

Nenad Domijan
Hrvoje Mihanović
Nenad Leder
Zvonko Gržetić

Hrvatski hidrografski institut
Zrinsko-Frankopanska 161, 21000 Split, Hrvatska

Harmonička i spektralna analiza morskih struja u sjevernom dijelu Riječkog zaljeva

Sažetak

Tijekom srpnja 1999. godine u sjevernom dijelu Riječkog zaljeva mjerene su morske struje na dvije dubine (1 m i 41 m), korištenjem autonomnih strujomjera AANDERAA RCM-7. Cilj tog istraživanja bilo je određivanje karakteristika strujnog polja malog akvatorija (oko 1 km²) omeđenog u širem smislu rtom Podurinj, s istočne strane i uvalom Perilo, sa zapadne strane. Rezultati harmoničke i rotacijske spektralne analize mjerenih struja pokazuju da je strujanje uglavnom WNW smjera s oko 3 puta većim maksimumom strujanja u podpovršinskom nego u pridnenom sloju. Značajne energije oscilacija struja zabilježene su na dnevnom plimnom periodu s tendencijom ciklonalne rotacije. Sekundarni maksimumi energije uočeni su na inercijalnom periodu (oko 17.2 sata) i poludnevnom plimnom periodu (oko 12 sati), s tendencijom anticiklonalne rotacije, što je u skladu sa spoznajom o izlaznim pridnenim strujama iz Bakarskog zaljeva. Harmoničke komponente K_1 i M_2 morskih struja ukazuju da su struje morskih mijena slabog intenziteta u podpovršinskom sloju, te još slabije u pridnenom sloju. To navodi na zaključak da su u ljetnoj sezoni najveće energije strujanja na periodima duljim od 24 sata.

Cljučne riječi: harmonici, rotacijski spektri, morske struje, Riječki zaljev.

1. Uvod

U cilju istraživanja dinamike strujanja mora u određenom morskom prostoru neophodno je dugotrajno mjerenje morskih struja na više dubina (jedan mjesec, sezona ili godina). Poznavanje njihovih značajki vezano je uz veliki broj djelatnosti kao npr. polaganje raznolikih instalacija u podmorju, pomorstvo, ribarstvo, turizam i zaštita okoliša.

Za razliku od skalarnih veličina kao što su temperatura mora, visina razine mora ili salinitet, morska struja je vektorska veličina koja mora biti opisana iznosom i smjerom strujanja. Zbog toga izbor podataka i primijenjene metode analize, uz način predstavljanja rezultata, uvelike ovisi o svrsi istraživanja ali i o dugotrajnosti

vremenskog niza podataka. Glavne tehnike i metode analize dugih vremenskih nizova morskih struja koje se upotrebljavaju u fizikalnoj oceanografiji su: digitalno filtriranje, rotacijska spektralna analiza i harmonička analiza. Digitalno filtriranje uprabom nisko-propusnog filtera omogućava npr. otklanjanje visoko-frekventnog signala (tj. valova ili gibanja strujomjera na sidrenom lancu) iz vremenskog niza podataka. Harmonička analiza temeljena na metodi najmanjih kvadrata osigurava određivanje amplituda, faza i kuta inklinacije elipsa struja za sve značajne plimne komponente. Rotacijska spektralna analiza daje energiju određenog smjera rotacije (ciklonalno i anticiklonalno) za svaki frekvencijski pojas.

U akvatoriju Riječkog zaljeva obavljena su temeljita istraživanja morskih struja u vremenskom razdoblju od 1976. do 1978. godine, a rezultati istraživanja objavljeni su u "Ekološkoj studiji akvatorija Riječkog zaljeva" (Jeftić et al., 1977; 1979; 1982) te u nekoliko znanstvenih radova (Smirčić i Ilić, 1981; Gačić et al., 1982, Limić and Orlić, 1987; Legović et. al., 1989). Ipak, broj dugotrajnih mjerenja morskih struja je bio nedovoljan (Leder et al., 1998) da bi se detaljnije spoznala dinamika ovog morskog područja.

U ovom radu raspravljat će se o rezultatima analize jednomjesečnog kontinuiranog mjerenja morskih struja u ljetnoj sezoni 1999. godine i to u sjevernom dijelu Riječkog zaljeva zvanom Podurinje. Mjerenje je obavio Hrvatski hidrografski institut na zahtjev HEP-a d.o.o., Zagreb. U tu svrhu korištene su metode harmoničke i rotacijske spektralne analize.

