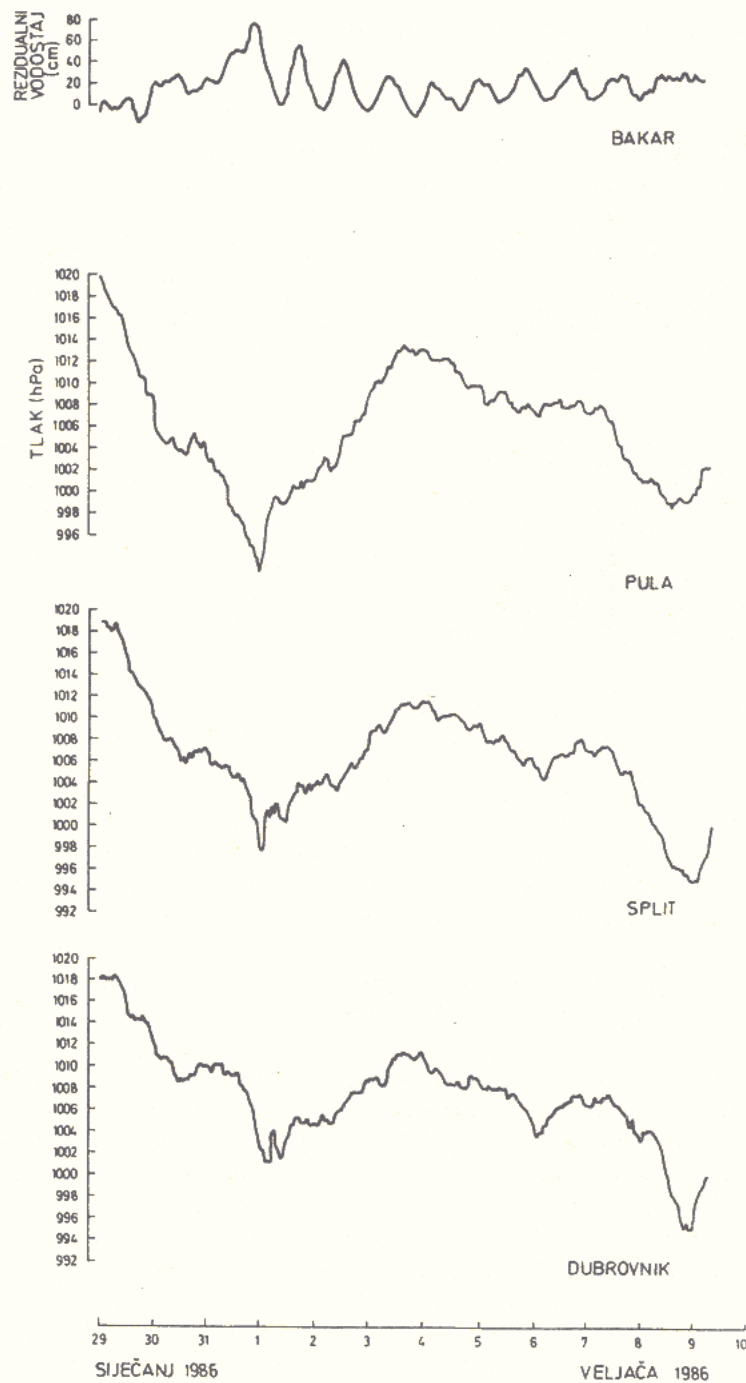
Dana 1. 2. fronta je prošla područje Jadranskog mora. Ciklona je potpuno okludirala i premješta se dalje na istok. Vjetar se stišao a u pozadini okludirane fronte formira se polje visokog atmosferskog tlaka. Istovremeno se ciklona nastala 29. 1. u zapadnom Sredozemlju formira u duboku visinsku ciklonu koja zahvaća područje srednje i zapadne Evrope, ali stacionira i vremenom slabi tako da nema bitniji utjecaj na Jadran.

Dana 2. 2. uočavamo bezgradijentno polje tlaka zraka nad Jadrantom. Mirna situacija traje sve do 9. 2. kada je u područje Jadrana iz zapadnog Sredozemlja došao novi frontalni sustav koji je uzrokovao jugo.

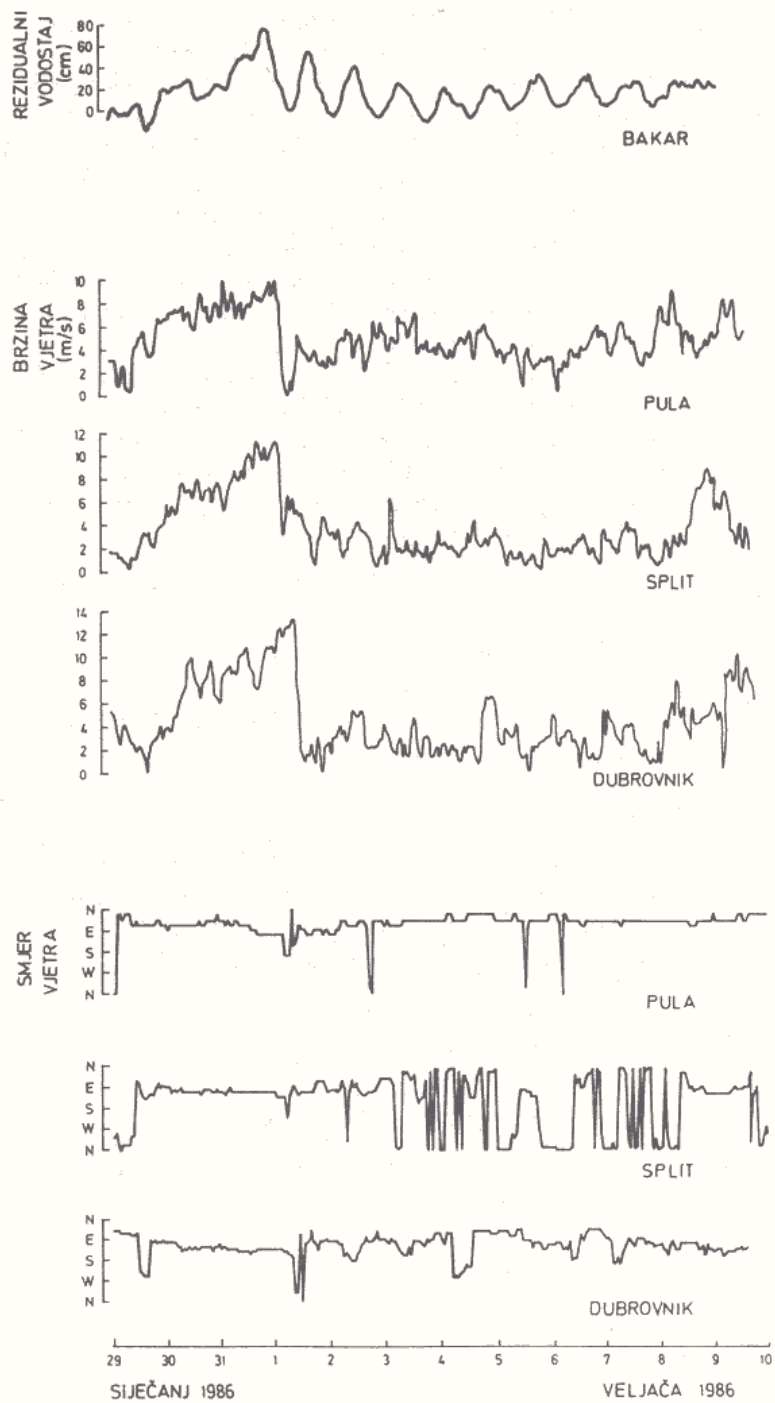
Analizirana sinoptička situacija može se korelirati s rezidualnim vodostajima. No da bismo bolje uočili vezu između atmosferskih faktora i vodostaja, posebno smo analizirali podatke o tlaku zraka i vjetru. Na temelju podataka dobivenih iz arhiva Republičkog hidrometeorološkog zavoda u Zagrebu analizirali smo satne vrijednosti tlaka zraka te smjera i srednje brzine vjetra za postaje Pula, Split i Dubrovnik (slika 1).

