

PREGLED OCEANOGRFSKIH ISTRAŽIVANJA U KVARNERU I SUSJEDNOM PODRUČJU SJEVERNOG JADRANA

dr. sc. Damir Viličić, prof. emerit.

Sveučilište u Zagrebu,

Prirodoslovno matematički fakultet

Horvátovac 102A, Zagreb, Hrvatska

e-mail: damir.vilicic@biol.pmf.hr

U preglednom radu sažeta su oceanografska svojstva kvarnerskog akvatorija i susjednog dijela sjevernog Jadrana objavljena u najvažnijim znanstvenim radovima iz područja geologije, geofizike, kemije i biologije. Kvarner je relativno dubok akvatorij s razvedenom obalnom linijom. Pod jakim je utjecajem krških voda siromašnih hranjivim tvarima i sjevernog vjetrova – bure. Snažan i dugotrajan sjeverni vjetar (bura) zimi ugušćuje površinsku vodu koja jugozapadno od istarskog poluotoka, duž Istarske fronte, pridonosi stvaranju sjevernojadranske guste vode i pokretanju cirkulacije čitavog istočnog Sredozemlja. Jugozapadno od vrha istarskog poluotoka, Senjski ciklonalni vrtlog obogaćuje hranjivim tvarima područje uz vanjske kvarnerske otoke. U oligotrofnom moru Kvarnera velika je prozirnost vodenog stupca, a produktivna zona se ljeti pomiče s površine prema donjem dijelu eufotičkog sloja. U podmorju Kvarnera bogat je sastav bentosa i riba, a ističu se vrste glavoča od kojih su mnoge svojstvene sjevernom Jadranu.

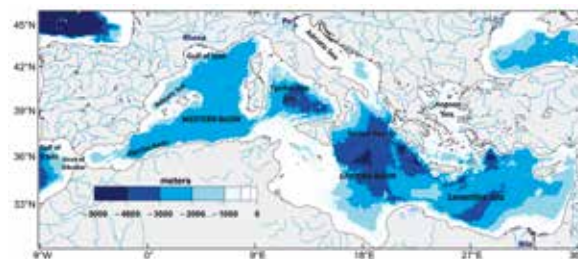
Ključne riječi: Riječki zaljev, Kvarner, oceanografija, bura, morski organizmi, Jadransko more.

1. UVOD

U ovom preglednom radu sažeti su rezultati istraživanja oceanografskih svojstava (iz područja geologije, geofizike, kemije i biologije) objavljeni u vodećim znanstvenim časopisima. Rad obuhvaća područje Kvarnera, ali i širi kontekst istočnog dijela Sredozemnog mora s kojim su procesi izravno povezani. Istaknuta su ključna istraživanja koja doprinose poznavanju ne samo mora nego i kopna, pri čemu vegetacijski pokrov regulira prekomjerno ispiranje tla te utječe na obogaćivanje mora hranjivim tvarima (prirodnu eutrofikaciju i produkciju organske tvari) i druge kemijske procese u moru (Viličić, 2014: 74-96; 2017).

Jadransko more pruža se u smjeru jugoistok – sjeverozapad (SE – NW) od oko 40 ° do 46 ° sjeverne zemljopisne širine (slika 1). Sa Sredozemnim je morem povezano preko Otrantskih vrata. Prema oceanografskim svojstvima podijeljeno je u tri bazena: sjeverni, srednji i južni (Cushman-Roisin i sur., 2001). Ciklonalnu cirkulaciju u Jadranu uzrokuju sjeverni vjetrovi, dotok voda rijekama koje se ulijevaju u sjeverni Jadran između Riminija i Trsta (Po, Brenta, Adige, Piave, Tagliamento, Soča) te ulazna

istočnojadranska struja s juga (Zore-Armanda i Gačić, 1987; Malanotte-Rizzoli i Bergamasco, 1989; Kuzmić, 1991; Orlić i sur., 1994; Gačić i sur., 2001; Poulain i Raicich, 2001; Kuzmić i sur., 2006; Jeffries i Lee, 2007; Viličić, 2014: 98-116).



Slika 1: Batimetrijska karta Sredozemnog mora (Sammartino i sur., 2022).

Tršćanski i Riječki zaljev na sjeveroistočnom dijelu Jadranskog mora najdublje su uvučeni u europski kontinent. Riječki je zaljev dublji i stoga pogodniji za promet najvećim brodovima (Randić, 2002). Za razliku od talijanske, hrvatska je obala Jadrana najrazvedenija na Sredozemlju nakon Grčke (Duplančić Leder i sur., 2004).

2. POVIJEST ISTRAŽIVANJA I PROJEKTI

Tršćanski i Riječki zaljev rano su povezani željeznicom. Nakon Austro-ugarske nagodbe (1867.) te Hrvatsko-ugarske nagodbe (1868.), Ugarska gradi pomorsku luku u Rijeci i željezničku prugu do Rijeke. Time sjeverni Jadran, Kvarner i istarski poluotok postaju pristupačniji mnogima iz Austro-Ugarske Monarhije. Usporedno s razvojem turizma, započinju i sustavna istraživanja mora (Zavodnik, 2002).

Oceanografska istraživanja u sjevernom Jadranu započela su samo dvije godine nakon čuvene, prve svjetske oceanografske ekspedicije broda *Challenger* (1872. – 1876.). Biološka istraživanja počela su pod političkim utjecajem Austro-Ugarske Monarhije i Italije. Organizirano je nekoliko ekspedicija brodovima austrijske mornarice: *Nautilus* (1874.), *Deli* (1875. – 1877.), *Hertha* (1880.) te talijanskim brodovima *Montebello* (1909.) i *Ciclope* (1910.). Rana biološka istraživanja usmjerila su se na bentoske životinje i kasnije isključivo na mrežni plankton (Casellato, 2008; Zavodnik, 2002), a odvijala su se pod vodstvom zooloških postaja u Trstu (osnovane 1876.) i Rovinju (1891.). Do 1925. godine organizirane su i ekspedicije prema srednjem i južnom Jadranu brodovima *Rudolf Virchow*, *Najade* i *Thor*, također američkim brodom *Atlantis* te nekoliko sovjetskih brodova.

U Kraljevini Jugoslaviji, 1930. godine, uspostavljen je Oceanografski institut u Splitu gdje su istraživanja proširena na srednji Jadran. Nakon Drugog svjetskog rata, oceanografska istraživanja na otvorenom moru provode se brodom *Andrija Mohorovičić* Hidrografskog instituta Jugoslavenske ratne mornarice u Splitu. Područje južnog Jadrana ostalo je znanstveno slabije istraženo sve do osnivanja Oceanografske stanice (1946.) i Biološkog instituta u Dubrovniku (1958.).

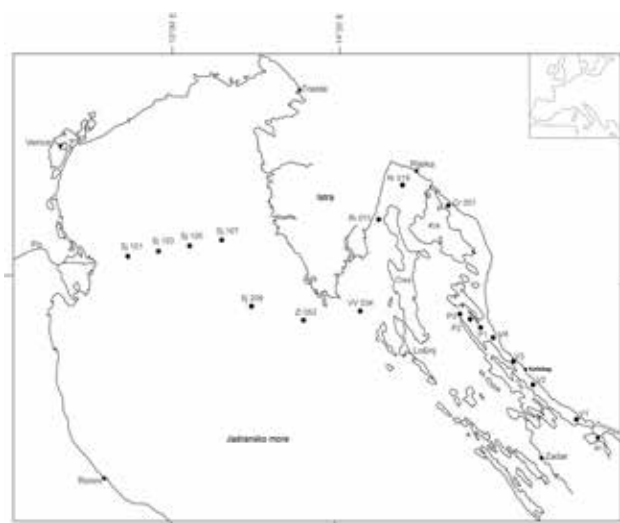
Godine 1947. Vlaho Cvić uvodi u Splitu bakteriološka istraživanja (Šolić, 2017). Mikrobiološki laboratorij i istraživanja uspostavljaju se na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu (Pavletić i sur., 1972), što pridonosi izobrazbi mikrobiologa za



Slika 3: Karta Kvarnera i postojeće vegetacije prema Bertoviću (1983). 1 – šume i šikare s hrastom meduncem; 2 – kamenjarski travnjaci; 3 – makija s hrastom crnikom; 4 – šume hrasta medunca i crnog graba; 5 – bukove šume.

znanstvene institucije u Hrvatskoj. Potpunija istraživanja u Kvarneru provodila su se brodom *Vila Velebita* i kasnije u Riječkom zaljevu, kada se planirala izgradnja naftnog terminala u Omišlju na otoku Krku uz izradu ekološke studije (Jeftić, 1977). Tom studijom okupljaju se različiti timovi znanstvenika koji će kasnije ostvariti naprednija oceanološka istraživanja na Jadranu. Procijenjena su temeljna ekološka i biološka svojstva Kvarnera (Degobis i sur., 1978; Škrivanić i Barić, 1979; Štević, 1979; Zavodnik i sur., 1981; Fuks, 1979; Smolaka, 1983). Razvijaju se matematički modeli za procjenu cirkulacije Riječkog zaljeva (Legović i sur., 1977, 1989; Legović, 1982; Limić i Orlić, 1987; Orlić i Kuzmić, 1980; Lončar i sur., 2011). Toksikološka istraživanja prate zagađenje zraka (Alebić-Juretić, 1994) i sedimenta (Valković i sur., 2007), a mikrobní indikatori upućuju na utjecaj metala, organometalnih spojeva (Ramljak i sur., 2024) i drugih parametara (Perić i sur., 2012). Modeliranjem cirkulacije procjenjuje se mogući prijenos zagađivača u moru (Ivić i sur., 2017). Istražuju se fizičko-kemijska svojstva organskih molekula u moru elektrokemijskim metodama (Čosović i sur., 1985).

Nakon Studije o Riječkom zaljevu, najvažniji objavljeni rezultati relevantni za kvarnersko područje dobiveni su tijekom istraživanja od ušća rijeke Po do Riječkog zaljeva i Vinodolskog kanala (slika 2) u okviru Sustavnog istraživanja Jadranskog mora i održivog razvitka Republike Hrvatske (projekt Jadran) Ministarstva znanosti Republike Hrvatske (1998. – 2010). Također započinju istraživački projekti Ministarstva znanosti od kojih sam dva –



Slika 2: Istraživačke postaje u okviru Nacionalnog monitoringa Jadranskog mora (profil Po - Crikvenica) u razdoblju 1998. – 2010. i projekata Ministarstva znanosti u Velebitskom i Paškom kanalu u razdoblju od 1996. do 2011. godine. Crtež D.Viličić.

duž Velebitskog i Paškog kanala (1996. – 2011.) osobno vodio (slika 2). U radu se također citiraju rezultati ostalih projekata i istraživača financiranih iz različitih nacionalnih i međunarodnih izvora,

Kvarner u širem smislu obuhvaća područje između istarske obale i Vinodolskog i Velebitskog kanala do Karlobaga u visini grada Paga na otoku Pagu (slika 3). Razlikujemo najsjevniji 1) Riječki zaljev koji se nastavlja na 2) Kvarner u užem smislu (područje između Istre i otoka Cresa do vanjskih otoka Unije, Susak), 3) Kvarnerić (akvatorij između otoka od kojih su veći Krk, Cres, Lošinj, Rab, Pag), 4) Paški kanal, koji se proteže od Velebitskog kanala do vanjskih otoka (Silba, Olib, Ilovik i Premuda). Riječki zaljev je relativno zatvoren akvatorij površine 449 km² s dubinom koja doseže 65 m. Na istoku ga ograničava otok Krk, koji se približava kopnu na udaljenost od svega 500 m kod Jadranova, a između Krka i kopna nalazi se uski Tihi kanal koji povezuje Riječki zaljev s Vinodolskim kanalom.