2. Metode mjerenja i obrade podataka

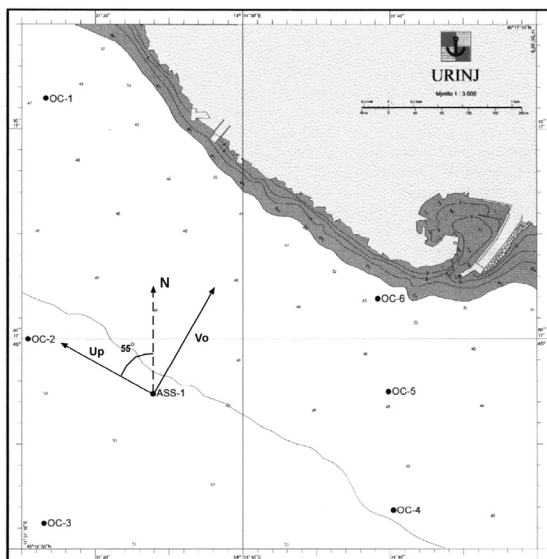
Tijekom srpnja 1999. godine u akvatoriju Podurinja (TE Rijeka) obavljen je niz istraživačkih radova koji su uključivali, mjerenja temperature i slanosti mora na postajama OC-1 do OC-6, uzimanja uzoraka morske vode, uzimanja uzoraka površinskog sedimenta i mjerenje morskih struja u podpovršinskom i pridnom sloju na postaji ASS-1 (slika 1). Strujomjerna stanica bila je opremljena s dva autonomna strujomjera AANDERAA RCM-7 te usidrena tzv. "U" metodom sidrenja na dubini od 49 m s površinskom označnom plutačom i sidrenim blokom od 150 kg (geografske koordinate postaje: $\phi = 45^{\circ} 16.9' N$, $\lambda = 14^{\circ} 31.2' E$). Smjer i brzina morskih struja mjereni su kontinuirano na dubinama od 1 m i 41 m u vremenskim intervalima od 10 minuta.

Za potrebe harmoničke i rotacijske spektralne analize korišteni su podaci satnih vrijednosti (smjer i brzina struje) koji su dobijeni izgladivanjem originalnih podataka upotrebom kliznog srednjaka (6 točaka jednake težine) kako bi se otklonio visoko-frekventni signal uzrokovan gibanjem pričvršćenih strujomjera na sidrenom lancu. Na taj način se iz razdoblja mjerenja od 29. lipnja do 29. srpnja 1999. godine dobio vremenski niz od 720 podataka smjera i brzine struje. Obrada podataka obavljena je uporabom programskog paketa WHISL-1994 koji omogućava uporabu harmoničke analize metodom najmanjih kvadrata (Forman, 1977) i rotacijsku spektralnu analizu

morskih struja (Gonella, 1972; Mooers, 1973). Osnove spektralne i rotacijske spektralne analize detaljno su prikazane i u Leder (1992). Glavna prednost harmoničke analize metodom najmanjih kvadrata je u tomu što se može upotrijebiti na vremenskom nizu proizvoljne duljine izdvajajući harmoničke komponente bez ograničenja na rezoluciju signala nametnutu brzom Fourierovom metodom (FFT) ili duljinom intervala mjerenja. S druge strane, rotacijska spektralna analiza upotpunjava analizu u domeni frekvencija, dajući informaciju o fazi transfer funkcije. Faza harmoničke komponente podijeljena s frekvencijom daje vremenski pomak između dva signala. Prema Gonelli (1972), osnovna ideja rotacijske spektralne analize je prikazivanje vremenskog niza morskih struja u obliku zbroja jednostavnih harmoničkih funkcija. Svaki vektor, pa tako i vektor brzine struje ili vjetra koji harmonično oscilira u vremenu može se prikazati kao rezultanta dvaju vektora od kojih jedan kruži u pozitivnom smjeru (ciklonalno – obrnuto od kretanja kazaljke sata), a drugi u negativnom smjeru (anticiklonalno – u smjeru kretanja kazaljke na satu). Zato je rotacija vektora na svakoj pojedinoj frekvenciji prikazana kao zbroj rotacije u pozitivnom (ciklonalnom) i negativnom (anticiklonalnom) smjeru.

Da bi se dobio detaljniji uvid u karakteristike strujnog polja na istraživanom području, korišteni su i podaci mjerenja brzine i smjera vjetra (satne vrijednosti) s meteorološke postaje OPATIJA za razdoblje od 1. do 31. srpnja 1999. godine, zamjeniti sa:

Podaci o brzini i smjeru vjetra s meteorološke postaje OPATIJA zbog svoje udaljenosti od područja mjerenja morskih struja nisu u potpunosti reprezentativni u predstavljanju vjetrova dnevno-noćne cirkulacije na području Podurinja. Međutim, podaci mjerenja s bliže meteorološke postaje RIJEKA nisu bili dostupni zbog kvara instrumenata.



Slika 1. Shema oceanografskih postaja (OC- mjerenje temperature i slanosti) i strujomjerne postaje ASS-1 u srpnju 1999. godine na istraživačkom području Urinj. Dijagram na postaji ASS-1 pokazuje koordinatni sustav Up (paralelno) i Vo (okomito) komponenti vektora morskih struja s obzirom na obalu. Dubine na karti su u metrima.