Na sve tri postaje atmosferski tlak (slika 4) neprekidno je pao od početka promatranog razdoblja, zbog djelovanja ciklona, da bi 1. 2. postigao najniže vrijednosti. Nakon što je ciklona okludirala, tlak zraka raste do 4. 2, a zatim pada te u toku 9. veljače s dolaskom nove ciklone ponovno poprima niske vrijednosti.

Pogledajmo sada sliku 5 na kojoj su prikazani podaci o vjetru. Brzina vjetra kontinuirano raste od početka promatranog razdoblja da bi maksimalnu vrijednost postigla tokom prvog dana veljače najprije u Puli, pa u Splitu i Dubrovniku. Nekoliko sati kasnije vjetar se naglo stišao duž cijelog Jadrana.



Slika 4. Rezidualni vodostaj u Bakru te tlak zraka zabilježen u Puli, Splitu i Dubrovniku
 Figure 4. Residual sea levels at Bakar and atmospheric pressure recorded at Pula, Split and Dubrovnik.



Slika 5. Rezidualni vodostaj u Bakru te brzina i smjer vjetra zabilježeni u Puli, Splitu i Dubrovniku
 Figure 5. Residual sea levels at Bakar and wind speed and direction recorded at Pula, Split and Dubrovnik.

Analizirani podaci o stanju atmosfere iznad mora mogu se povezati s rezidualnim vodostajima. Dana 30. 1. područje Jadrana bilo je pod utjecajem ciklone tako da je atmosferski tlak nad cijelim bazenom bio nizak. Ispred fronte koja tokom sljedećeg dana zahvaća Jadran puhao je snažan jugoistočni vjetar. To je generiralo prvi uspor koji vidimo na slici 2. Dolaskom druge ciklone tlak zraka još više pada, vjetar je snažniji, te nastaje drugi uspor koji je očigledno u fazi sa slobodnim oscilacijama vezanim uz prvi uspor pa dolazi do konstruktivne superpozicije. Najviši vodostaji bilježe se u noći između zadnjeg dana siječnja i prvog dana veljače. Na sinoptičkoj karti idućeg dana vidimo da je nakon prolaska fronte jačina vjetra naglo opala, što je osnovni uzrok pojave slobodnih oscilacija. One se mogu pratiti na mareogramu do 9. 2. kada se destruktivno superponiraju na prisilne oscilacije koje je uzrokovala nova ciklona.

Iz izloženog vidimo da su u razmatranom razdoblju promjene tlaka zraka nad Jadranom bile polagane. Zato smo rezidualne vodostaje u Bakru korigirali za utjecaj atmosferskog tlaka upotrebom formule za efekt inverznog barometra, uz odabir prosječnog tlaka zraka od 1020 hPa. Tako dobivene vrijednosti prikazane su također na slici 2. Time smo eliminirali djelovanje tlaka zraka, pa ćemo korigirane rezidualne vodostaje dalje nastojati protumačiti samo djelovanjem vjetra.

3. Teorija

U prethodnom poglavlju ukratko smo opisali podatke na kojima se zasniva analiza uspora u Bakru.

Ovdje ćemo iznijeti pregled teorije u opsegu, u kojem je primijenjena u ovoj radnji.

3. 1. Polazne jednadžbe

Pretpostavimo da je more homogeno i nestlačivo. Silu uzročnicu morskih doba ne uzimamo u obzir. Uvažimo da je tipična horizontalna dimenzija poremećaja u Jadrano mnogo veća od dubine mora te da je brzina gibanja poremećaja iznad mora mnogo veća od brzine čestica u moru. Tada dobivamo sljedeći sistem jednadžbi

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - 2\Omega \sin \phi v &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + 2\Omega \sin \phi u &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ 0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

gdje je:

- u – komponenta brzine čestica duž x osi,
- v – komponenta brzine čestica duž y osi,

w – komponenta brzine čestica duž vertikalne z osi,
 ρ – gustoća vode,
 g – akceleracija sile teže,
 $2\Omega \sin \phi$ – Coriolisov parametar ($=f$),
 p – tlak,
 N – koeficijent turbulentnog trenja.

Jadranski bazen ima izdužen oblik pa ga smijemo aproksimirati kanalom koji je zatvoren na jednom, a otvoren na drugom kraju. Dubina kanala je varijabilna. Specifična orografija priobalnog područja, koja dovodi do kanaliziranja vjetra duž glavne osi Jadrana, opravdava kanalnu aproksimaciju.

Uvedimo Kartezijev sustav tako da je x os položena horizontalno na neporemećenoj površini mora smjerom toka korita, y os je okomita na nju, a z os je u smjeru lokalne vertikale.