3. GEOMORFOLOŠKA, GEOFIZIČKA, GEOKEMIJSKA I BIOLOŠKA SVOJSTVA

3.1. Geomorfologija i geotektonika

Geomorfologija Jadranskog pojasa i Kvarnera zadana je događanjima u geološkoj prošlosti, najviše u mezozoiku (Herak, 1984). Na hercinskoj osnovi leži terigeni donji trijas, zatim slijedi karbonatni srednji i gornji trijas s pojavama vulkanizma. Jura i kreda sastoje se uglavnom od vapnenaca i dolomita, mjestimično s anhidritom koji je vjerojatno utisnut iz starije podine pri subdukciji. Paleogen se sastoji od vapnenaca i karbonatnog fliša. Sintektonska i Jelar-formacija koja se sastoji uglavnom od krupnozrnatih klastita, nastala je dalekim transportom iz visokog krškog područja (konglomerati) ili unutar više zona subdukcije jadranske ploče pod vanjske Dinaride (breče), što se nalazi na otocima (Krk, Prviću) te od Podgorja do viših dijelova Velebita (slika 4). Fliš se sastoji od lapora, pješčenjaka, konglomerata i breča, a nalazi se ne samo u priobalnom i otočnom pojasu, nego i unutrašnjosti karbonatne platforme. Različite je starosti i izložen je tangencijalnoj tektonici. Južnije u Hrvatskoj klastiti su poznati kao Promina-formacije.

Snažna interakcija između Dinarida i jadranske karbonatne platforme u kasnoj kredi uzrokovala je dramatične geološke događaje (Špelić i sur., 2021). Kvarner je područje u kojem su zanimljiva geološka svojstva i

geotektonika (Palenik i sur., 2019; Marjanac i Marjanac, 2007; Korbar i sur., 2020) i krška hidrologija (Hertelendi i sur., 1997; Mance i sur., 2014; Bonacci i sur., 2017). Veći dio obale čine karbonatne stjenovite i manjim dijelom silikoklastične (flišne) stijene (Aljinović i sur., 2010; Benac i sur., 2013).

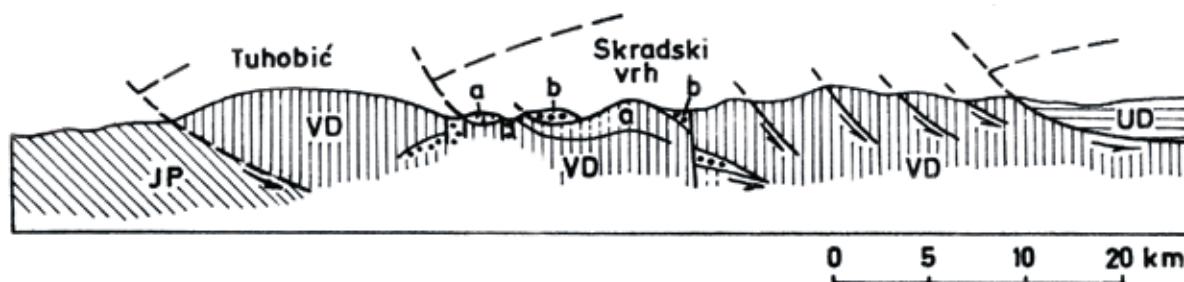
Današnji oblik kvarnerske obale prvenstveno je rezultat kemijskog i biološkog trošenja reljefa u pleistocenu (Schneider, 1976; Juračić i sur., 2009), djelovanjem leda (Marjanac i Marjanac, 2016), iznenadnim događajima kao što su klizišta (Jagodnik i sur., 2020; Benac i sur., 2023) ili udari asteroida (Marjanac i sur., 2004). Promjene razine mora dokumentirane su istraživanjima podmorskih špilja (Surić i sur., 2009) te plimnih i valnih potkapina (Benac i sur., 2004, 2008, 2019, 2022; Pikelj i sur., 2009; Marriner i sur., 2014. Stiros i Moschas, 2012; Aljinović i sur., 2010).

3.2. Meteorologija i razina mora

Sjeverni vjetar, bura, je najvažnija meteorološka pojava u Kvarneru kojom su se bavili mnogi domaći i strani istraživači (Yoshino, 1976; Smith, 1987; Klemp i Durran, 1987; Orlić i sur., 1988; Dorman i sur., 2006). Meteorološka istraživanja počeo je Andrija Mohorovičić u vrijeme kad je bio predavač matematike, fizike i meteorologije u Kraljevskoj nautičkoj školi u Bakru. Tada je objasnio atmosferski rotor nad Velebitom (Mohorovičić, 1889), a na taj zaboravljeni rad i aktualan atmosferski proces podsjećaju kasnije Grubišić i Orlić (2007).

Godišnja količina oborine u zaleđu Riječkog zaljeva prelazi 3 000 mm na nadmorskim visinama iznad 100 m, a kratkotrajne maksimalne vrijednosti oborine dostižu 46 mm na sat (Gajić-Čapka i sur., 2003). Najveće su količine izmjerene na mjernim postajama Platak, Snježnik i Risnjak (3473 – 3648 mm) (Knežević, 1998). Najveći izvor slatke vode je rijeka Rječina s dotokom vode od 10 do 50 m³ s⁻¹ (Mrša Haber i sur., 2018). U Riječkom zaljevu i u Vinodolskom kanalu nalazi se mnogo podmorskih izvora (vrulja) (Benac i sur., 2003), a podzemna cirkulacija ovisi o režimu oborina i hidrološkom ciklusu (Bonacci i sur., 2017).

Razina mora ovisi o rasponu plime i oseke, vjetrovima, atmosferskom tlaku, lokalnim razlikama u gravitaciji, temperaturi, salinitetu, statusu zaleđenosti Zemlje. Razina mora mijenjala se u daljoj (Haq i Schutter, 2008) i bližoj geološkoj prošlosti (Scambos i



Slika 4: Shematski prikaz osnovne tektonske građe od sjevernog hrvatskog primorja do Karlovca prema Heraku (1984). JP – jadranski pojas, VD – vanjski Dinaridi, UD – unutrašnji Dinaridi. Točkasto: navlaka paleozojskih i trijaskijskih klastita u Gorskom kotaru.



A



B

Slika 5: Anticiklonalna (A) i ciklonalna (B) bura u Velebitskom kanalu (Foto D. Viličić)

Abdalati, 2022). U sjevernom Jadranu važna je uloga bure u određivanju razine mora (Kuzmić i sur., 2006). Mareografska postaja u Bakru izgrađena je 1929. godine, a kontinuirano mjeri morsku razinu od 1949. godine (Međugorac i sur., 2022). Satni podaci pružaju podršku za simulacije oceanografskih procesa i za procjenu numeričkih modela. U kolovozu 2006. zabilježen je seš u Bakarskom zaljevu (Šepić i sur., 2008).

3.3 Život na kopnu

Klimatska svojstva primorskih padina pod Velebitom ne dopuštaju razvoj vazdazelene vegetacije (Horvatić, 1963; Surina, 2014). Vegetaciju na kvarnerskim otocima čine uglavnom šume hrasta medunca, manje makija s crnikom i različiti tipovi kamenjarskih travnjaka (Bertović, 1983). Makija s crnikom je prvi degradacijski stadij sredozemnih šuma crnike, a na kvarnerskim otocima ju nalazimo isključivo na zaštićenim dijelovima Raba, Lošinja i Paga (Horvatić, 1963). Prirast vegetacije je brži u našem sjevernom i južnom priobalju (Bertović i Lovrić, 1985), gdje padne više oborina nego u srednjem dijelu Jadrana (Zaninović i sur., 2008) i gdje je povoljniji odnos između količine oborine i evaporacije (Pleško, 1983). Kopnena vegetacija sprječava prekomjernu eroziju, a tlo koje oborina ispire važan je regulator ekoloških svojstava priobalnog mora (Viličić, 2017).

3.4. Termohalina svojstva, gustoća, cirkulacija i biološka svojstva mora

Utjecaj kontinenata koji okružuju europsko Sredozemlje i dotok kopnenih voda regulira raspodjelu termohalinih svojstava i produkcije u Sredozemnom moru (Coll i sur., 2010).

Salinitet sjevernog Jadrana je manji, a koncentracije hranjivih tvari su veće (Degobbis i Gilmartin, 1990; Zavatarelli i sur., 1998). Voda iz rijeke Po otječe južno od ušća i stvara Zapadnojadransku obalnu struju (WACC) (Orlić i sur., 1992; Zavatarelli i sur., 2002). Veliku količinu suspendiranog materijala struja odnosi uz obalu pokrajine Emilia-Romagna (Ravaioli i sur., 2003). Suspendirane čestice i fitoplankton smanjuju prozirnost vodenog stupca (Berthon i Zibordi, 2004). Povećana

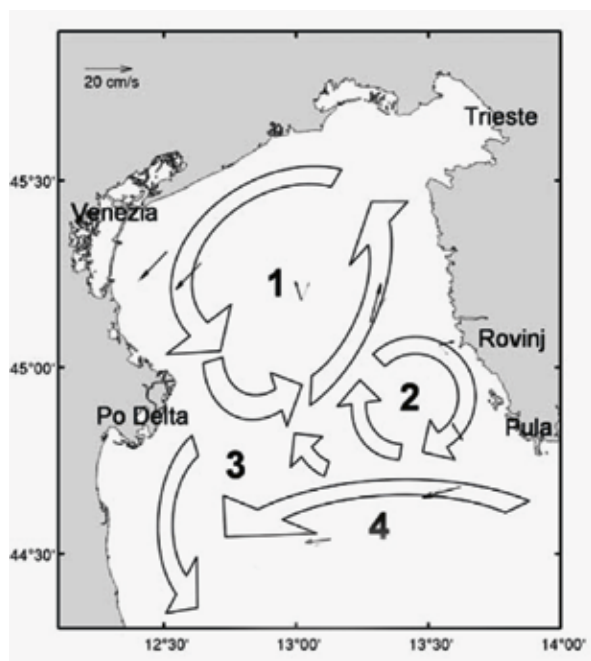
količina otopljene i partikulatne organske tvari često dovodi do distrofije – prekomjerne mikrobne potrošnje kisika i anoksije pridnenih slojeva (Legović i Justić, 1997). Autohtona organska tvar - koju oslobađa fitoplankton agregira se u makroagregate (Degobbis i sur., 1995).

Zimi su sjeverniji dijelovi Sredozemnog mora, pogotovo plićeg sjevernog Jadrana, najhladniji, a topljenje snijega u Alpama i pojačan dotok vode rijekama smanjuju salinitet u proljeće (Iona i sur., 2018).

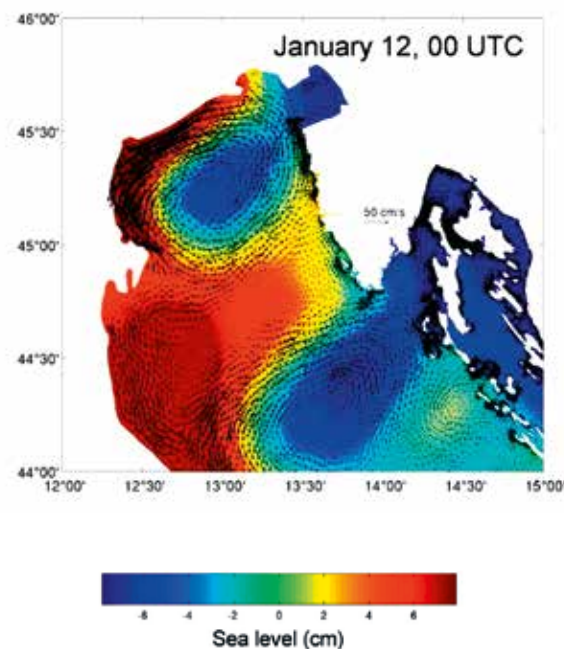
Cirkulaciju sjevernog Jadrana velikim dijelom pokreću vjetar, dotok slatkih voda i izmjena vode u Otrantskim vratima (Poulain i Raicich, 2001; Gačić i sur., 2001).