3. Rezultati

Osnovni statistički parametri mjerenih veličina

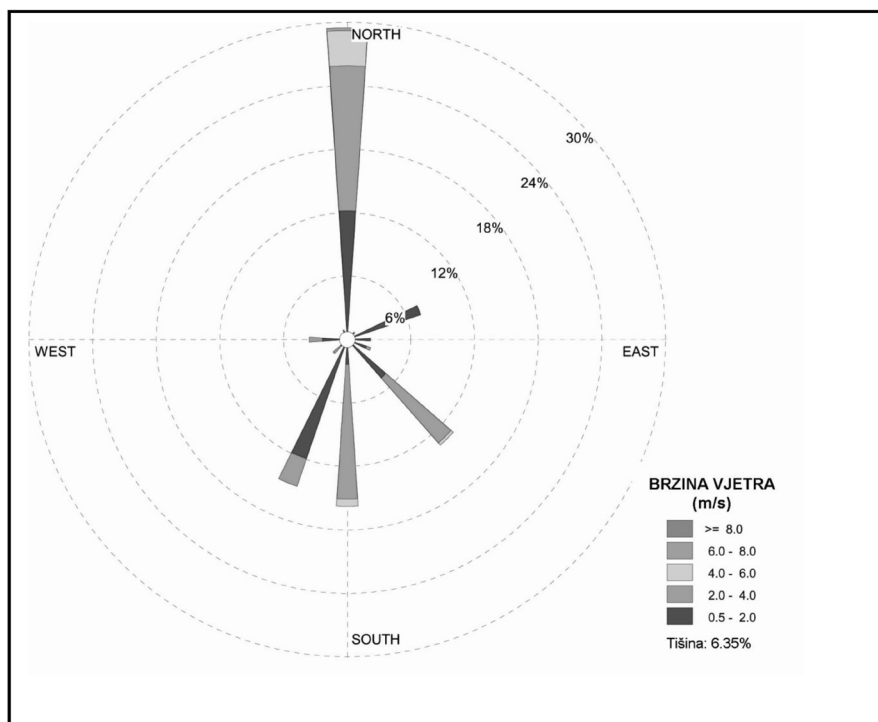
Vjetar

U tablici 1. prikazani su osnovni statistički parametri mjerenja brzine vjetra na meteorološkoj postaji OPATIJA udaljenoj otprilike 10 km od područja istraživanja, odnosno pozicije mjerenja morskih struja na postaji ASS-1. Brzina i smjer vjetra prikazani su ružom vjetrova od 16 smjerova prema meteorološkoj konvenciji, odnosno smjer vjetra pokazuje odakle vjetar puše (slika 2).

Iz tablice 1. vidi se da je u analizi korišteno 744 satnih vrijednosti brzine i smjera vjetra koji kroz cijelo razdoblje dostiže maksimalnu brzinu od 7.6 m/s iz smjera N. Iz ruže vjetra (slika 2) može se zaključiti da je vjetar bio uglavnom bimodalan i to: oko 29% iz smjera N (Tramontana) i oko 16% iz smjera S (Oštro), dok su vjetrovi iz W i E smjera zastupljeni s manje od 3%. Tišina (brzina vjetra od 0-0.5 m/s) učestvuje s oko 6%. Vjetrovi s maksimalnom varijancom (mjera energije) puhali su iz smjerova NNW i N (tablica 1), te su imali brzinu od 4 m/s.

Tablica 1. *Osnovni statistički parametri brzine vjetra i komponenta brzine vjetra rastavljenih u smjerovima njihovih maksimalnih varijanci ($U_{prim} = NNW-N$, $V_{orig} = ENE-E$) na postaji OPATIJA u vremenskom razdoblju od 1. do 31. srpnja 1999. godine.*

Parametar	V	Uprin	Vortg
Srednjak (m/s)	1.84	-0.07	-0.17
Varijanca (m ² /s ²)	1.31	4.03	0.71
Minimum (m/s)	0.00	-4.49	-3.53
Maximum (m/s)	7.60	7.59	3.00
Broj podataka	744	744	744



Slika 2. Ruža vjetra za 16 smjerova prema mjerenjima meteorološke postaje OPATIJA u razdoblju od 1. do 31. srpnja 1999. godine.