Zanemarimo li u našem jednodimenzionalnom slučaju komponentu brzine duž osi y , dobivamo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ fu &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ 0 &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 . \end{aligned} \tag{2}$$

Integriramo li vertikalnu komponentu jednadžbe gibanja (2.3) od proizvoljne dubine h do površine mora ζ , te uz pretpostavku da je tlak pri površini mora jednak atmosferskom tlaku, dobije se:

$$p_{-h} = p_a + \rho g (\zeta + h).$$

Zanemarimo li promjene atmosferskog tlaka (budući da su one već ranije uvažene ravnotežnom relacijom) i uvrstimo li $p = p_{-h}$ u jednadžbu (2.1) dobivamo:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{x,z}}{\partial z} \tag{3}$$

jer je tangencijalna napetost $\tau_{x,z} = N \rho \partial u / \partial z$. Uvrstimo li izraz za hidrostatsku aproksimaciju u jednadžbu (2.2), ona postaje:

$$fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} .$$

Ta nam jednakost daje ovisnost poprečnog nagiba razine mora o uzdužnom strujanju. Odatle se lako uočava da su poprečne razlike denivelacija beznačajne za bazene čija je širina mala u usporedbi s Rossbyevim radiusom deformacije.

Izraze (2.4) i (3) integriramo kako bismo od razmatranja različitih veličina prešli na razmatranje njihovih srednjih vrijednosti izračunatih duž vertikalnog presjeka dobivenog presijecanjem bazena ravninom paralelnom sa y, z ravninom. Površina poprečnog presjeka je tada:

$$A = \int_{-b_1}^{b_2} \int_{-D}^{\zeta} dz dy$$

gdje je D dubina mora u neporemećenim uvjetima, a $b_1 + b_2 = b$ širina bazena. Srednja brzina \bar{u} je:

$$\bar{u} = \frac{1}{A} \int_{-b_1}^{b_2} \int_{-D}^{\zeta} u dz dy,$$

a srednja denivelacija:

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{b} \int_{-b_1}^{b_2} \zeta dy.$$

Integriramo li jednadžbu gibanja (3) po y i po z i cijeli izraz podijelimo sa A , dobivamo:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} + \frac{b}{\rho A} [(\tau_{x,z})_{z=\zeta} - (\tau_{x,z})_{z=-D}]$$

jer je

$$\partial b_1 / \partial x \approx 0 \text{ i } \partial b_2 / \partial x \approx 0$$

budući da smo zanemarili komponentu brzine duž osi y te da normalna komponenta brzine duž obale iščezava. Pretpostavljeno je također da tangencijalne napetosti ne ovise o y . Integracija članova iz jednadžbe kontinuiteta (2.4) daje:

$$\int_{-b_1}^{b_2} \int_{-D}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial x} dz dy = \int_{-b_1}^{b_2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \int_{-D}^{\zeta} u dz - u_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - u_{-D} \frac{\partial D}{\partial x} \right] dy,$$

$$\int_{-b_1}^{b_2} \int_{-D}^{\zeta} \frac{\partial w}{\partial z} dz dy = \int_{-b_1}^{b_2} [w_{\zeta} - w_{-D}] dy.$$

Kinematički rubni uvjeti na površini i na dnu glase (zanemarimo li komponentu brzine duž y osi):

$$w_{\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u_{\zeta} \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

$$w_{-D} = -u_{-D} \frac{\partial D}{\partial x} ,$$

te jednadžba kontinuiteta prelazi u oblik

$$\int_{-b_1}^{b_2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \int_{-D}^{\zeta} u \, dz \right] dy + \int_{-b_1}^{b_2} \frac{\partial \zeta}{\partial t} dy = 0 .$$

S obzirom na to da – kao i ranije – vrijedi $\partial b_1 / \partial x \approx \partial b_2 / \partial x \approx 0$, konačno imamo:

$$\frac{\partial}{\partial x} (A\bar{u}) + b \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} = 0 .$$

Sada jednadžba gibanja i jednadžba kontinuiteta imaju ovaj oblik:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} + \frac{b}{\rho A} [(\tau_{x,z})_{z=\zeta} - (\tau_{x,z})_{z=-D}] ,$$

(4)

$$\frac{1}{b} \frac{\partial}{\partial x} (A\bar{u}) + \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} = 0 ,$$

a daje ih npr. Svansson (1959).

Pridneno trenje prikazano je linearnom funkcijom srednje brzine:

$$(\tau_{x,z})_{z=-D} = \tau_{x,d} = k \rho \bar{u} ,$$

gdje koeficijent pridnenog trenja k poprima vrijednost iz intervala $0,6 - 1,5 \cdot 10^{-3}$ m/s (Orlić, 1987).

Površinska napetost vjetra prikazana je izrazom

$$(\tau_{x,z})_{z=\zeta} = \tau_x = C_D \rho_a W |W| .$$

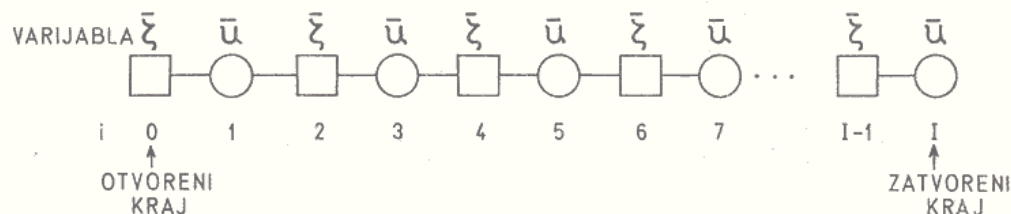
U starijim radovima koji se bave problemom forsiranja sugerira se da se za koeficijent površinske napetosti C_D uzme vrijednost $2,5 \cdot 10^{-3}$, kao što je opisano u radu Kuzmića i Orlića (1987). Gustoća zraka je označena sa ρ_a , a W je brzina vjetra projiciranog na x os.

Bazen koji promatramo aproksimirali smo kanalom varijabilne dubine koji je otvoren na jednom, a zatvoren na drugom kraju. Na zatvorenom kraju razina mora je vari-

jabilna dok je horizontalna komponenta brzine jednaka nuli. Na otvorenom kraju nema promjene razine mora jer pretpostavljamo da bazen graniči s beskrajnim rezervoarom vode koji može s njim izmjenjivati vodu bez promjene razine mora. Tako smo definirali rubne uvjete, a za početne pretpostavljamo stanje mirovanja ($\bar{u}_{t=0} = \bar{\zeta}_{t=0} = 0$).

3.2. Diskretizacija bazena, numerička formulacija i uvjet stabilnosti

Da bismo diferencijalne jednadžbe dobivene u prethodnom poglavlju mogli transformirati u jednadžbe diferencija, najprije treba diskretizirati bazen. Aproximiramo ga nizom od $I + 1$ poprečnih presjeka udaljenih za Δx , a redni broj razmatranog poprečnog presjeka označit ćemo sa i , tako da vrijedi $x = i \Delta x$. Presjeke brojimo od otvorene prema zatvorenoj granici (slika 6). Redni broj vremenskog prirasta označit ćemo sa n , a on leži u intervalu $[0, N]$, tj. vrijedi $t = n \Delta t$.