Bura je snažan vjetar koji se javlja zbog razlike u tlakovima između istočnoeuropskog kontinenta i Jadrana odnosno, kako objašnjavaju Penzar i sur. (2001: 127 – 128), na prednjem kraju anticiklone kad se njezino središte nalazi zapadno od naše obale (suha bura) (slika 5A). Ako se bura stvara na stražnjem kraju ciklone čije je središte južnije i istočnije od naše obale, uz veću vlagu nastaje orografski oblak (mračna bura) nad Velebitom i vrijeme je kišno. Pri spuštanju niz obronke Velebita brzina vjetra se pojačava (slika 5B).

Kinetička energija vode rijeke Po i bura stvaraju nekoliko tipova vrtloga na sjevernom Jadranu (Zore-Armanda i Gačić, 1987; Kuzmić 1991; Orlić i sur., 1994; Paklar i sur., 2001; Pullen i sur., 2003; Kuzmić i sur., 2006). Bura je zimi heterogeno raspoređena; vjetar nad Istrom je relativno slabiji nego nad Tršćanskim i Riječkim zaljevom. Zbog toga se površinska morska struja širi od ušća rijeke Po uz vjetar prema istoku do obale Istre i prenosi vodu obogaćenu hranjivim tvarima između južnog kraka Tršćanskog ciklonalnog vrtloga i sjevernog kraka Rovinjskog anticiklonalnog vrtloga (slika 6A). Kratki i nagli dotok vode rijekom Po može ljeti stvoriti jezičastu advekciju površinske vode bogatije hranjivim tvarima i fitoplanktonom od ušća rijeke Po prema Istri (Viličić i sur., 2013). U takvim okolnostima može se formirati Istarska obalna protustruja - uz istarsku obalu od sjevera prema jugu (Supić i sur., 2000). Pritisak bure i opisana cirkulacija reguliraju razinu mora, a zakretanje Istočnojadranske obalne struje (EACC) od vrha Istre prema talijanskoj obali ojačava stvaranje Senjskog ciklonalnog vrtloga (slika 6B).



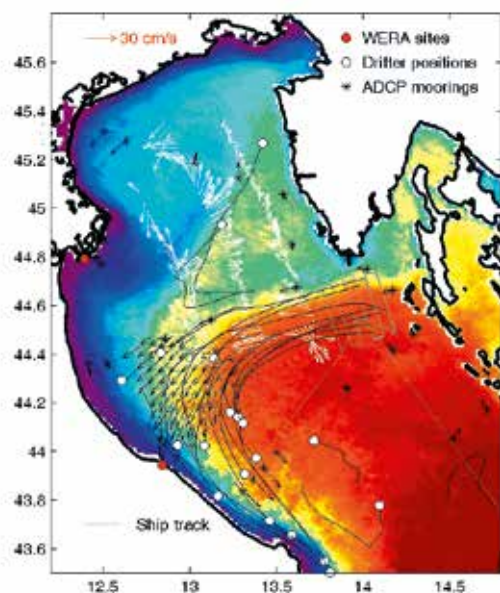
A



B

Slika 6: Djelovanje bure na stvaranje vrtloga (A) i na razinu mora u sjevernom Jadranu (B) u siječnju 2002. g. 1 – Tršćanski vrtlog, 2 – Rovinjski anticiklonalni vrtlog, 3 – bočata voda iz rijeke Po, 4 – sjeverni krak Senjskog vrtloga (Kuzmić i sur., 2006)

Južni krak Senjskog vrtloga prenosi sjevernojadransku vodu obogaćenu nutrijentima i veću količinu fitoplanktona od zapadne obale prema vanjskim kvarnerskim otocima (Viličić, 1991). Povećana biomasa fitoplanktona privlači zooplankton, koji usmjerava protok ugljika i energije prema višim članovima hranidbene mreže (Kršinić, 1995), pa su takva područja također bogatija ribom.

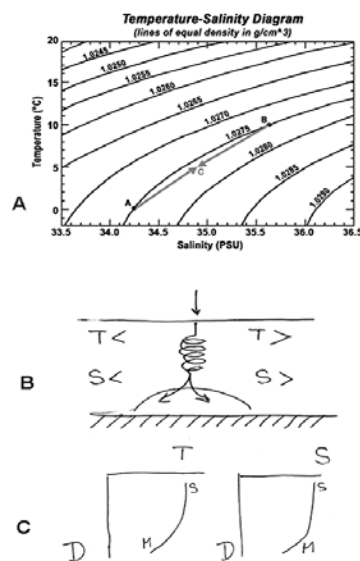


Slika 7: Istarska fronta dijeli površinske vode s različitom temperaturom u veljači 2003. g. za vrijeme ekspedicije brodom *Knorr*. Raspon temperature izmjerene satelitom je 6 °C do 16 °C (Jeffries i Lee, 2007). Ucrtno je šest poprečnih profila kroz frontu uz vrh istarskog poluotoka.

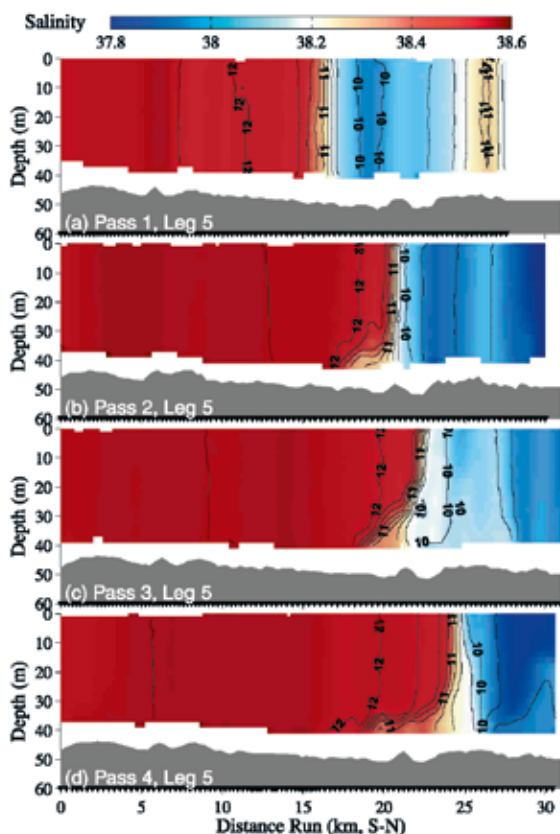
Jaki zimski udari hladne i suhe bure (Grubišić, 2004; Grisogono i Belušić, 2009) mogu značajno povećati apsorpciju energije iz mora (Supić i Orlić,

1999; Mihanović i sur., 2013). Ekspedicija američkim istraživačkim brodom *Knorr* u Jadranskom moru u veljači 2003. godine za vrijeme dugotrajne i jake bure, otkrila je izrazito jaku frontalnu zonu široku nekoliko stotina metara na potezu od vrha Istre prema talijanskoj obali – istarsku frontu (Lee i sur., 2005; Kokkini i sur., 2017) (slike 7, 9).

Miješanjem dvaju vodenih tipova s različitom temperaturom (T) i salinitetom (S) s obje strane fronte stvara se voda veće gustoće (slika 8A). Gušća površinska voda tone uz frontu (slika 8B), a kako bura slabi, uz donji dio fronte nakuplja se gusta voda (slika 8 BC).



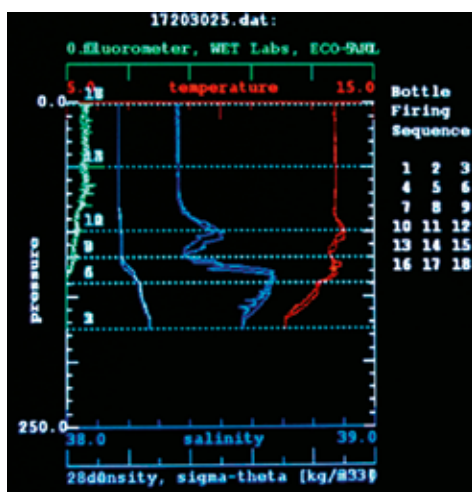
Slika 8: Ugušćivanje i tonjenje površinske vode na Istarskoj fronti. A – dijagram temperatura- salinitet (T-S) s linijama iste gustoće (izopiknama) (prema Thomu i Rickenu, 2019). B – miješanje površinske hladnije i zaslađene vode sa sjeverne strane i toplije i slanije vode s južne strane Istarske fronte, tonjenje površinske vode nakon ugušćivanja burom i nakupljanje gušće vode (s većom masom – M) u pridnom sloju (B, C), u veljači 2003. Crteže je izradio Mirko Orlić na terenu. T – temperatura, S – salinitet, D – gustoća.



Slika 9: Četiri vertikalna presjeka kroz Istarsku frontu u veljači 2003 pokazuju gradijent saliniteta (u bojama) i temperature (s označenim numeričkim vrijednostima) (Peters i sur., 2007). Presjeci 1 do 4 odnose se na prva četiri profila na slici 7, slijeva na desno.

Konvektivno miješanje vode uz Istarsku frontu s turbulencijom kroz cijeli vodeni stupac mjereno je duž četiri paralelna profila okomita na frontu (slika 9).

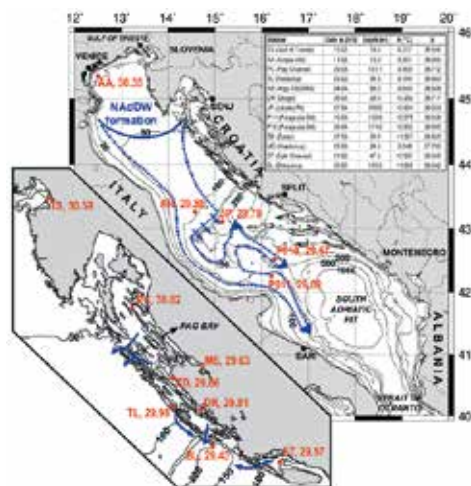
Gusta voda stvorena na opisani način širi se uz dno i postupno tvori sjevernojadransku gustu vodu (NAdDW). Vertikalnim profiliranjem je potvrđeno da NAdDW u struji prema južnom Jadranu popunjava pridnene slojeve Jabučke kotline (slika 10).



Slika 10: Gusta, slana i hladna voda u pridnenom sloju Jabučke kotline. Mjerenje do dubine 180 m, a dubina je označena tlakom u vodenom stupcu. Istraživanje brodom Knorr u veljači 2003. godine (Foto s laboratorijskog monitora D. Viličić)

Ugušćivanje površinskog sloja i stvaranje NAdDW odvija se i drugdje u sjevernom Jadranu gdje je najučestalije dugotrajno djelovanje bure, kao npr. u Tršćanskom zaljevu, u Riječkom zaljevu i Paškom kanalu zimi 2012. godine (Mihanović i sur., 2018; Vilibić i sur., 2018) (slika 11). NAdDW pridonosi pokretanju

termohaline jadransko-jonske cirkulacije (Orlić i sur., 2006; Vilibić i sur. 2013; Gačić i sur., 2014), čime su direktnim mjerenjima potvrđene ranije spoznaje (Robinson i sur., 1992). Snažan gradijent gustoće uz Istarsku frontu potvrđen je i za vrijeme zimske bure 2015. godine (Kokkini i sur., 2017).