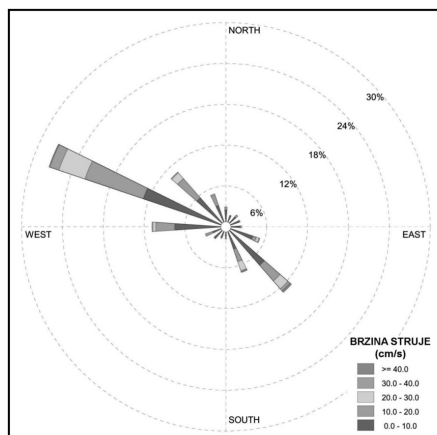
Morske struje

Osnovni statistički parametri satnih vrijednosti morskih struja na postaji ASS-1 dani su u tablici 2. (dubina mora na postaji: 49 m) i to na dubinama mjerenja 1 m i 41 m u vremenskom razdoblju od 29. lipnja do 29. srpnja 1999. godine. Simbolima V_1 i V_{41} označeni su srednjaci brzine struje na dubinama 1 m i 41 m koji pokazuju da su brzine struja u potpovršinskom sloju oko 2.8 puta veće nego u pridnom sloju, te da imaju oko 6.2 puta veću energiju nego u pridnom sloju. Maksimum brzine struje u podpovršinskom sloju (oko 56 cm/s) je, također, oko 3 puta veći nego u pridnom sloju (oko 17 cm/s). Standardne devijacije brzina struja su nešto manje od srednjih vrijednosti što ukazuje na relativno veliku promjenjivost brzine struje. Simbolima U_{p1} i U_{p41} označene su komponente brzina struja u podpovršinskom i pridnom sloju koje su približno paralelne s pružanjem obale (WNW-ESE) i imaju najveću energiju (najveća varijanca), dok su struje V_{01} i V_{041} okomite na obalnu crtu. Njihovi maksimumi su 2.6 puta u pridnom sloju te 4 puta u podpovršinskom sloju manji nego maksimumi struja usmjerenih paralelno s obalom.

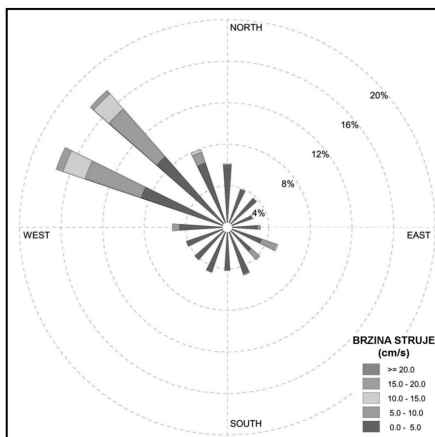
Tablica 2. Osnovni statistički parametri satnih vrijednosti mjerenih morskih struja na postaji ASS-1 ($\phi = 45^\circ 16.9' N$, $\lambda = 14^\circ 31.2' E$) na dubinama od 1 m i 41 m u vremenskom razdoblju od 12:00 sati 29.06.1999. do 10:00 sati 29.07.1999.

Parametar	V ₁	U _{p1}	V _{o1}	V ₄₁	U _{p41}	V _{o41}
Dubina (m)	1	1	1	41	41	41
Srednjak (cm/s)	10.50	-2.99	-1.78	3.72	1.81	0.06
Varijanca (cm ² /s ²)	59.96	137.91	20.38	9.60	17.57	2.61
Minimum (cm/s)	1.39	-38.9	-18.77	1.10	-17.09	-5.33
Maksimum (cm/s)	56.31	53.1	12.66	17.66	10.79	6.73
Broj podataka	720	720	720	720	720	720

Iz prikaza ruža struja (slike 3. i 4) vidi se da u podpovršinskom sloju prevladavaju WNW (27%) struje, dok u pridnenom sloju prevladavaju WNW (18%) i NW (18%) struje. Morske struje su prikazane u oceanografskoj konvenciji, odnosno smjer struje označava smjer prema kojem se giba vodena masa. Svi ostali smjerovi strujanja u podpovršinskom i pridnenom sloju zastupljeni su s čestinom manjom od 13%.



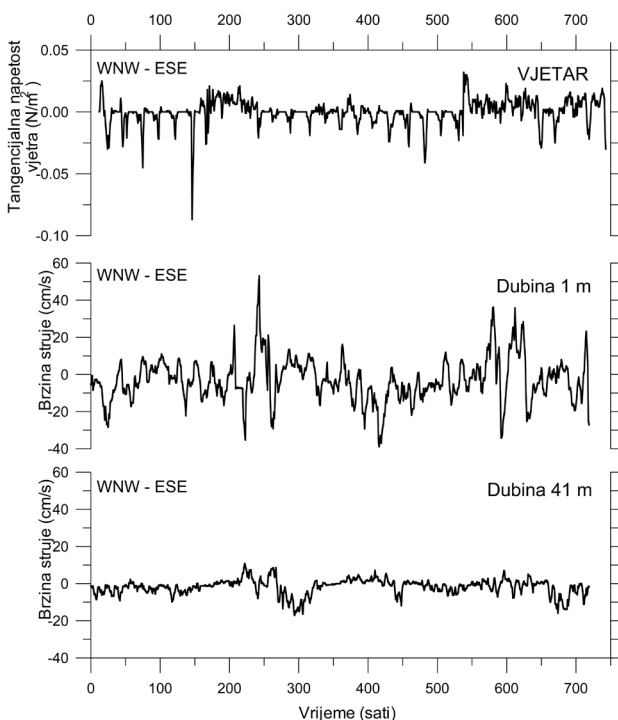
Slika 3. Ruža struja u podpovršinskom sloju ($d = 1$ m) na postaji ASS-1 za razdoblje od 29.06. do 29.07.1999. godine.



Slika 4. Ruža struja u pridnenom sloju ($d = 41$ m) na postaji ASS-1 za razdoblje od 29.06. do 29.07.1999. godine.