Slika 6. Shematski prikaz računskih točaka

Figure 6. Schematic presentation of calculation points.

Nakon što smo diskretizirali bazen, prevodimo diferencijalne jednadžbe u jednadžbe konačnih razlika. Za prostorne derivacije koristimo se centralnim razlikama, a za vremenske derivacije razlikama unaprijed. Sistem jednadžbi (4) poprima ovaj oblik:

$$\frac{\bar{u}_i^{n+1} - \bar{u}_i^n}{\Delta t} = -g \frac{\bar{\zeta}_{i+1}^{n+1} - \bar{\zeta}_{i-1}^{n+1}}{2 \Delta x} + \frac{b_i}{\rho A_i} \tau_{x,i}^n - \frac{b_i}{A_i} k \bar{u}_i^n, \quad (5)$$

$$\frac{1}{b_i} \frac{A_{i+1} \bar{u}_{i+1}^n - A_{i-1} \bar{u}_{i-1}^n}{2 \Delta x} + \frac{\bar{\zeta}_i^{n+1} - \bar{\zeta}_i^n}{\Delta t} = 0.$$

Koristeći se ekonomičnom shemom koju smo izabrali, u svakom trenutku trebamo pamtili samo vrijednosti brzina i denivelacija na zadanih $I + 1$ presjeka u prethodnom trenutku.

Rubni uvjeti koje smo opisali u prethodnom poglavlju svode se na relacije:

$$\bar{u}_I^n = 0, \quad \forall n$$

$$\bar{\zeta}_0^n = 0, \quad \forall n.$$

Početni uvjeti sada glase

$$\bar{u}_i^0 = \bar{\zeta}_i^0 = 0, \quad \forall i.$$

Da bi naš sistem jednađbi bio numerički stabilan, treba biti zadovoljen Courant-Friedrichs-Lewy kriterij. Za shemu koju smo izabrali on glasi:

$$\Delta t \leq \frac{2 \Delta x}{(g D_{\max})^{1/2}} \quad (6)$$

3.3. Primjena teorije na jadranski bazen

Izveli smo izraze pomoću kojih možemo računati vrijednost $\bar{\zeta}$ i \bar{u} duž poprečnih presjeka i nejednakost koja određuje najveći dozvoljeni korak u vremenu za neki izduženi bazen. Sada ćemo te relacije primijeniti na Jadran.

Jadranski bazen razdijelimo na poprečne presjeke po Sternecku (1919) kako je prikazano na slici 1. Numeričke vrijednosti širina i površina poprečnih presjeka dane su u citiranom radu. Za odabranu diskretizaciju bazena ($\Delta x = 20,5$ km; $D_{\max} = 767$ m) najveći dozvoljeni vremenski korak je 8 minuta. Svi numerički proračuni koji slijede rađeni su s vremenskim korakom od 5 minuta. Također možemo ovdje navesti da smo se u svim računima za akceleraciju sile teže koristili vrijednošću 9.81 m/s², za gustoću mora 1025 kg/m³, a za gustoću zraka $1,247$ kg/m³. Govoreći o podacima potrebnim za račun valja još spomenuti da smo vrijednosti brzina vjetra W dobili tako da smo originalne vektore vjetra projicirali na x os koja je bila položena pod kutem od 45° prema sjeveru. Pritom smo pretpostavili da je na sjevernom Jadranu vjetar u svakom času bio jednak onom zabilježenom u Puli, na srednjem Jadranu – vjetru u Splitu, a na južnom Jadranu – vjetru u Dubrovniku. Podatke o vjetru između punih sati dobili smo linearnom interpolacijom.

3.4. Program i testiranje programa

Nakon što su napisane jednađbe konačnih razlika i određeni rubni i početni uvjeti, problem je potpuno formuliran. Rješavanje problema zahtjeva upotrebu elektroničkog računala.

Napisali smo fortranski program koji računa denivelacije i horizontalnu komponentu brzine prema algoritmu

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_i^{n+1} &= \bar{\zeta}_i^n - \frac{\Delta t}{b_i} \frac{A_i}{2 \Delta x} (A_{i+1} \bar{u}_{i+1}^n - A_{i-1} \bar{u}_{i-1}^n), \\ \bar{u}_i^{n+1} &= \left(1 - \frac{b_i k \Delta t}{A_i}\right) \bar{u}_i^n - g \Delta t \frac{\bar{\zeta}_{i+1}^{n+1} - \bar{\zeta}_{i-1}^{n+1}}{2 \Delta x} + \frac{\Delta t b_i}{\rho A_i} \tau_{x,i}^n. \end{aligned} \quad (7)$$

Da bismo testirali program, pretpostavili smo da bazen ima oblik paraclopeda s dimenzijama jednakim prosječnim dimenzijama Jadrana (širina 165 km, dubina 212 m, duljina 799,5 km). Bazen je otvoren na jednom, a zatvoren na drugom kraju. Na more do nultog časa ne djeluje nikakav impuls, a tada počinje puhati vjetar konstantnog iznosa od 10 m/s nad cijelim bazenom.

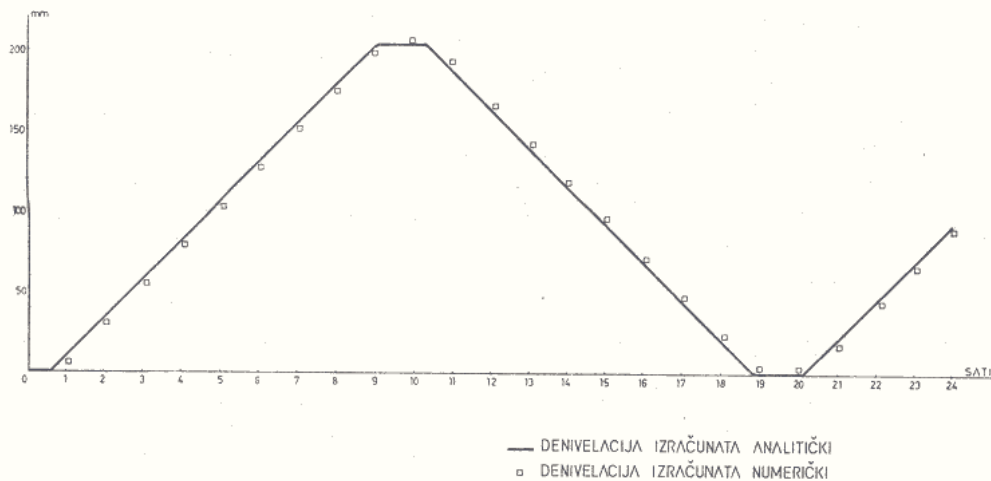
Rezultate dobivene numeričkim modelom za postaju udaljenu 697 km od otvorenog kraja uspoređujemo s odgovarajućim analitičkim rješenjem koje nam daje izraz:

$$\zeta(x, t) = \frac{\tau_x}{\rho g D} \left[x + \frac{8L}{\pi^2} \left(-\cos\sigma_1 t \sin \frac{\pi}{2L} x + \frac{1}{9} \cos\sigma_3 t \sin \frac{3\pi}{2L} x - \frac{1}{25} \cos\sigma_5 t \sin \frac{5\pi}{2L} x + \dots \right) \right], \quad (8)$$

gdje je D konstantna dubina bazena, x udaljenost promatrane točke, a L duljina bazena. Period je dan izrazom:

$$T_k = \frac{2\pi}{\sigma_k} = \frac{4L}{k \sqrt{gD}}, \quad k = 1, 3, 5, \dots$$

Denivelacije izračunate analitički i numerički prikazane su na slici 7. Budući da je postignuto dobro slaganje, možemo prići izvedbi modela u realnim uvjetima.



Slika 7. Rezultati testiranja modela
Figure 7. Results of testing the model.

4. Rezultati i diskusija

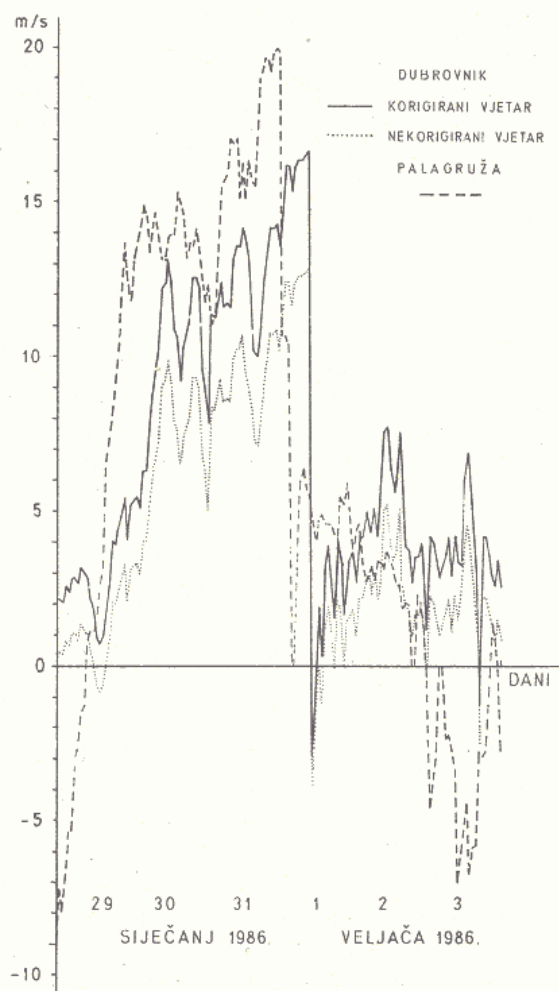
Provjerili smo model na slučaju idealiziranog bazena i homogenog vjetra. Sada ćemo ga upotrijebiti pri simulaciji uspora zabilježenog u noći između 31. siječnja i 1. veljače 1986. u Bakru. Promatrali smo promjene razine mora 12 dana: od 29. 1. do 9. 2. 1986.

Za početak smo odabrali dane kada je situacija na Jadranu bila relativno mirna i neporemećena – nalik zadanim početnim uvjetima. Rezultate dobivene numeričkim modelom uspoređivali smo s vrijednostima korigiranog rezidualnog vodostaja. Prvi proračun smo napravili uzevši da je $k = 10^{-3}$ m/s i računajući površinsku napetost vjetra neposredno iz vremenskih nizova registriranih na obalnim postajama. Slaganje vrijednosti vodostaja bilo je prilično loše utoliko što su računski dobivene amplitude bile upola manje od zabilježenih.

Budući da su podaci o vjetru kojima smo raspolagali bili s aerodroma, dakle s kopna, a nama su potrebni podaci o vjetru nad morem, korigirali smo brzine vjetra prema relaciji:

$$W_{\text{more}} = 1,62 + 1,17 W_{\text{kopno}},$$

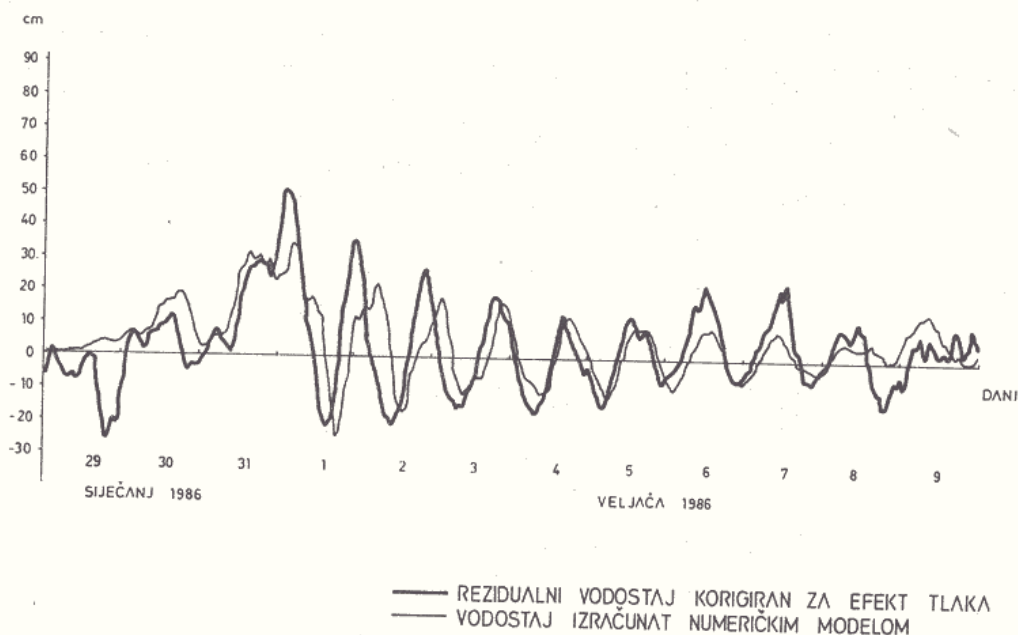
gdje je W brzina vjetra. Relacija je uzeta iz literature (Hsu, 1986), a bila je testirana na području Velikih jezera. Na slici 8 prikazani su nekorigirani i korigirani vremenski nizovi vjetra u Dubrovniku te vremenski niz za postaju Palagruža na otvorenom moru. Lijepo se vidi da primjena korekcije približava dubrovački vjetar strujanju nad morem. Također se uočava da promjene vjetra u Dubrovniku kasne za promjenama na Palagruži, što je posljedica gibanja atmosferskih poremećaja u smjeru od zapada prema istoku.