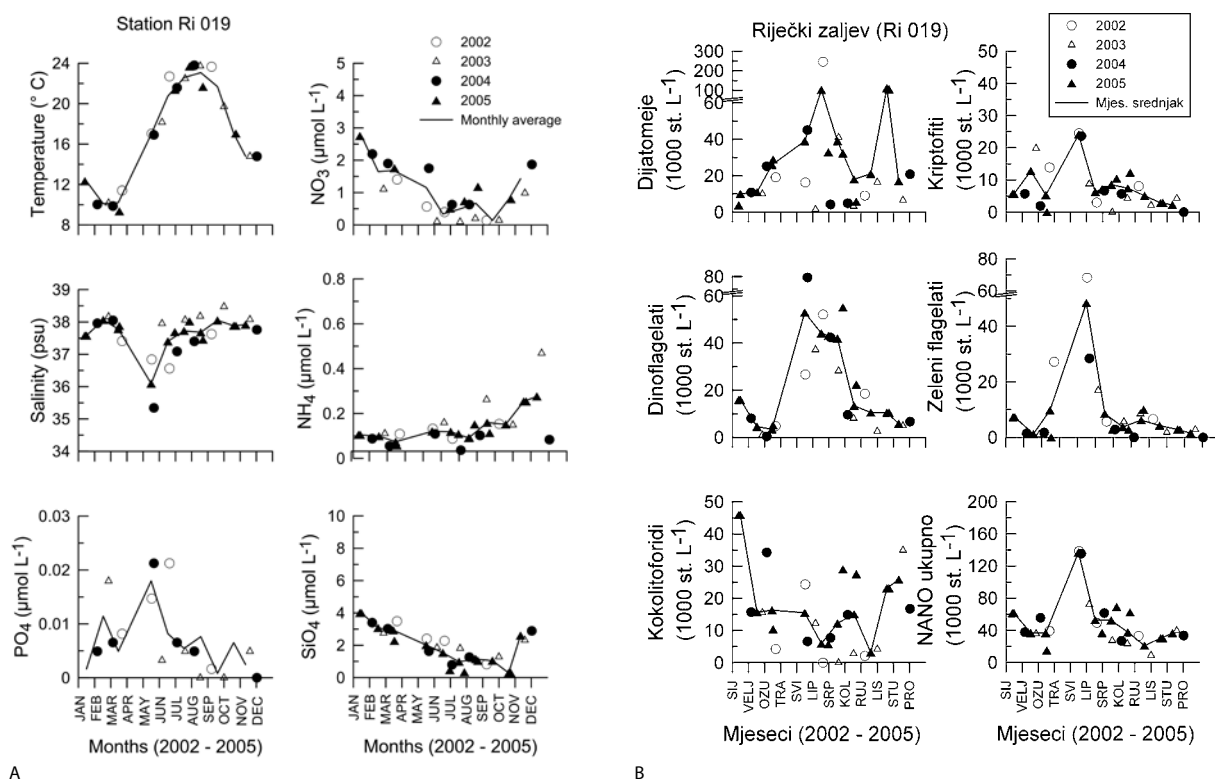
Slika 11: Dugotrajna i jaka bura zimi 2012. godine stvara gustu sjevernojadransku vodu koja se uz dno kreće prema jugu, popunjavajući Jabučku kotlinu i Južnojadransku kotlinu (Mihanović i sur., 2013).

Numerički modeli pokazuju da će zbog klimatskih promjena u 21. stoljeću usporiti stvaranje duboke guste vode u istočnom Sredozemlju (Parras-Berocal i sur., 2023), a da bi se zimska cirkulacija sjevernog Jadrana mogla izolirati od cirkulacije u ostatku Jadrana (Supić i sur., 2024).

Strujanje u svim dijelovima Kvarnera ovisi o općoj cirkulaciji u Jadranskom moru (Orlić i sur., 1992) i regulirano je vjetrovima (Orlić i sur., 1994), posebice burom (Penzar i sur., 2001; Lee i sur., 2005), kao i dotokom slatkih voda (Leder i sur., 1998). Hidrografske prilike uvelike ovise o dotoku podzemnih voda vruljama (Orlić i sur., 2000).

Bura odnosi površinski sloj morske vode iz Riječkog zaljeva kroz Srednja vrata (prolaz između Cresa i Krka) i Vela vrata (prolaz između Kvarnera i Riječkog zaljeva), dok u dubljim slojevima ulazi u zaljev duboka hladna voda (Legović i sur., 1989). Kod jugoistočnog vjetera (juga) situacija je obrnuta: toplija površinska voda ulazi u zaljev kroz Srednja i Vela vrata, dok hladnija pridnena morska voda izlazi iz zaljeva (Mrša Haber i sur., 2018). U slučaju bezvjetrice brzina strujanja na površini ne slijedi neki određeni obrazac, dok kretanje u slojevima dubljim od 12 m pokazuje dominantno strujanje od zapadne obale otoka Krka prema istočnoj obali istarskog poluotoka.

Krške vode koje vruljama ulaze u more sadrže malu količinu hranjivih tvari, što Riječkom zaljevu daju oligotrofna obilježja (Viličić i sur., 2008b; 2006) (slika 12A). Mikrofitoplankton u kojem dominiraju alge

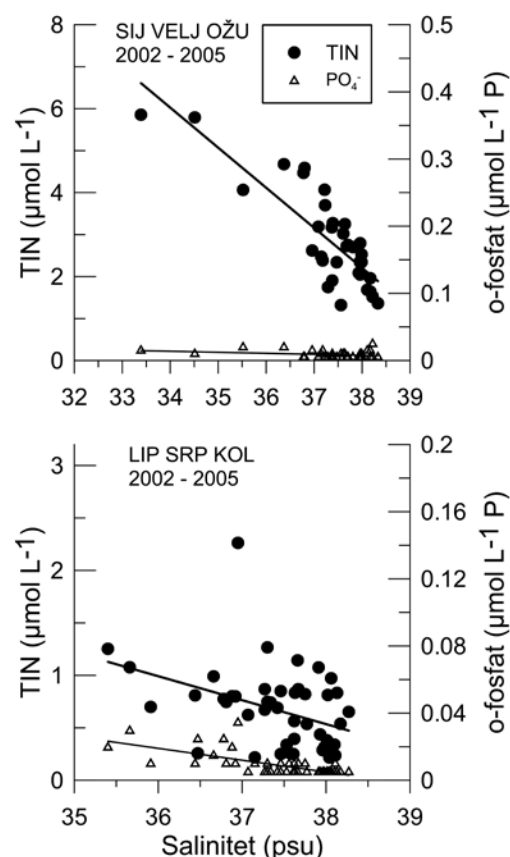


Slika 12: Sezonske varijacije abiotičkih čimbenika i fitoplanktona u Riječkom zaljevu u razdoblju od 2002 do 2005. godine; termohalinih svojstava i koncentracije hranjivih soli (A) te abundancije različitih taksonomskih i veličinskih kategorija fitoplanktona (B). Prema podacima Nacionalnog monitoringa Jadranskog mora u razdoblju 1998. – 2010. (Viličić i sur., 2006).

kremenjašice (diatomeje) razvija se u proljeće kada ima više hranjivih tvari. Nanoplankton (kriptofiti, dinoflagelati, kokolitoforidi i drugi bičasti) dominira za vrijeme oligotrofnog ljeta. Razvoj fitoplanktona uglavnom je prisutan u površinskom sloju (0 – 10 m). Pojava kriptofita pozitivno je i značajno korelirana s dinoflagelatima, što ukazuje na njihov metabolički mutualizam (miksotrofni potencijal) u oligotrofnim ljetnim uvjetima. Nisku ljetnu koncentraciju ortofosfata i ukupnog anorganskog dušika (često manja od 0,01 odnosno 0,1 $\mu\text{mol L}^{-1}$), prati mala abundancija diatomeja (manja od 5×10^5 stanica L^{-1}) i dinoflagelata (manje od 5×10^3 stanica L^{-1}) (slika 12B). Cvjetanje mora događa se rijetko i u oligotrofnom Velebitskom kanalu sastoji se od diatomeja iz roda *Pseudo-nitzschia* (Burić i sur., 2008), koje povremeno sintetiziraju toksine (Arapov i sur., 2020).

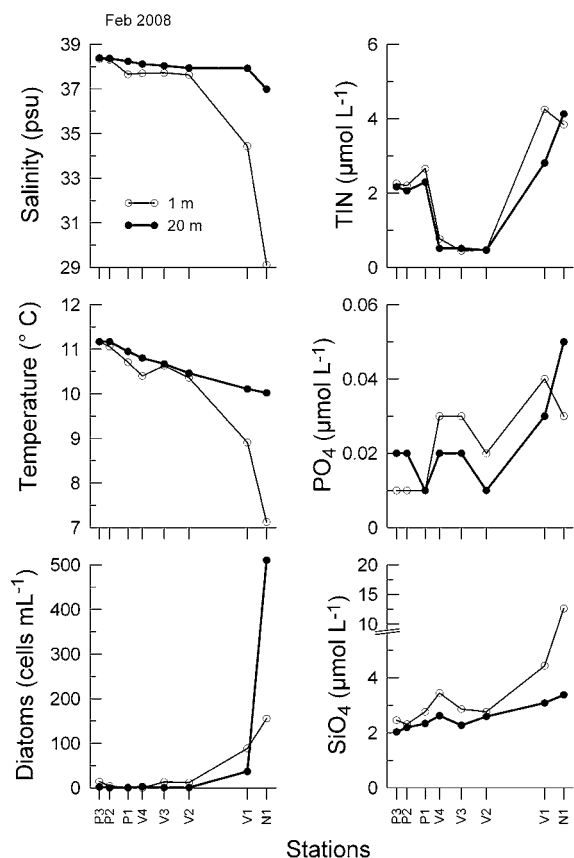
Fosfor najčešće ograničava razvoj fitoplanktona (Vukić Lušić i sur., 2008). Značajna korelacija između nitrata i silikata pokazuje da je područje pod znatnijim utjecajem slatkih voda s kopna. Ograničenost rasta fitoplanktona uz nedostatak fosfora u Riječkom zaljevu i u Vinodolskom kanalu prisutna je ljeti i zimi (Viličić i sur., 2006) (slika 13). U uvjetima limitiranosti fosforom stanice fitoplanktona nakupljaju enzim alkalnu fosfatazu (za apsorpciju fosfora) (Ivančić i sur., 2016), a vrste s manjim stanicama sadrže više fosfolipida (Gašparović i sur., 2023).

Jedini povećan, ali još uvijek slab izvor hranjivih tvari za kvarnersku regiju jest rijeka Zrmanja koja obogaćuje Velebitski kanal tako da postoji gradijent svih parametara koji indiciraju eutrofikaciju, od unutrašnjosti Velebitskog kanala prema Paškom kanalu (Viličić i sur.,



Slika 13: Nutrijenti (ukupni dušik i ortofosfati) koji ograničavaju rastenje fitoplanktona kod bilo kojeg saliniteta u Riječkom i Vinodolskom kanalu, zimi i ljeti. Najniže linije trenda pokazuju da ortofosfati ograničavaju rast autotrofnog planktona. Prema podacima Nacionalnog monitoringa Jadranskog mora u razdoblju 1998. – 2010.