Na slici 5. prikazani su vremenski nizovi satnih vrijednosti komponenti morskih struja s najvećim energijama koje su paralelne s pružanjem obale (U_{p1} - podpovršinski sloj; U_{p41} - pridneni sloj) i izračunate tangencijalne napetosti vjetra V_{np} prema Wu (1982). Sve veličine prikazane su u oceanografskoj konvenciji. Vremenski niz vjetra je dug 744 sata ili 31 dan, dok su vremenski nizovi struja na 1 m i 41 m dugi 720 sati ili 30 dana. Tangencijalna napetost vjetra najveća je na dnevnom periodu (24 sata) iz smjera WNW iako ne prelazi 0.08 N/m^2 , što ukazuje na relativno slab vjetar koji nema značajan utjecaj na brzine struje na 1 m i 41 m dubine. Brzina struje U_{p1} u podpovršinskom sloju mijenja smjer uglavnom na dnevnom periodu s maksimalnom amplitudom od 50 cm/s (deseti dan mjerenja), ali nekoherentno s tangencijalnom napetošću vjetra. Za razliku od brzine struje u potpovršinskom sloju, brzina struje U_{p41} u pridnenom sloju ima male amplitude (manje od 17 cm/s) i mijenja smjer na periodima većim od jednog dana, što se prvenstveno odnosi na prvi tjedan mjerenja struja.

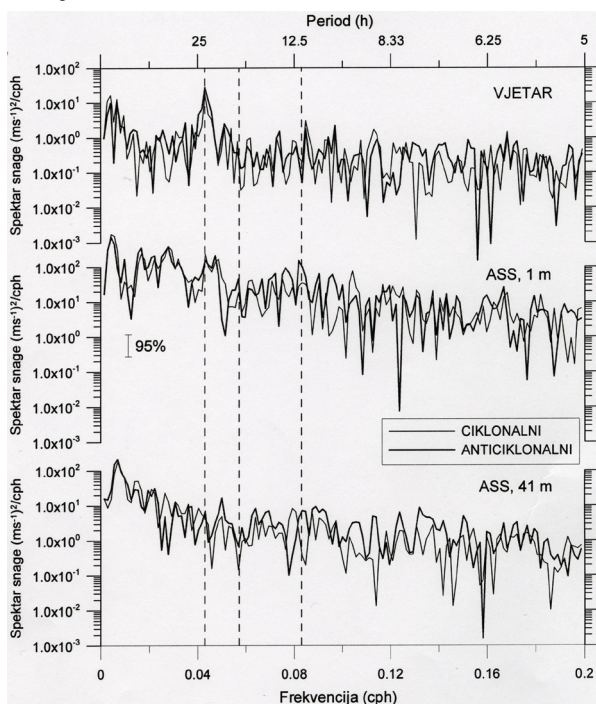
Vremenski nizovi komponenata struja okomitih na obalu (V_{o1} i V_{o41}) nisu prikazani, iako katkad njihov maksimum od 12 cm/s može biti značajan u transportu sitnih čestica suspendiranih u pridnenim slojevima morske vode



Slika 5. Vremenski niz tangencijalne napetosti vjetra u Opatiji i morskih struja u smjeru najveće varijance (energije) mjerenim na dubinama 1 m i 41 m na postaji ASS-1 u srpnju 1999. godine.

Rotacijska spektralna analiza

Rotacijski spektri za vjetar i morske struje prikazani su na slici 6. Kod svakog vremenskog niza eliminiran je linearni trend te je primijenjen Hammingov prozor, pa su rotacijski spektri izračunati upotrebom FFT metode s 12 stupnjeva slobode. Vjetar koji je puhao pretežno s kopna ima najveće energije oscilacija na dnevnom periodu i pokazuje tendenciju anticiklonalne rotacije. To je u skladu s rezultatima do kojih su došli Orlić i dr. (1988) primjenjujući rotacijsku spektralnu analizu na vjetrove koji pušu s mora i kopna mjerene na 6 meteoroloških stanica duž jadranske obale – od Pule do Dubrovnika. Podpovršinske struje (dubina 1 m) imaju najveće energije osciliranja na dnevnom periodu, ali s tendencijom ciklonalne rotacije, dok na inercijalnom (17.2 sata) i poludnevnom (12 sati) imaju tendenciju anticiklonalne rotacije. Pridnene struje (dubina 41 m) imaju tendenciju anticiklonalne rotacije na inercijalnom (17.2 sata) i plimnim periodima (24 i 12 sati), što je u skladu sa spoznajom o izlaznim pridnenim strujama iz Bakarskog zaljeva. Energije su im za oko red veličine manje od energija strujanja u podpovršinskom sloju, odnosno energija strujanja opada od površine mora prema dnu na svim periodima. Općenito, maksimumi energija osciliranja morskih struja su na periodima duljim od 24 sata.



Slika 6. Rotacijski spektri (ciklonalni i anticiklonalni) vjetra u Opatiji i morskih struja na postaji ASS-1 na dubinama 1 m i 41 m u Podurinu, srpanj 1999. godine.