Slika 8. Jugoistočni vjetar, prema nekorigiranim i korigiranim mjerenjima u Dubrovniku te podacima za Palagružu

Figure 8. Southeast wind, according to uncorrected and corrected measurements at Dubrovnik and data for the Palagruža station.

Ponovljeni račun s korigiranim vrijednostima brzine vjetra uz iste koeficijente dao je mnogo bolje rezultate, ali se sada jasno vidjelo da je gušenje valova uz koeficijent pridenog trenja 10^{-3} m/s preveliko. Rezultati proračuna s korigiranim podacima o vjetru i k upola manjim, odnosno $5 \cdot 10^{-4}$ m/s, dobro su se slagali s korigiranim rezidualnim vodostajima, kao što vidimo na slici 9.



Slika 9. Usporedba denivelacija dobivenih numeričkim modelom uz $k = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s i korigirane podatke o vjetru te bakarskih rezidualnih vodostaja korigiranih za efekt tlaka
 Figure 9. The comparison of sea levels modelled by using $k = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s and corrected wind data with adjusted residuals for the Bakar station.

Ponavljanjem računa uz variranje ulaznih podataka provjerili smo ispravnost modela i odredili odgovarajuće vrijednosti koeficijenata u izrazima za tangencijalnu napetost.

Slijedeće je pitanje otkuda potječu razlike između opaženih i izračunatih vrijednosti vodostaja.

Prije svega, valja se podsjetiti da je model jednodimenzionalan. Shema kanala ne uvažava moguće varijacije duž kraće osi Jadrana. Doduše, prosječna širina Jadrana upola je manja od Rossbyevog radiusa deformacije, pa će poprečne razlike denivelacije biti malog iznosa. Ipak, pri ulaznoj struji možemo očekivati denivelacije koje će uz jugoslavensku obalu biti veće od srednjih vrijednosti.

Na početku promatranog razdoblja razlike uzrokuju nametnuti početni uvjeti. Situacija kakvu smo mi zadali – vrijednosti horizontalne komponente brzina i denivelacija na cijelom Jadranu jednake nuli – nikada nije ostvarena u prirodi.

Valja se podsjetiti i rubnih uvjeta. Pretpostavili smo da na otvorenom kraju Jadrana graniči s beskrajnim rezervoarom vode koji može izmjenjivati vodu s Jadranom bez promjene razine mora. Posljedica tog pojednostavljenja je skraćivanje perioda slobodnih oscilacija. Taj se problem susreće uvijek kada se razmatra sistem koji izmjenjuje ener-

giju s okolicom. U hidrodinamici se u tom slučaju uvode korekcije za period (Goldberg i Kempni, 1938).

U ovom je radu promatrano mehaničko djelovanje atmosfere na more. Zato točnost dobivenih rezultata ovisi o točnosti ulaznih meteoroloških parametara – podataka o tlaku zraka i vjetru. Prilikom rada s tim podacima napravili smo neka pojednostavljena.

Jadran smo podijelili na tri dijela u kojima smo vjetar smatrali konstantnim. Podatke o vjetru između punih sati dobivali smo linearnom interpolacijom.

Budući da smo raspolagali podacima o vjetru samo s jugoslavenske obale, a atmosferski poremećaj je došao sa zapada te je more reagiralo već u vremenu kada se on premjestio nad područje Jadrana, rezultati našeg numeričkog modela kasne otprilike za vremenski interval u kojem je poremećaj putovao od polovice jadranskog bazena do njegove istočne obale.

Grešku u rezultatima uvode i empirijske formule za tangencijalnu napetost vjetra na površini mora i izraz za pridneno trenje. Rezultati novijih istraživanja (što ih opisuju Kuzmić i Orlić, 1987) upozoravaju na ovisnost koeficijenta C_D o različitim parametrima. Kako je taj koeficijent kompleksna funkcija, teško ga je općenito odrediti. Koeficijent pridnenog trenja k preko ovisnosti o morskim strujama ovisi o meteorološkoj situaciji. Prikaz koeficijenta kao linearne funkcije srednje brzine predstavlja znatno pojednostavljenje.

S druge strane rezultati upućuju i na dobre strane modela.

Shema kojom smo se koristili štedjela je memoriju i omogućavala brzi rad čak i na osobnom računaru. Valja se podsjetiti da smo se za prostorne derivacije koristili centralnim razlikama, dok smo se za vremenske derivacije koristili razlikama unaprijed. U dosadašnjim jadranskim jednodimenzionalnim modelima (Accerboni et al., 1971; Finizio et al., 1972) korištene su samo centralne razlike.

Procjena brzine vjetra nad morem iz podataka o brzini vjetra nad kopnom dala je vrlo dobre rezultate. Ova korekcija je prvi puta napravljena za podatke o vjetru s Jadrana. U dosadašnjim radovima korišteni su direktno anemografski podaci iz gradova duž jugoslavenske i talijanske obale (Accerboni et al., 1971) ili se vjetar računao iz podataka o tlaku (Finizio et al., 1972). Spomenimo uzgred da se pokazalo neobično važnim računanje vodostaja u Bakru na osnovi anemografskih podataka s cijelog Jadrana (upotreba npr. samo pulskih podataka dala bi sasvim pogrešne vodostaje).