2008a., 2009; Šupraha i sur., 2011.) (slike 14, 15). Relativno mala abundancija cilijata također pokazuje nisku fazu produkcije.



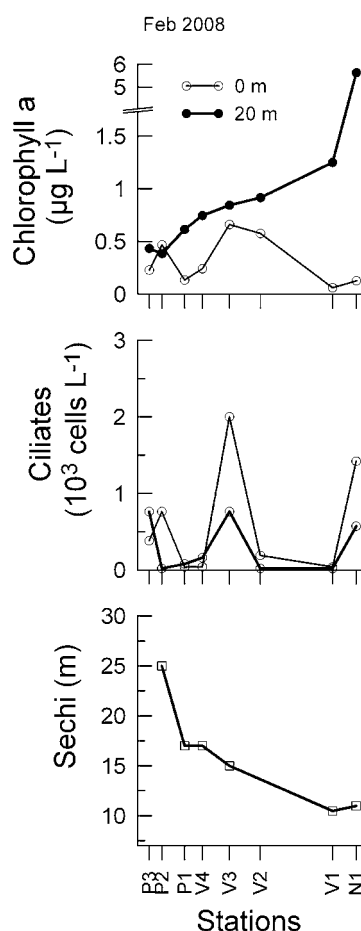
File: ZR 02/ZRM PAG VEL Feb08 slike/Long Feb08 0 m 20 m 1A

Slika 14: Gradijent temperature, saliniteta, koncentracije ukupnog anorganskog dušika (TIN), ortofosfata (PO₄), ortosilikata (SiO₄) i abundancije dijatomeja duž Velebitskog i Paškog kanala u veljači 2008. (Viličić i sur., 2009). Položaj postaja pokazuje slika 2.

Za oligotrofne vode Kvarnera svojstvena je mala količina fitoplanktona pogotovo ljeti, kada se produktivna zona pomiče prema donjem sloju eufotičkog sloja. Karakterističan je maksimum biomase fitoplanktona (koncentracije klorofila) koju čine stanice pikoplanktona jer je primarna proizvodnja omogućena tek u dubljim dijelovima vodenog stupca gdje raste količina hranjivih tvari, a svjetlosti je dovoljno za razvoj najmanjih autotrofnih stanica (slika. 16).

Vodeni stupac cijele je godine obogaćen kisikom (IOR, 2012).

U sjevernom Jadranu s njegovim geomorfološkim karakteristikama i specifičnim abiotičkim ekološkim uvjetima, zabilježena je velika biološka raznolikost bentoskih alga, zoobentosa i riba (Munda, 1960; Rac i Lovrić, 1998; Zavodnik, 1977; Zavodnik i sur., 1981; Hrs-Brenko i sur., 1998; Jaklin i Arco-Pijevac, 1997; Kovačić, 1994; Peres i Gamulin Brida, 1973; Zavodnik i Kovačić, 2000; Novosel i sur., 2002; IOR, 2009). Sklerokronologija rasta kod školjkaša u različitim ekološkim uvjetima nije dala jasne korelacije (Uvanović i sur., 2023). Otok Prvić s jačim strujama stanište je koraljnih grebena s *Cladocora caespitosa* (Kružić i Benković, 2008). Katalogizirani

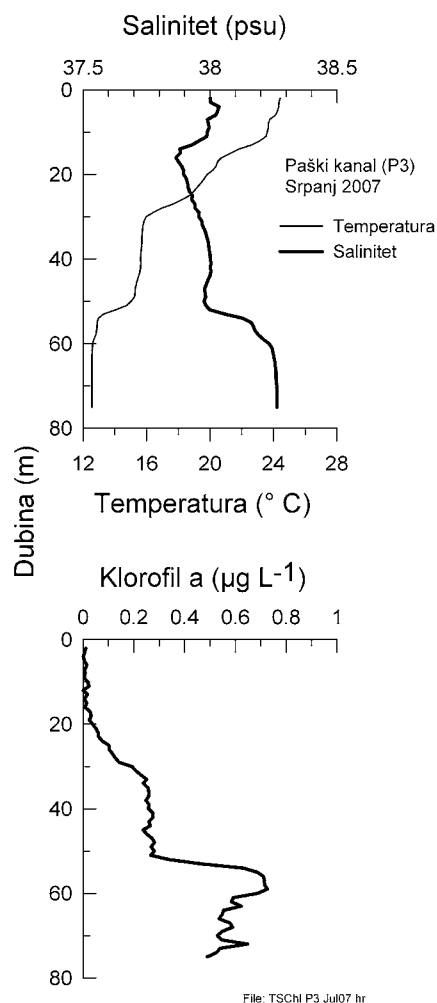


File: ZR 02/ZRM PAG VEL Feb08 slike/Long Feb08 0m 20m 4

Slika 15: Gradijent biomase fitoplanktona, abundancije heterotrofnih trepetljikaša (cilijata) i prozirnosti vodenog stupca (izražene kao vidljivost Secchi-jeve ploče) duž Velebitskog i Paškog kanala u veljači 2008. (Viličić i sur., 2009). Položaj postaja pokazuje slika 2.

su heterotrofni protisti iz skupine foraminifera (Čosović i sur., 2011). Istražena je sezonska raspodjela mikrozooplanktona (Kršinić, 1981) i makrozooplanktona (Benović i sur., 1981). Živi svijet Kvarnera katalogiziran je i izložen u zbirkama Prirodoslovnog muzeja u Rijeci (<https://www.prirodoslovni.com/inventarna/zbirke.php>). Specifični abiotski uvjeti u moru Kvarnera (bura, prozračivanje vodenog stupca, gustoća vode, oligotrofne krške vode, termohalini uvjeti, razvedenost obale) definiraju staništa u kojima obitava velik broj vrsta riba iz porodice glavoča (Kovačić, usm. priopćenje), od kojih se neke najčešće pronalaze u sjevernom Jadranu (Kovačić i Miller, 2000). Vinodolski kanal je jedno od središta razvoja oslića (uz otvoreno more srednjeg Jadrana), grdobine i škampa (IOR, 2012). Mala plava riba osnova je pelagijskoga ribolova u Riječkom zaljevu, Kvarneru i Kvarneriću (Sinovčić i Zorica, 2009).

Kvarnersko područje kao i čitav sjeverni Jadran plitko je područje Sredozemnog mora, pa se u tom dijelu Jadrana mogu očekivati najbrže promjene tijekom očekivanih globalnih klimatskih promjena (hidrodinamika akvatorija, fiziološka svojstva i raspodjela planktona, bentosa i nektona) (Kamburska i Fonda Umani, 2006).



Slika 16: Potpovršinski maksimum biomase fitoplanktona (izražene kao fluorescencija klorofila) u Paškom kanalu ljeti (Viličić i sur., 2008b).

Može se promijeniti omjer između biomase krupnijeg i sitnijeg fitoplanktona te omjer između biomase bakterija i fitoplanktona (Polimene i sur., 2006). Recentna istraživanja potvrđuju da se u zadnjih 20 godina mijenja redoslijed sukcesivnog pojavljivanja pojedinih skupina fitoplanktona, a promjene su najviše vidljive nakon 2009. godine (Vlašićek i sur., 2025), što vjerojatno vodi destabilizaciji biološke raznolikosti primarnih proizvođača.

Neki od glavnih europskih naftnih putova prolaze kroz Jadransko more, a pogotovo je velika opasnost u poluzatvorenom Riječkom zaljevu gdje se u Omišlju pretovaruje nafta (Ivić i sur., 2017). U Riječkom zaljevu povoljni su uvjeti za razvoj pomorskog prometa, a oligotrofni uvjeti u tom području smanjuju potencijalni štetni učinak toksičnih dinoflagelata koji mogu doći balastnim vodama. Alohtone štetne vrste fitoplanktona koje se prenose balastnim vodama uvijek se razvijaju u vodama bogatim organskim hranjivim tvarima jer kao miksotrofi konzumiraju organsku tvar (Caron, 2000). Takve miksotrofne vrste, ako se nađu u siromašnim uvjetima kakvi su prisutni u Riječkom zaljevu, propadaju jer u takvim uvjetima ne mogu razvijati svoje populacije.

4. ZAKLJUČAK

Istraživanja pokazuju sedam najvažnijih oceanografskih svojstava Kvarnera i šireg područja sjevernog Jadrana:

1. Sjeverni Jadran je pod jakim utjecajem europskog kontinenta i dotoka slatke vode rijekom Po sa sjeverozapada, čime se stvara termohalini i trofički gradijent od sjevera prema jugu i od zapada prema istoku Jadrana.
2. Oligotrofne krške vode koje dotiču s kopna u Kvarner dopuštaju razvoj male količine fitoplanktona pogotovo ljeti, kada se produktivna zona pomiče prema donjem sloju eufotičkog sloja.
3. Kvarner je relativno dubok i pogodan za pomorski promet, a oligotrofni uvjeti ne dopuštaju razvoj alohtonih štetnih vrsta miksotrofnog fitoplanktona koji može doći balastnim vodama.
4. Jugozapadno od istarskog poluotoka, pod utjecajem bure sastaju se zaslađena voda rijeke Po i Istočnojadranska obalna struja stvarajući Istarsku frontu.
5. Bura zimi ugušćuje površinsku vodu koja pridonosi stvaranju sjevernojadranske guste vode i ukupnoj cirkulaciji istočnog Sredozemlja.
6. Senjski ciklonalni vrtlog obogaćuje hranjivim tvarima područje uz vanjske kvarnerske otoke.
7. U podmorju Kvarnera bogat je sastav bentosa i riba od kojih se ističu brojne vrste glavoča od kojih su mnoge svojstvene za sjeverni Jadran. ■

ZAHVALA

Zahvaljujem anonimnim recenzentima na korisnim primjedbama.

LITERATURA

- Alebić-Juretić, A., 1994. Precipitation chemistry within Kvarner Bay area, northern Adriatic (Croatia), 1984-1991. *Water Air and Soil Pollution* 78, 343-357.
- Aljinović, D., Jurak, V., Mileusnić, M., Slovenec, D., Presecki, F., 2010. The origin and composition of flysch deposits as an attribute to the excessive erosion of the Slani Potok Valley ("Salty Creek"), Croatia. *Geologia Croatica* 63, 313-322.
- Arapov, J., Ujević, I., Straka, M., Skejić, S., Buzančić, M., Bakrač, A., Ninčević Gladan, Ž., 2020. First evidence of domoic acid production in *Pseudo-nitzschia calliantha* cultures from the central Adriatic Sea. *Acta Adriatica* 61, 135-144.
- Benac, Č., Rubinić, J., Ožanić, N., 2003. The origin and evolution of coastal and submarine springs in Bakar Bay. *Acta Carsologica* 32, 157-171.
- Benac, C., Juračić, M., Bakran-Petricioli, T., 2004. Submerged tidal notches in the Rijeka Bay NE Adriatic Sea: indicators of relative sea-level change and of recent tectonic movements. *Marine Geology* 212, 21-33.
- Benac, C., Juračić, M., Blašković, I., 2008. Tidal notches in Vinodol Channel and Bakar Bay, NE Adriatic sea: Indicators of recent tectonics. *Marine Geology* 248, 151-160.