Harmonička analiza

Harmoničkom analizom vjetra i morskih struja izdvojene su faze i amplitude harmoničkih komponenata s najvećom energijom, iz vremenskog niza satnih vrijednosti dugog 29 dana iza riječi na kraju pasusa, u tablici 3. dodati rečenicu: Navedene su samo one harmoničke konstante koje imaju svoje fizikalno porijeklo. Tako npr. dnevna (24 sata) komponenta vjetra vjerojatno je posljedica obalne cirkulacije, koja se očituje kao dnevna izmjena zamorca i kopnenjaka (maestralska i burina) dok porijeklo poludnevne komponente (12 sati) nije očito.

Tablica 3. *Glavne harmoničke komponente i parametri elipsa vjetra u Opatiji i morskih struja na lokaciji Podurinja izdvojeni harmoničkom metodom za razdoblje od 1. do 29. srpnja 1999. godine. INC = inklinacija elipse - kut u stupnjevimaj između velike osi elipse i x-osi (smjer E), pozitivan obrnuto od smjera kretanja kazaljke na satu; C = ciklonalna (pozitivna) rotacija, AC = anticiklonalna (negativna) rotacija.*

Komponenta	Frekvencija (cph)	Period (sati)	Vrsta opažanja	Velika os (cm/s)	Mala os (cm/s)	INC (st)	Faza (st)	Rotacija
S ₁	0.0416666	24.00	Vjetar	60.2	7.7	91	-100	AC
			ASS-1m	2.00	0.17	172	-169	AC
			ASS-41m	0.49	0.02	157	-130	AC
K ₁	0.0417807	23.93	ASS-1m	3.82	0.42	130	51	C
			ASS-41m	0.54	0.20	163	-19	AC
M ₂	0.0805114	12.42	ASS-1m	2.31	0.66	151	39	AC
			ASS-41m	0.66	0.09	7	-93	AC
S ₂	0.0833333	12.00	Vjetar	48.50	4.40	101	-21	AC
			ASS-1m	1.00	0.20	157	178	AC
			ASS-41m	0.32	0.15	114	-99	C

O₁ = Glavna Mjesečeva dnevna komponenta

K₁ = Deklinacijska lunisolarna dnevna komponenta

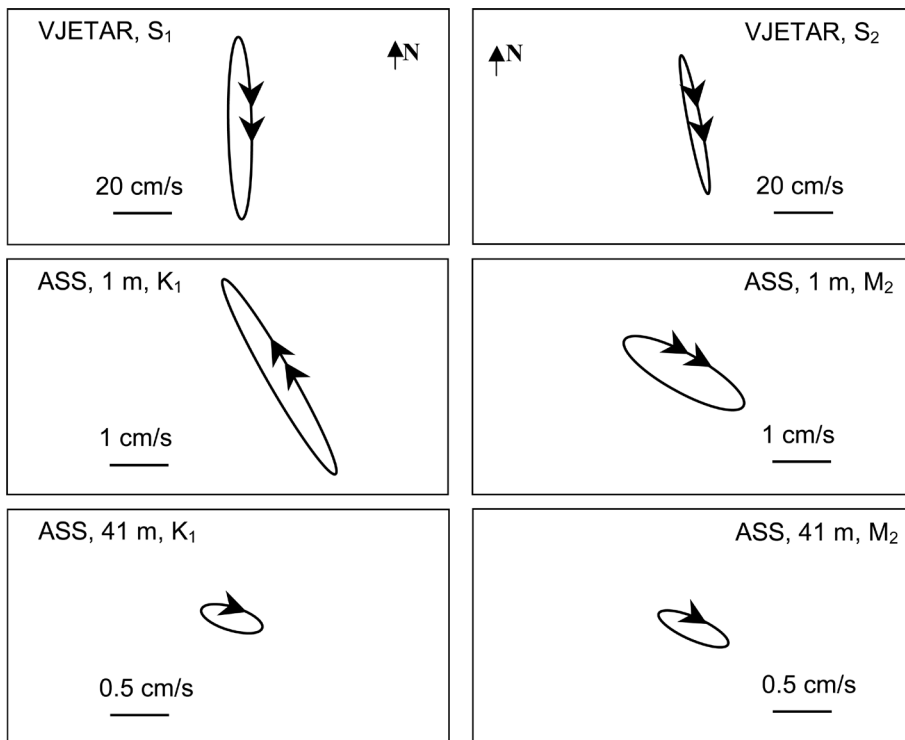
N₂ = Eliptična Mjesečeva poludnevna komponenta

M₂ = Glavna Mjesečeva poludnevna komponenta

S₂ = Glavna Sunčeva poludnevna komponenta

Za vjetar su najznačajnije harmoničke komponente S₁ (60.2 cm/s) na dnevnom periodu i S₂ (48.5 cm/s) na poludnevnom periodu s anticiklonalnom rotacijom. Harmoničke komponente morskih struja K₁ (3.82 cm/s, ASS-1, 1 m, C rotacija) i M₂ (2.31 cm/s, ASS-1, 1 m, AC rotacija) ukazuju da su struje morskih mijena općenito slabe u potpovršinskom sloju, a pogotovo u pridnenom sloju (manje od 1 cm/s, što je granica mjerenja AANDERRA RCM-7 strujomjera). To pokazuje da su veće energije strujanja na periodima duljim od 24 sata, kao što je vidljivo i iz rotacijske spektralne analize.