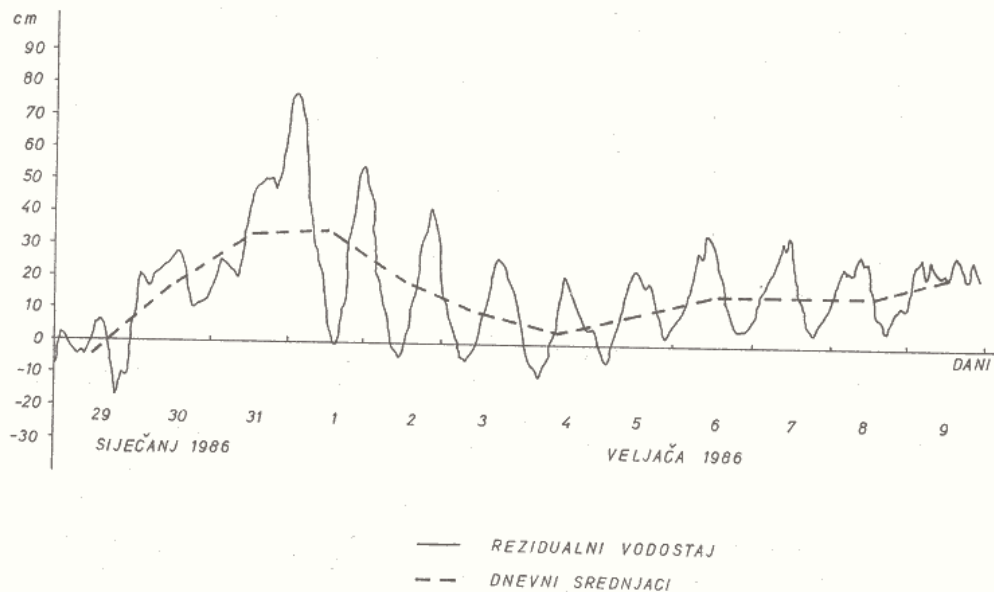
Verificirali smo vrijednost koeficijenta pridnenog trenja $k = 5 \cdot 10^{-4}$ m/s. To je nešto niža vrijednost od onih koje su dobivene modelima za pravokutni bazen dubine jednake prosječnoj dubini Jadrana. Budući da je veći dio Jadranskog mora male dubine, najbolje slaganje dobili smo uz manji koeficijent trenja jer je u plitkoj vodi efekt trenja veći.

Pogledamo li još jednom sliku 9, uočavamo dva poremećaja koji su zabilježeni jedan neposredno iza drugoga. Njihovom konstruktivnom superpozicijom nastali su izuzetno visoki vodostaji. Zbog naglog pada brzine vjetra generirali su se seči koji se zadnjeg dana promatranog razdoblja destruktivno superponiraju na nove poremećaje razine mora. Sve to dobro je interpretirano našim numeričkim modelom.

Usporedimo li uspor zabilježen 31. 1/1. 2. 1986. u Bakru s usporom koji je izazvao najviše štete u Veneciji, a desio se u prvom tjednu studenoga 1966. godine (Accerboni et al., 1971), uočavamo znatnu sličnost. I tada se radilo o dva poremećaja čija superpo-

zicija je dovela do pojave izuzetno visokih vodostaja. Bilo bi zanimljivo istražiti da li do značajnih uspora može doći samo superpozicijom dvaju (ili više) manjih poremećaja ili jedan poremećaj može biti dovoljno velik da prouzroči poplavu naselja duž obale Jadrana.

S tim u vezi valja spomenuti da se izuzetno visoke razine mora, uzrokovane atmosferskim faktorima, mogu analizirati jedino na osnovi rezidualnih vodostaja, nikako na temelju srednjih dnevnih vrijednosti. Na slici 10 uspoređeni su rezidualni vodostaji proučeni u ovom radu s pripadnim dnevnim srednjacima. Jasno se vidi da se računanjem srednjih dnevnih vodostaja (kao i primjenom nekog boljeg niskopropusnog filtra) uklanjaju ne samo seši iz vremenskog niza, već i znatan dio inicijalnih uspora. Prema tome, izuzetno visoke vodostaje (tzv. „storm surge” u anglo-američkoj literaturi) treba analizirati na osnovi rezidualnih vodostaja, dok se srednje dnevne vrijednosti mogu koristiti pri istraživanju meteorološki uvjetovanih oscilacija većeg perioda.



Slika 10. Usporedba rezidualnih vodostaja i srednjih dnevnih vodostaja za postaju Bakar
Figure 10. The comparison of residual sea levels with daily mean values for the Bakar station.

5. Zaključak

Rezidualne vodostaje zabilježene u Bakru u razdoblju od 29.1. do 9.2. 1986. željeli smo u ovom radu protumačiti djelovanjem atmosferskih faktora. Uspor opažen u noći između 31. siječnja i 1. veljače povezali smo s istodobnim padom tlaka zraka i maksimumom brzine vjetra nad čitavim Jadranom. Opaženi uspor pokušali smo interpretirati jednodimenzionalnim hidrodinamičkim numeričkim modelom, jer nam njegova jednostavnost omogućava da lakše sagledamo fiziku razmatranog problema.

Pogledamo li mehanizam nastajanja uspora u Bakru odmah uočavamo znatnu sličnost s poznatim usporom zabilježenim u studenom 1966. godine na Jadranu. U oba slučaja dva manja poremećaja konstruktivno su se superponirala i dovela do pojave

izuzetno visokog vodostaja. Nakon toga je u oba slučaja nagla promjena meteoroloških faktora generirala seše koji su trajali više dana.

Iako jednostavan, model je dao dobre rezultate i uspio je reproducirati sva nabrojena obilježja analizirane pojave.

Razmotrimo li prednosti i nedostatke ovdje prezentiranog modela, možemo zaključiti koji bi trebali biti zadaci daljnjih istraživanja.

Prije svega, bolje rezultate dobili bismo uzetviši za početne uvjete realne vrijednosti denivelacija i horizontalnih komponenata brzine. To upućuje na potrebu direktnih mjerenja i telemetrijskog dostavljanja podataka u računski centar.

Problem vezan uz izbor rubnih uvjeta na otvorenom kraju, koji je značajan uzrok nepodudaranja empirijskih i teorijskih rezultata, eliminirali bismo proširenjem modela na područje Jonskog mora.

Vidjeli smo da za uspješnu usporedbu opaženih denivelacija i denivelacija izračunatih pomoću modela treba detaljno poznavati atmosferske faktore za promatrano područje i razdoblje - osobito tlak zraka te smjer i brzinu vjetrova. Budući da ne postoji sustavno mjerenje tih parametara nad morem, treba ih procijeniti. U ovom radu upotrijebljena je relacija za korekciju brzine vjetrova za podatke s Jadrana. Relacija nam je omogućila da iz izmjerenih brzina vjetrova nad kopnom procijenimo brzine vjetrova nad morem. Rezultati modela koje smo dobili upotrijebivši korigirane podatke za vjetar bili su mnogo bolji od rezultata dobivenih korištenjem nekorigiranih podataka o vjetru s kopna. Ipak, najbolje bi bilo kada bismo imali anemografske podatke s mora. Zbog toga bi bilo dobro instalirati meteorološke stanice-plutače i na otvorenom moru.

Naposlijetku, znatan problem činila nam je parametrizacija trenja. Rezultati modela sugerirali su nam upotrebu nižih vrijednosti za koeficijent pridnenog trenja od onih koje daju modeli za pravokutni bazen dubine jednake prosječnoj dubini Jadrana. Uzrok tome je veći efekt trenja u plitkoj vodi sjevernog i srednjeg Jadrana. Problem odabira koeficijenata u empirijskim relacijama može se smanjiti samo provedbom odgovarajućih mjerenja.