- Benac, Č., Juračić, M., Matičec, D., Ružić, I., Pikelj, K., 2013. Fluviokarst and classical karst: Examples from the Dinaric (Krk Island, Northern Adriatic, Croatia). *Geomorphology* 184, 64-73.
- Benac, Č., Bočić, N., Ružić, I., 2019. On the origin of both a recent and submerged tombolo on Prvic Island in the Kvarner area (Adriatic Sea, Croatia). *Geologia Croatica* 72, 195-203.
- Benac, C., Bočić, N., Juračić, M., 2022. Geomorphologic changes of the Velebit Channel during late pleistocene and holocene (NE Adriatic). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* 45, 41-54.
- Benac, Č., Jovancevic Dugonjić, S., Navratil, D., Tadić, A., Maglić, L., 2023. Large gravitational collapse structure on a rocky coast (Kvarner, NE Adriatic Sea). *Geologia Croatica* 76, 105-112.
- Benović, A., Vučetić, T., Skaramuca, B., 1981. Joint investigation of the Rijeka Bay - net- zooplankton. *Thalassia Jugoslavica* 17, 257-274.
- Berthon, J.-F., Zibordi, G., 2004. Bio-optical relationships for the northern Adriatic Sea. *International Journal of Remote Sensing* 25, 1527 – 1532.
- Bertović, S., 1983. Hrvatska — Šumska tipologija i glavni tipovi šuma. *Šumarska Enciklopedija* 2, 89-91 i pregledna karta. JLZ, Zagreb.
- Bertović, S., Lovrić, A. Ž., 1985. Vegetacijska karta Hrvatske: orografski i klimatsko- vegetacijski pojasi, potpojasi i područja. *Šumarska enciklopedija*, 3, Jugoslavenski leksikografski zavod, Zagreb.
- Bonacci, O., Oštrić, M., Roje-Bonacci, T., 2017. A contribution to the Rječina karst spring hydrology. *Hrvatske Vode* 25, 99-108.
- Burić, Z., Viličić, D., Caput Mihalić, K., Carić, M., Kralj, K., Ljubešić, N., 2008. *Pseudo-nitzschia* blooms in the Zrmanja River Estuary (eastern Adriatic Sea). *Diatom Research* 23, 51 – 63.
- Caron, D. A., 2000. Symbiosis and mixotrophy among pelagic microorganisms. In: Kirchman, D. L. (ed.), *Microbial ecology of the oceans*, 495 – 523. Wiley – Liss, New York.
- Casellato, S., 2008. Marine biology in the Adriatic Sea: An historical review. *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 59, Supplement I, 191–203.
- Coll, M., Pirrodi, C., Steenbeek, J., Kaschner, K., Ben Rais Lastram, F., Aguzzi, J., Ballesteros, E., Bianchi, C.N., Corbera, J., Dailianis, T., Danovaro, R., Estrada, M., Frogia, C., 2010. The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns and threats. *PLoS ONE* 5, e11842.
- Ćosović, B., Žutić, V., Vojvodić, V., Pleše, T., 1985. Determination of surfactant activity and anionic detergents in seawater and sea-surface microlayer in the Mediterranean. *Marine Chemistry* 17, 127-139.
- Ćosović, V., Zavodnik, D., Borčić, A., Vidović, J., Deak, S., Moro, A., 2011. A checklist of foraminifera of the eastern shelf of the Adriatic Sea. *Zootaxa* 3035, 1–56.
- Degobbis, D., Fonda – Umani, S., Franco, P., Malej, A., Precali, R., Smolaka, N., 1995. Changes in the northern Adriatic ecosystem and the hypertrophic appearance of gelatinous aggregates. *Science of the Total Environment* 165, 43 – 58.
- Degobbis, D., Gilmartin, M., 1990. Nitrogen, phosphorus and bio-genic silicon budgets for the northern Adriatic Sea, *Oceanologica Acta* 13, 31-45.
- Degobbis, D., Ilić, D., Jeftić, L., Nožina, I., Smolaka, N., Vučak, Z., 1978. Hydrographic and hydrodynamic characteristics of Rijeka Bay. *Ives Journées d'étude Pollutions*, 551– 554.
- Dorman, C. E., Carniel, S., Cavaleri, L., Sclavo, M., Chiggiato, J., Doyle, J., Haack, T., Pullen, J., Grbec, B., Vilibić, I., Janeković, I., Lee, C., Malačić, V., Orlić, M., Paschini, E., Russo, A., Signell, R. P., 2006. February 2003 marine atmospheric conditions and the bora over the northern Adriatic. *Journal of Geophysical Research* 111, C03S03.
- Duplančić Leder, T., Ujević, T. i Čala, M., 2004. Coastline lengths and areas of islands in the Croatian part of the Adriatic Sea determined from the topographic maps at the scale of 1:25 000. *Geoadria* 9, 5-32.
- Fuks, D., 1979: Cruises of the RV "Vila Velebita" in the Kvarner region of the Adriatic Sea, 8. Concentration of total bacteria, total coliforms and biochemical oxygen demand. *Thalassia Jugoslavica* 15, 143-148.
- Gačić, M., Poulain, P.M., Zore-Armanda, M., Barale, V., 2001. Chapter 1 Overview. In: Cushman-Roisin, B., Gačić, M., Poulain, P.M., Artegiani, A. (eds.), *Physical oceanography of the Adriatic Sea: past, present and future*, 1–44. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht.
- Gačić, M., Civitarese, G., Kovačević, V., Ursella, L., Bensi, M., Menna, M., Cardin, V., Poulain, P.-M. Cosoli, S., Notarstefano, G., Pizzi, C., 2014. Extreme winter 2012 in the Adriatic: an example of climatic effect on the BIOS rhythm. *Ocean Sciences* 10, 513– 522.
- Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Patarčić, M., 2003. Digitalna godišnja oborinska karta Hrvatske. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.
- Gašparović, B., Vrana, I., Frka, S., Marić Pfannkuchen, D., Vlašiček, I., Djakovac, T., Ivančić, I., Smolaka Tanković, M., Milinković, A., Flanjak, L., Chaux, F., Novak, T., Medić, N., Godrijan, J., 2023. Paradox of relatively more phospholipids in phytoplankton in phosphorus limited sea. *Limnology and Oceanography* 68, 2800–2813.
- Grisogono, B., Belušić, D., 2009. A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe bora wind. *Tellus* 61, 1-16.
- Grubišić, V., 2004. Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 130, 2571-2603.
- Grubišić, V., Orlić, M., 2007. Early observations of rotor clouds by Andrija Mohorovičić. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 693-700.
- Haq, B. U., Schutter, S.R., 2008. Chronology of paleozoic sea-level changes. *Science* 322 (5898), 64–68.
- Herak, M., 1984. *Geologija*, 3. izdanje. Školska knjiga Zagreb.
- Hertelendi, E., Svingor, E., Futo, I., Szanto, Z., Rank, D., 1997. Isotope investigation of Lake Vrana and springs in

the Kvarner area. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 11, 651-655.

Horvatić, S., 1963. Biljnogeografski položaj i raščlanjenje našeg Primorja u svjetlu suvremenih fitocenoloških istraživanja. *Acta Botanica Croatica* 22, 27-81.

Hrs-Brenko, M., Legac, M., Arko-Pijevac, M., 1998. Contributions to the marine fauna of the Rijeka Bay (Adriatic Sea) 3 Bivalvia, 609-617. *Prirodoslovna istraživanja riječkog područja. Prirodoslovni muzej Rijeka*.

Iona, A., Theodorou, A., Watelet, S., Troupin, C., Beckers, J.-M., Simoncelli, S., 2018. Mediterranean Sea hydrographic atlas: towards optimal data analysis by including time-dependent statistical parameters. *Earth System Science Data* 10, 1281-1300.

IOR, 2009. Pelagijski monitoring (Projekt PELMON) - procjena rasprostranjenosti i obimnosti populacija sitne plave ribe u Jadranskom moru ultrazvučnom detekcijom (eho-monitoring). Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split.

IOR, 2012. Početna procjena stanja i opterećenja morskog okoliša hrvatskog dijela Jadrana. Ministarstvo zaštite okoliša i prirode RH i Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split.

Ivančić, I., Pfannkuchen, M., Godrić, J., Djakovac, T., Marić Pfannkuchen, D., Korlević, M., Gašparović, B., Najdek, M., 2016. Alkaline phosphatase activity related to phosphorus stress of microphytoplankton in different trophic conditions. *Progress in Oceanography* 146, 175-186.

Ivić, S., Mrša Haber, I., Legović, T., 2017. Lagrangian coherent structures in the Rijeka Bay current field. *Acta Adriatica* 58, 373-389.

Jagodnik, P., Jagodnik, V., Arbanas, Ž., Mihalić Arbanas, S., 2020. Landslide types in the Slani Potok gully, Croatia. *Geologia Croatica* 73, 13-28.

Jaklin, A., Arko-Pijevac, M., 1997. Benthic biocoenosis of the Sv. Marko Islet (Rijeka Bay). *Periodicum Biologorum* 99, 219-228.

Jeffries, M. A., Lee, C. M., 2007. A climatology of the northern Adriatic Sea's response to bora and river forcing. *Journal of Geophysical Research* 112, C03S02.

Jeftić, Lj. (ur.), 1977. Ekološka studija akvatorija Riječkog zaljeva. IRB Centar za istraživanje mora, Rovinj-Zagreb.

Juračić, M., Benac, C., Pikelj, K., Ilić, S., 2009: Comparison of the vulnerability of limestone (karst) and siliciclastic coasts (example from the Kvarner area, NE Adriatic, Croatia). *Geomorphology* 107, 90-99.

Kamburska, L., Fonda-Umani, S., 2006. Long-term copepod dynamics in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). Recent changes and trends. *Climate Research* 31, 295-203

Klemp, J.B., Durran, D.R., 1987. Numerical modelling of bora winds. *Meteorology and Atmospheric Physics* 36, 215-227.

Knežević, R. 1998. Hidrogeografske značajke Gorskog kotara. Zbornik radova Savjetovanja Prirodoslovna istraživanja riječkog područja, 267 – 275, Rijeka.

Kokkini, Z., Gerin, R., Poulain, P.M., Mauri, E., Pasarić, Z., Janeković, I., Pasarić, M., Mihanović, H. Vilibić, I., 2017. A multiplatform investigation of Istrian Front dynamics

(north Adriatic Sea) in winter 2015. *Mediterranean Marine Science* 18, 344-354.

Korbar, T., Markušić, S., Hasan, O. Fuček, L., Brunović, D. Belić, N., Palenik, D., Kaštelić, V., 2020. Active tectonics in the Kvarner region (external Dinarides, Croatia) - an alternative approach based on focused geological mapping, 3D seismological, and shallow seismic imaging data. *Frontiers in Earth Science* 8, 582797.

Kovačić, M., 1994. Contribution to the knowledge of gobies, Gobiidae (Pisces, Perciformes) in the Rijeka Bay, Adriatic Sea. *Periodicum Biologorum* 96, 463-465.

Kovačić, M., Miller, P.J., 2000. A new species of *Gobius* (Teleostei: Gobiidae) from the northern Adriatic Sea. *Cybiurn* 24, 231-239.

Kršinić, F., 1981. Mikrozooplankton in the Rijeka Bay. *Thalassia Jugoslavica* 17, 275-284.

Kršinić, F. 1995. Changes in the microzooplankton assemblages in the northern Adriatic Sea during 1989 to 1992. *Journal of Plankton Research* 17, 935-953.

Kružić, P., Benković, L., 2008. Bioconstructional features of the coral *Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinia) in the Adriatic Sea (Croatia). *Marine Ecology* 29, 125-139.

Kuzmić, M., 1991. Exploring the effects of bura over the northern Adriatic: CZCS imagery and a mathematical model prediction. *International Journal of Remote Sensing* 12, 207 – 214.

Kuzmić, M., Janeković, I., Book, J. W., Martin, P. J., Doyle, J. D., 2006. Modeling the 7608 northern Adriatic double-gyre response to intense bora wind: A revisit. *Journal of Geophysical Research* 111, C03S13.