Primjeri elipsa vjetra i morskih struja mjenjenih na postaji ASS-1 prikazani su na slici 7. Iz slike se vidi da je velika os dnevnih K_1 elipsa struja u potpovršinskom sloju paralelna s izobatama i da rotira ciklonalno, dok vektor struja u pridnenom sloju ima anticiklonalnu rotaciju. Na dnevnom periodu S_1 vjetar za razliku od vektora struja K_1 u potpovršinskom sloju ima anticiklonalnu rotaciju.



Slika 7. Dnevne K_1 (lijevo) i poludnevne M_2 (desno) elipse vjetra u Opatiji i morskih struja na postaji ASS-1, na dubinama 1 m i 41 m.

4. Zaključak

Na temelju rezultata harmoničke i rotacijske spektralne analize mjerenja morskih struja u sjeveroistočnom dijelu Riječkog zaljeva u području Podurinja u ljetnoj sezoni na dvije dubine (1 m i 41 m) može se zaključiti:

- 1) Brzine struja u podpovršinskom sloju su oko 2.8 puta veće nego u pridnenom sloju i imaju oko 6. 2 puta veću energiju nego u pridnenom sloju. Maksimalna brzina struje u potpovršinskom sloju (56 cm/s) je oko 3 puta veća nego u pridnenom sloju (17 cm/s). Podpovršinske struje su gotovo uvijek WNW smjera, što je glavna značajka dinamike sjeveroistočnog dijela Riječkog zaljeva. Utjecaj vjetera na smjer struje nije bio značajan. Do sličnog zaključka su došli Leder et. al. (1998.) analizirajući mjerenja morskih struja u vremenskom razdoblju 1-13. 12. 1993. godine na dubinama 2, 25 i 50 metara na postaji koja je bila locirana oko 1 km južnije od postaje ASS-1.
- 2) Rotacijski spektri podpovršinskih struja ukazuju da su najveće energije oscilacija na dnevnom periodu s tendencijom ciklonalne rotacije, dok na inercijalnom (17. 2 sata) i poludnevnom periodu (12 sati) imaju tendenciju anticiklonalne rotacije. Pridnene struje (dubina 41 m) imaju tendenciju anticiklonalne rotacije na inercijalnom (17. 2 sata) i plimnim periodima (24 i 12 sati), što je u skladu sa spoznajom o izlaznim pridnenim strujama iz Bakarskog zaljeva. Energije su im za oko red veličine manje od energija strujanja u potpovršinskom sloju, odnosno opadaju od površine prema dnu na svim periodima.
- 3) Harmoničkom analizom vjetera i morskih struja izdvojene su faze i amplitude pet harmoničkih komponenata s najvećom energijom (O_1 , K_1 , N_2 , M_2 i S_2) iz vremenskog niza satnih vrijednosti dugog 29 dana. Harmoničke komponente K_1 (3.54 cm/s, ASS-1, 1 m, AC rotacija) i M_2 (2.13 cm/s, ASS-1, 1 m, C rotacija) ukazuju da su struje morskih mijena općenito slabog intenziteta u podpovršinskom sloju, a naročito u pridnenom sloju (manje od 1 cm/s, što je granica mjerenja AANDERRA RCM-7 strujomjera). To navodi na zaključak da su veće energije strujanja na periodima duljim od 24 sata.

Općenito se može izreći postavka da je dinamika strujanja u sjeveroistočnom dijelu Riječkog zaljeva u ljetnoj sezoni najvjerojatnije pod sveukupnim utjecajem izmjene vodenih masa između Riječkog zaljeva i Bakarskog zaljeva te Vinodolskog i Tihog kanala. Za detaljnija saznanja bilo bi potrebno obaviti dugoperiodička mjerenja morskih struja u ovim akvatorijima u svim sezonama, odnosno tijekom cijele godine.

Zahvala

Autori zahvaljuju svim djelatnicima Hrvatskog hidrografskog instituta koji su sudjelovali u terenskim mjerenjima oceanografskih parametara u srpnju 1999. godine kao i naručitelju studije HEP-u d.o.o Zagreb. Podatke satnih vrijednosti brzine i smjera vjetra ljubazno su ustupili djelatnici Državnog hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba na čemu im se srdačno zahvaljujemo.