Zahvala

Zahvaljujemo kolegama iz Geofizičkog zavoda u Zagrebu na pomoći pri održavanju bakarske mareografske postaje te Republičkom hidrometeorološkom zavodu SR Hrvatske na meteorološkim podacima. Zahvalni smo i mr Žarku Prniću iz RO Ina-Naftaplin, koji nam je pružio pomoć u izradi programa. Rad je izrađen uz financijsku pomoć Samoupravne interesne zajednice znanosti SR Hrvatske.

Literatura

- E. Accerboni, F. Castelli, F. Mosetti (1971): Sull' uso di modelli matematici idrodinamici per lo studio dell' acqua alta a Venezia, *Bollettino di geofisica teorica ed applicata* 13, 18-35.
- T. P. Barnett (1984): The estimation of "global" sea level change: a problem of uniqueness, *Journal of Geophysical Research* 89, 7980-7988.
- M. Buljan, M. Zore-Armanda (1976): Oceanographical properties of the Adriatic Sea, *Oceanography and Marine Biology—An Annual Review* 14, 11-98.

- Deutscher Wetterdienst (1986): Europäischer Wetterbericht für das Jahr 1986, Offenbach am Main.
- C. Finizio, S. Palmieri, A. Riccucci (1972): A numerical model of the Adriatic for the prediction of high tides at Venice, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 98, 86-104.
- P. Franco, Lj. Jeftić, P. Malanotte Rizzoli, A. Michelato, M. Orlić (1982): Descriptive model of the Northern Adriatic, *Oceanologica Acta* 5, 379-389.
- J. Goldberg, K. Kempni (1938): O oscilacijama Bakarskog Zaljeva i općem problemu zaljevskih seša, *Prirodoslovna istraživanja Kraljevine Jugoslavije* 21, 129-234.
- P. Groen, G. W. Groves (1962): Surges, Ch. 17 in M. N. Hill (ed): *The Sea*, Vol. 1, Interscience, New York, 611-646.
- S. A. Hsu (1986): Correction of land-based wind data for offshore applications: a further evaluation, *Journal of Physical Oceanography* 16, 390-394.
- M. Kasumović (1950): Srednja razina Jadranskog mora i geodetska normalna nula Trst, *Rad Geofizičkog zavoda u Zagrebu* II/3, 1-22.
- M. Kasumović (1952): Harmonička analiza plime i oseke luke Bakar, *Radovi Geofizičkog instituta u Zagrebu* III/1, 1-9.
- M. Kasumović (1955): O komponentama duge periode morskih mijena Jadranskog mora, *Hydrografski godišnjak* 54, 171-180.
- M. Kasumović (1958): O utjecaju tlaka zraka i vjetra na kolebanje razine Jadrana, *Hydrografski godišnjak* 56/57, 107-121.
- M. Kasumović (1959): O srednjoj razini Jadranskog mora i njenom utvrđivanju, *Geodetski list* 7-9, 159-169.
- M. Kasumović (1963): Slobodne oscilacije dugog perioda u Jadranskom moru, *Rasprave odjela za matematičke, fizičke i tehničke nauke JAZU* II/4, 121-166.
- V. Kovačević (1986): Harmonijska analiza i sinteza morskih doba u Bakru, *Diplomski rad*, PMF Zagreb, 51 pp.
- V. Kovačević, M. Orlić (1988): Harmonijska analiza i sinteza morskih doba u Bakru, *Hydrografski godišnjak* 86, 47-62.
- M. Kuzmić, M. Orlić (1987): Predicting the currents in the Northern Adriatic and the problem of ill-defined wind forcing, *Geofizika* 4, 137-145.
- F. Mosetti (1969): Le variazioni relative del livello marino nell'Adriatico dal 1896 al 1967 e il problema dello sprofondamento di Venezia, *Bollettino di geofisica teorica ed applicata* 11, 243-254.
- M. Orlić (1987): Oscillations of the inertia period on the Adriatic Sea shelf, *Continental Shelf Research* 7, 577-598.
- M. Orlić, Lj. Jeftić (1981): Utjecaj atmosfere na prisilno kolebanju razine Jadrana - prikaz dosadašnjih istraživanja, *Pomorski zbornik* 19, 447-461.
- J. Pattullo, W. Munk, R. Revelle, E. Strong (1955): The seasonal oscillation in sea level, *Journal of Marine Research* 14, 88-155.
- P. A. Pirazzoli (1986): Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records, *Journal of Coastal Research* 1, 1-26.
- S. Polli (1941): L'oscillazione annua del mare Mediterraneo, *Archivio di oceanografia e limnologia* 1, 21-30.
- S. Polli (1946): Correzioni stagionali nella previsione della marea calcolate per 25 porti del Mediterraneo, *Istituto geofisico di Trieste - Pubblicazioni* 180, 1-8.

- L. J. Rickards (1985): Report on sea level data collected during the MEDALPEX experiment from September 1981 - September 1982. Institute of Oceanographic Sciences Report 209, 1-170.
- R. D. v. Sterneck (1919): Die Gezeitenerscheinungen in der Adria -II Teil- Die theoretische Erklärung der Beobachtungs-Tatsachen, Akademie der Wissenschaften in Wien, Denkschriften Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse 96, 277-324.
- A. Svansson (1959): Some computations of water heights and currents in the Baltic, *Tellus* 11, 231-238.
- T. Šegota (1976): Promjena razine Jadranskog mora prema podacima mareografa u Bakru i Splitu, *Geografski glasnik* 38, 301-312.
- S. Škreb (1936): Morska razina, *Priroda* 26, 271-274.
- P. L. Woodworth (1984): The worldwide distribution of the seasonal cycle of mean sea level. Institute of Oceanographic Sciences Report 190, 1-94.
- M. Zore (1960): Promjena razine mora uzduž naše obale u vezi sa sistemom strujanja u Jadranu, *Hydrografski godišnjak* 59, 59-65.
- M. Zore-Armanda (1965): Les variations saisonnières du niveau de la mer le long de la cote orientale Adriatique, *Rapports et proces-verbaux des reunions CIESMM* 18/3, 807-810.
- M. Zore-Armanda (1968): Raspored tlaka zraka i cirkulacija vode u istočnom Mediteranu, *Hydrografski godišnjak* 67, 67-78.
- M. Zore-Armanda (1969): Water exchange between the Adriatic and the Eastern Mediterranean, *Deep-Sea Research* 16, 171-178.