Leder, N., Smirčić, A., Vilibić, I., 1998. Neke karakteristike polja struja Riječkog zaljeva. Zbornik radova Savjetovanja Prirodoslovna istraživanja riječkog područja, Rijeka, 213 – 221.

Lee, C.M., Askari, F., Book, J., Carniel, S., Cushman-Roisin, B., Dorman, C., Doyle, J., Flament, P., Harris, C.K., Jones, B.H., Kuzmić, M., Martin, P., Ogston, A., Orlić, M., Perkins, H., Poulain, P.-M., Pullen, J., Russo, A., Sherwood, C., Signell, R.P., Thaler Detweiler, D., 2005. Northern Adriatic response to a wintertime bora wind event. *EOS Transactions of the American Geophysical Union* 86, 157 – 165.

Legović, T., Kuzmić, M., Jeftić, Lj., Patten, B. C., 1977. Model of the Adriatic regional ecosystem. *Thalassia Jugoslavica* 13, 125-138.

Legović, T., 1982. Water exchange between a coastal basin and the adjacent sea with an application to the Rijeka Bay. *Deep Sea Research* 29, 999-1012.

Legović, T., Limić, N., Sekulić, B., 1989. Reconstruction of a concentration field in a coastal sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 29, 217-231.

Legović, T., Justić, D., 1997. When do phytoplankton blooms cause the most intense hypoxia in the northern Adriatic sea? *Oceanologica Acta* 20, 91 – 99.

Limić, N., Orlić, M., 1987. A method for the determination of absolute geostrophic velocities in the sea. *Tellus* 3, 82-94.

- Lončar, G., Grbec Paklar, B., Janeković, I., 2011. Influence of density stratification on effluent plume dynamics. *Oceanologia* 53, 565-585.
- Malanotte-Rizzoli, P., Bergamasco, A., 1989. The circulation of the eastern Mediterranean. *Oceanologia Acta* 12, 335 – 352.
- Mance, D., Hunjak, T., Lenac, D., Rubinić, J., Roller-Lutz, Z., 2014. Stable isotope analysis of the karst hydrological systems in the Bay of Kvarner (Croatia). *Applied Radiation and Isotopes* 90, 23-34.
- Marjanac, T., Marjanac, Lj., 2007. Sequence stratigraphy of Eocen incised valley clastics and associated sediments, island of Rab, northern Adriatic Sea, Croatia. *Facies* 53, 493- 508.
- Marjanac, T., Marjanac, Lj., 2016. The extent of middle Pleistocene ice cap in the coastal Dinaric Mountains of Croatia. *Quaternary Research* 85, 445-455.
- Marjanac, T., Tomša, A-M., Marjanac, Lj., 2004. *Krk-brecia, possible impact-crater fill, island of Krk in eastern Adriatic Sea (Croatia)*, 115-134. In: Dypvik, H., Burchel, M., Claeys, P. (eds.) *Cratering in marine environments and on ice*. Springer Verlag.
- Marriner, N., Morhange, C., Faivre, S., Flaux, C., Vacchi, M., Miko, S., Dumas, V., Boetto, G., Rossi, I.R., 2014. Post-Roman sea-level changes on Pag Island (Adriatic Sea): Dating Croatia's "enigmatic" coastal notch? *Geomorphology* 221, 83-94.
- Međugorac, I., Pasarić, M., Orlić, M., 2022. Long-term measurements at Bakar tide-gauge station (east Adriatic). *Geofizika* 39, 149-162.
- Mihanović, H., Janeković, I., Vilibić, I., Kovačević, V., Bensi, M., 2018. Modelling interannual changes in dense water formation on the northern Adriatic shelf. *Pure and Applied Geophysics* 175, 4065-4081.
- Mihanović, H., Vilibić, I., Carniel, S., Tudor, M., Russo, A., Bergamasco, A., Bubić, N., Ljubešić, Z., Viličić, D., Boldrin, A., Malačić, V., Celio, M., Comici, C., Raicich, F., 2013. Exceptional dense water formation in the Adriatic shelf in the winter of 2012. *Ocean Science* 9, 561-572.
- Mohorovičić, A., 1889. Interessante Wolkenbildung über der Bucht von Buccari. *Meteorologische Zeitschrift* 24, 56-58.
- Mrša Haber, I., Legović, T., Cukrov, M., 2018. Numerical simulation of Rijeka Bay water dynamics for most common winds. *Transactions of Fama* 42, 15-25.
- Munda, I., 1960. On the seasonal distribution of benthonic marine algae along the northeastern coast of the isle of Krk (Northern Adriatic). *Nova Hedwigia* 2, 191-242.
- Novosel, M., Bakran-Petricoli, T., Požar-Domac, A., Kružić, P., Radić, I., 2002. The benthos of the northern part of the Velebit Channel (Adriatic Sea, Croatia). *Natura Croatica* 11, 387-409.
- Orlić, M., Kuzmić, M., 1980. A contribution to the understanding of the kinematics of surface currents in the Rijeka Bay. *Thalassia Jugoslavica* 16, 31-49.
- Orlić, M., Penzar, B., Penzar, I., 1988. Adriatic Sea and land breezes: clockwise versus anticlockwise rotation. *Journal of Applied Meteorology* 27, 675-679.
- Orlić, M., Gačić, M., Laviolette, P. E., 1992. The currents and circulation of the Adriatic Sea. *Oceanologica Acta* 15, 109 – 124.
- Orlić, M., Kuzmić, M., Z. Pasarić, Z., 1994. Response of the Adriatic Sea to the bora and sirocco forcing. *Continental Shelf Research* 14, 91-116.
- Orlić, M., Leder, N., Pasarić, M., Smirčić, A., 2000. Physical properties and currents recorded during September and October 1998 in the Velebit Channel (East Adriatic). *Periodicum Biologorum* 102, 31-37.
- Orlić, M., Dadić, V., Grbec, B., Leder, N., Marki, A., Matić, F., Mihanović, H., Beg Paklar, G., Pasarić, M., Pasarić, Z., Vilibić, I., 2006. Wintertime buoyancy forcing, changing seawater properties, and two different circulation systems produced in the Adriatic. *Journal of Geophysical Research* 111, C03S07.
- Paklar, G. B., Isakov, V., Koračin, D., Kourafalou, V., Orlić, M., 2001. A case study of bora- driven flow and density changes on the Adriatic Shelf (January 1987). *Continental Shelf Research* 21, 1751-1783.
- Palenik, D., Matičec, D., Fuček, L., Matoš, B., Herak, M., Vlahović, I., 2019. Geological and structural setting of the Vinodol Valley (NW Adriatic, Croatia): insights into its tectonic evolution based on structural investigations. *Geologia Croatica* 72, 179-193.
- Parras-Berrocal, I.M., Vázquez, R., Cabos, W., Sein, D.V., Álvarez, O., Bruno, M., Izquierdo, A., 2023. Dense water formation in the weastern Mediterranean under a global warming scenario. *Ocean Sciences* 19, 941-952.
- Pavletić, Z., Stilinović, B., Crc, Z., Munjko, I., 1972. Ljetni i zimski aspekt heterotrofnih bakterija i neke ekološke karakteristike onečišćenog mora u području Riječkog zaljeva. *Acta Adriatica* 14, 3-15.
- Penzar, B., Penzar, I., Orlić, M., 2001. *Vrijeme i klima hrvatskog Jadrana*. Feletar, Zagreb.
- Peres, J-M., Gamulin Brida, H., 1973. *Biološka oceanografija: bentos i bentoska bionomija Jadranskog mora*. Školska knjiga, Zagreb.
- Perić, L., Fafandjel, M., Bihari, N., 2012. Heavy metals concentration and metallothionein content in resident and caged mussels *Mytilus galloprovincialis* from Rijeka Bay, Croatia. *Fresenius Environmental Bulletin* 21, 2785-2794.
- Peters, H., Lee, C. M., Orlić, M., Dorman, C. E., 2007. Turbulence in the wintertime northern Adriatic Sea under strong atmospheric forcing. *Journal of Geophysical Research* 112, C03S09.
- Pikelj, K., Žigić, V., Juračić, M., 2009. Origin and distribution of surface sediments in the Grgur Channel, Adriatic Sea, Croatia. *Geologia Croatica* 62, 95-105.
- Pleško, N., 1983. Klimatski tipovi Hrvatske prema Thornthwaitovoj klasifikaciji. *Šumarska Enciklopedija* 2, 87. JLZ, Zagreb.
- Polimene, L., Pinardi, N., Zavatarelli, M., Colella, S., 2006. The Adriatic Sea ecosystem seasonal cycle: validation of a three-dimensional numerical model, *Journal of Geophysical Research* 111, C03S19.
- Poulain, P-M., Raicich, F., 2001. Forcings. In: Cushman-Roisin, B., Gačić, M., Poulain, P- M., Artegiani, A. (eds.),

Physical oceanography of the Adriatic Sea: past, present and future, 45-65. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Pullen, J., Doyle, J.D., Hodur, R., Ogston, A., Book, J.W., Perkins, H., Signell, R., 2003. Coupled ocean-atmosphere nested modeling of the Adriatic Sea during winter and spring 2001. *Journal of Geophysical Research* 108, 3320.

Rac, M., Lovrić, A.Z., 1998. Macroalgae composition in the Vinodol seashore and its relation to other areas in the northern and eastern Adriatic. *Periodicum Biologorum* 100, 29-38.

Ramljak, A., Žučko, J., Lucić, M., Babić, I., Morić, Z., Fafandel, M., Turk Furdek, M., Matijević, S., Udiković-Kolić, N., Karpouzias, D., Petrić, I., 2024. Microbial communities as indicators of marine ecosystem health: Insights from coastal sediments in the eastern Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin* 205, 116649.

Randić, A., 2002. *Prospects for integrated coastal management development in Croatia*. In: Čičin-Šain, B., Pavlin, I., Belfiore, S. (eds.), *Sustainable coastal management: a transatlantic and Euro-Mediterranean perspective*, 155-159. Springer Verlag.

Ravaioli, M., Alvisi, F., Menegazzo Vitturi, L., 2003. Dolomite as a tracer for sediment transport and deposition on the northwestern Adriatic continental shelf (Adriatic Sea, Italy). *Continental Shelf Research* 23, 1359 – 1377.

Robinson, A.R., Malanotte-Rizzoli, P., Hecht, A., Michelato, A., Roether, W., Theocharis, A., Ünlüata, Ü., Pinardi, N., Artegiani, A., Bergamasco, A., Bishop, J., Brenner, S., Christianidis, S., Gačić, M., Georgopoulos, D., Golnaraghi, M., Hausmann, M., Junghaus, H.-G., Lascaratos, A., Latif, M.A., Osman, M., 1992. General circulation of the Eastern Mediterranean. *Earth-Science Reviews* 32, 285–309.

Sammartino, M., Aronica, S., Santoleri, R., Buongiorno Nardelli, B., 2022. Retrieving Mediterranean sea surface salinity distribution and interannual trends from multi-sensor satellite and in situ data. *Remote Sensing* 14, 2502.

Scambos, T., Abdalati, W., 2022. How fast is sea level rising? *Arctic Antarctic and Alpine Research* 54, 123–124.

Schneider, J., 1976. Biological and inorganic factor in the destruction of limestone coast. *Contributions to Sedimentology* 6, 1-11.

Sinovčić, G., Zorica, B., 2009: Small pelagic fish resources in the Rijeka Bay, Kvarner and Kvarnerić. *Natural history researches of the Rijeka region II*, 273-282. Prirodoslovni muzej Rijeka, Rijeka.