Izvori

- Foreman, M. G. G., 1978. Manual for tidal currents analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, BC, pp.57.
- Gačić, M., Orlić M., Dadić V. and Karabeg M., 1982. Temporal variations of current field in Rijeka Bay, VIes Journees Etud. Pollutions, CIESM, Cannes, pp.165-171.
- Gonella, J. 1972. A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series, Deep-Sea Research, 19, pp.833-846.
- Jeftić et.al., 1977. Ekološka studija akvatorija Riječkog zaljeva, IRB, Zagreb.
- Jeftić et.al., 1979. Ekološka studija akvatorija Riječkog zaljeva, IRB, Zagreb.
- Jeftić et.al., 1982. Ekološka studija akvatorija Riječkog zaljeva, IRB, Zagreb.
- Leder N., 1992. Primjena spektralne analize, analize sistema i rotacione spektralne analize u oceanologiji i meteorologiji, Hidrografski godišnjak 1990-1991, 19-36.
- Leder N., Smirčić A. i Vilibić I., 1998. Neke karakteristike polja struja Riječkog zaljeva (NE akvatorij) - Komunikacija Riječkog zaljeva s Vinodolskim kanalom preko Tihog kanala, Prirodoslovna istraživanja Riječkog zaljeva, Zbornik radova, 213-221.
- Legović, T., Limić N. and Sekulić B., 1989. Reconstruction of a concentration field in a coastal sea, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 29, pp.217-231.
- Limić, N. and Orlić M., 1987. A method for the determination of absolute geostrophic velocities in the sea, Tellus, 39A, pp.82-94.
- Orlić, M., Penzar B. and Penzar I., 1988. Adriatic Sea and Land Breezes: Clockwise Versus Anticlockwise Rotation, Journal of Applied Meteorology, 27, pp.675-679.
- Mooers, C. N. K., 1973. A technique for the cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarised components and rotational invariants, Deep-Sea Research, 20, pp.1129-1141.
- Smirčić, T. and Ilić D., 1981. Some results of the current investigations in the Rijeka Bay by drift card experiments, Thalassia Jugoslavica, 17 (3/4), pp.177-196.
- WHISL-94. Data analysis functions for the WHISL Seapac series oceanic instruments. Version 1.0 for Matlab 4.0/4.2, November 1994.
- Wu J., 1982. Wind-Stress Coefficients Over Sea Surface From Breeze to Hurricane, Journal of Geophysical Research, 87, C12, pp.9704-9706.

Nenad Domijan
Hrvoje Mihanović
Nenad Leder
Zvonko Gržetić

Harmonic and Spectral Analysis of Current Measurements in the Northern Part of the Rijeka Bay

Summary

During July 1999 sea currents were measured at two depths in northern part of the Rijeka Bay (1 m and 41 m), using autonomous AANDERAA RCM-7 current meters. The purpose of the experiment was to determine characteristics of current field of a small region (around 1 km²), bounded by headland from the east and inlet Perilo from the west. The results of harmonic and rotational spectral analysis showed that the currents were WNW directed, with three times larger speeds in subsurface layer than in the near bottom layer. Significant current oscillations were detected at diurnal tidal period, with tendency for counterclockwise rotation. Secondary energy maxima were observed at inertial period (around 17.2 h) and semidiurnal tidal period (around 12 h), with tendency for clockwise rotation. This is in agreement with previous knowledge about near bottom output currents of Bakar Bay. Harmonic constituents K_1 and M_2 showed that tidal currents were weak in the subsurface layer, and even weaker in the near bottom layer. This leads to the conclusion that during the summer season the most energetic current oscillations exist at periods longer than 24 h.

Keywords: harmonics, rotary spectra, currents, Rijeka Bay.

Analisi armonica e spettrale delle correnti marine nella parte settentrionale del golfo del quarnero

Sommario

Nel corso di luglio del 1999 nello specchio d'acqua antistante il porto e il litorale ad est ed ovest della città di Fiume sono stati effettuati alcuni rilevamenti delle correnti marine a due profondità (1 m e 41 m) impiegando i misuratori autonomi AANDRAA RMC-7. Scopo della ricerca era stabilire le caratteristiche del campo di correnti in un area circoscritta (circa 1 km²) delimitata ad oriente dalla punta di Podurinj e ad occidente dall'insenatura Perilo. I risultati dell'analisi armonica e di rotazione spettrale dei rilevamenti dimostrano che il flusso delle correnti avviene prevalentemente in direzione WNW e che la massima intensità del flusso è di circa tre volte superiore nello strato sotto la superficie che nello strato del fondale. Nel periodo diurno della marea si sono registrate delle significative energie di oscillazione delle correnti, con tendenza di rotazione ciclonale. Dei massimi secondari di energia sono stati osservati nel periodo inerziale (circa 17.2 ore), e nel periodo semidiurno della marea (circa 12 ore), con tendenza di rotazione ciclonale. Questi rilevamenti sono in armonia con i dati già noti delle correnti del fondale in uscita dal Vallone di Buccari. Le componenti armoniche K_1 e M_2 delle correnti marine dimostrano che le correnti delle maree sono di bassa intensità negli strati sotto la superficie e che quelle del fondale risultano ancora più deboli. Tutto ciò ci porta a concludere che nella stagione estiva le massime energie di flusso accadono in periodi più lunghi di 24 ore.

Parole chiave: analisi armoniche, spettri rotatori, correnti marine, golfo del Quarnero.