Smith, R.B., 1987. Aerial observations of the Yugoslavian bora. *Journal of Atmospheric Sciences* 44, 269-297.

Smodlaka, N., 1983. The Kvarner region: The phytoplankton crop and production characteristics. *Thalassia Jugoslavica*, 19, 337-338

Stiros, S.C., Moschas, F., 2012. Submerged notches, coastal changes and tectonics in the Rijeka area, NW Croatia. *Marine Geology* 329, 103-112.

Supić, N., Orlić, M., 1999. Seasonal and interannual variability of the northern Adriatic surface fluxes. *Journal of Marine Systems* 20, 205-229.

Supić, N., Orlić, M., Degobbi, D., 2000. Istrian coastal counter-current and its year-to-year variability. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 50, 385 – 397.

Supić, N., Budiša, A., Ciglenečki, I., Čanković, M., Dautović, J., Djakovac, T., Dunić, N., Dutour-Sikirić, M., Ivančić, I., Kalac, M., Kraus, R., Kužat, N., Lučić, D., Marić Pfannkuchen, D., Mifka, B., Mihanović, H., Njire, J., Paliaga, P., Pasarić, M., Pasarić, Z., Simonović, N., Prtenjak Telišman, M., Vilibić, I., 2024. Are winter conditions impacting annual organic production in the northern Adriatic? Verifications and future projections. *Progress in Oceanography* 224, 103247.

Surić, M., Richards, D.A., Hoffmann, D.L., Tibljaš, D., Juračić, M., 2009. Sea-level change during MIS 5a based on submerged speleothems from the eastern Adriatic Sea (Croatia). *Marine Geology* 262, 62-67.

Surina, B., 2014. Forest vegetation of tectonic dolines Pihlja and Vitra above the Vinodol valley (Liburnian karst, NW Croatia). *Šumarski List* 138, 259-269.

Šepić, J., Orlić, M., Vilibić, I., 2008. The Bakar Bay seiches and their relationship with atmospheric processes. *Acta Adriatica* 49, 107-123.

Škrivanić, A., Barić, A., 1979. Cruises of the R/V "Vila Velebita" in the Kvarner region of the Adriatic Sea, 4. Distribution of the primary nutrients. *Thalassia Jugoslavica* 15, 61-88.

Šolić, M., 2017. Povodom 70. godišnjice laboratorija za mikrobiologiju Instituta za oceanografiju i ribarstvo u Splitu. *Hrvatske Vode* 25, 35-47.

Špelić, M., Del Ben, A., Petrinjak, K., 2021. Structural setting and geodynamics of the Kvarner area (Northern Adriatic). *Marine and Petroleum Geology* 125, 104857.

Štević, Z., 1979. Cruises of RV "Vila Velebita" in the Kvarner region of the Adriatic sea, 19. Crustacea, Decapoda. *Thalassia Jugoslavica* 15, 279-287

Šupraha, L., Bosak, S., Ljubešić, Z., Olujić, G., Horvat, L., Viličić, D., 2011. The phytoplankton composition and spatial distribution in the north-eastern Adriatic Channel in autumn 2008. *Acta Adriatica* 52, 29-44.

Thom, A., Ricken, T., 2019. Towards a physical model of Antarctic sea ice microstructure including biogeochemical processes using the extended Theory of Porous Media. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, e201900285.

Uvanović, H., Peharda, M., Zupan, I., 2023. Developing a sclerochronology network in the Adriatic Sea: growth synchrony among populations of *Callista chione*. *Regional Studies in Marine Science* 64, 103009.

Valković, V., Obhodas, J., Crnjar, M., 2007: Concentration of some elements in the Adriatic coastal sea sediments. Case study: the Kvarner Bay. *X-Ray Spectrometry* 36, 11-19.

Vilibić, I., Mihanović, H., Janeković, I., Denamiel, C., Poulain, P.-M., Orlić, M., Dunić, N., Dadić, V., Pasarić, M., Muslim, S., Gerin, R., Matić, F., Šepić, J., Mauri, E., Kokkini, Z., Tudor, M., Kovač, Ž., Džoić, T., 2018. Wintertime dynamics in the coastal northeastern Adriatic Sea: the NAdEx 2015 experiment. *Ocean Science* 14, 237–258.

- Vilibić, I., Šepić, J., Proust, N., 2013. Weakening thermohaline circulation in the Adriatic Sea. *Climate Research* 55, 217 – 225.
- Viličić, D., 1991. A study of phytoplankton in the Adriatic Sea after the July 1984 bloom. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie* 76, 197 – 211.
- Viličić, D., 2014. *Ecology and composition of phytoplankton in the Adriatic Sea*. Koeltz Scientific Books, Koenigstein, Germany.
- Viličić, D., 2017. Zaštita uzgajališta kamenica od antropogenog utjecaja u Malostonskom zaljevu. *Hrvatske Vode* 25, 59-99.
- Viličić, D., Ivančić, I., Caput, K., Burić, Z., 2006. Phytoplankton abundance and composition in the oligotrophic, phosphate limited NE coastal Adriatic Sea. *Proceedings of Abstracts of the 41. European Marine Biology Symposium, Cork*, 4. – 8. september 2006, 84.
- Viličić, D., Terzić, S., Ahel, M., Burić, Z., Jasprica, N., Carić, M., Caput-Mihalić K., Olujić, G., 2008a. Phytoplankton abundance and pigment biomarkers in the oligotrophic, eastern Adriatic estuary. *Environmental Monitoring and Assessment* 142, 199-218.
- Viličić, D., Orlić, M., Jasprica, N., 2008b. The deep chlorophyll maximum in the coastal north eastern Adriatic Sea, July 2007. *Acta Botanica Croatica* 67, 33–43.
- Viličić, D., Kuzmić, M., Bosak, S., Šilović, T., Hrustić, E., Burić, 2009. Distribution of phytoplankton along the thermohaline gradient in the north-eastern Adriatic channel; winter aspect. *Oceanologia* 51, 495 – 513.
- Viličić, D., Kuzmić, M., Tomažić, I., Ljubešić, Z., Bosak, S., Precali, R., Djakovac, T., Marić, D., Godrijan, J., 2013. Northern Adriatic phytoplankton response to short Po River discharge pulses during summer stratified conditions. *Marine Ecology* 34, 451–466.
- Vlašiček, I., Marić Pfannkuchen, D., Smodlaka Tankovic, M., Baričević, A., Kužat, N., Knjaz, M., Grižančić, L., Podolšak, I., Kogovšek, T., Pfannkuchen, M., 2025. Cluster analysis of long-term phytoplankton data from the Northern Adriatic reveals environmental influences and disruptions in seasonal patterns. *Frontiers in Ecology and Evolution* 13, 1498307.
- Vukić Lušić, D., Peršić, V., Horvatić, J., Viličić, D., Traven, L., Djakovac T., Mićović, V., 2008. Assessment of nutrient limitation in Rijeka Bay, NE Adriatic Sea, using miniaturized bioassay. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 358, 46 – 56.
- Yoshino, M.M. (ed.), 1976. *Local wind bora*. University of Tokyo Press, Tokyo.
- Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnc, L., 2008. *Klimatski atlas Hrvatske 1961–1990, 1971–2000*. Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb.
- Zavatarelli, M., Raicich, F., Bregant, D., Russo, A., Artegiani, A., 1998. Climatological biochemical characteristics of the Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems* 18, 227 – 263.
- Zavatarelli, M., Pinardi, N., Kourafalou, V. H., Maggiore, A., 2002. Diagnostic and prognostic model studies of the Adriatic Sea circulation: Seasonal variability. *Journal of Geophysical Research* 107, 3004.
- Zavodnik, D., 1979. Cruises of the research vessel Vila Velebita in the Kvarner region of the Adriatic Sea, 21. Benthic investigation. *Thalassia Jugoslavica* 15, 313-350.
- Zavodnik, D., 2002. The 110th anniversary of the Marine Research Station at Rovinj (Adriatic Sea, Croatia). *Periodicum Biologorum* 104, 235-247.
- Zavodnik, D., Špan, A., Zavodnik, N., Antolić, B., 1981. Benthos of the western coast the Island Krk (Rijeka Bay, the North Adriatic Sea). *Thalassia Jugoslavica* 17, 289-340.
- Zavodnik, D., Kovačić, M., 2000. Indeks of marine fauna in Rijeka Bay (Adriatic Sea, Croatia), *Natura Croatica* 9, 297-379.
- Zore-Armanda, M., Gačić, M., 1987. Effects of bura on the circulation in the North Adriatic. *Annals of Geophysics* 5B, 93 – 102.

AN OVERVIEW OF OCEANOGRAPHIC RESEARCH IN THE KVARNER AND THE NEIGHBOURING NORTHERN ADRIATIC SEA

Abstract. This review paper summarizes the oceanographic properties of the Kvarner and neighbouring northern Adriatic Sea, as published in the most important scientific papers in the fields of geology, geophysics, chemistry and biology. The waters in the Kvarner are relatively deep, with an indented coastline. It is influenced by nutrient-poor karst waters and a strong northerly wind (bora). In winter, this wind increases surface water density, which, southwest of the Istrian Peninsula, along the Istrian Front, contributes to the creation of northern Adriatic dense water as well as initiation of the circulation in the entire eastern Mediterranean. Southwest of the Istrian Peninsula tip, the Senj cyclonic gyre enriches the area along the outer Kvarner islands with nutrients. In the oligotrophic, highly transparent Kvarner Sea, the productive zone moves from the surface to the deeper layers of the euphotic layer in summer. The underwater world of the Kvarner is rich in benthos and fish, among which goby species stand out, many of which are typical for the northern Adriatic.

Key words: Rijeka Bay, Kvarner, oceanography, bora, marine organisms, Adriatic Sea.

ÜBERBLICK ÜBER DIE OZEANOGRAPHISCHE FORSCHUNG IN DER KVARNER-REGION UND DEM ANGRENZENDEN NÖRDLICHEN ADRIAGEBIET

Zusammenfassung. Dieser Übersichtsartikel fasst die ozeanographischen Eigenschaften der Kvarner-Gewässer und des angrenzenden Teils der nördlichen Adria zusammen, wie sie in den wichtigsten wissenschaftlichen Arbeiten auf den Bereichen Geologie, Geophysik, Chemie und Biologie veröffentlicht wurden. Die Kvarner-Region ist ein Wassergebiet mit relativ tiefen Gewässern und einer stark gegliederten Küstenlinie. Es wird stark von nährstoffarmen Karstgewässern und vom Nordwind – Bora – beeinflusst. Der starke und lang anhaltende Nordwind Bora verdichtet im Winter das Oberflächenwasser, was südwestlich der Halbinsel Istrien entlang der Istrischen Front zur Bildung des dichten Wassers der Nordadria und zur Einleitung der Zirkulation des gesamten östlichen Mittelmeers beiträgt. Südwestlich der Spitze der Halbinsel Istrien reichert der zyklonische Wirbel von Senj das Gebiet entlang der äußeren Kvarner-Inseln mit Nährstoffen an. In der nährstoffarmen Kvarnersee weist die Wassersäule eine hohe Transparenz auf, und die produktive Zone verlagert sich im Sommer von der Oberfläche in die untere Schicht der euphotischen Zone. Der Meeresboden der Kvarner-Bucht ist reich an benthischen Arten und Fischarten, darunter namentlich die Grundeln, von denen viele nur in der nördlichen Adria vorkommen.

Schlüsselwörter: Bucht von Rijeka, Kvarner, Ozeanographie, Bora, Meeresorganismen, das Adriatische Meer