

Pregledni članak | Review Paper | UDK 556.546(497.5 Zrmanja)
 Primljeno [Received]: 14. 1. 2011.; Prihvaćeno [Accepted]: 31. 7. 2011.

ESTUARIJ ZRMANJE I NJEGOVA EKOLOŠKA SVOJSTVA

Prof. dr. sc. Damir Viličić,
 dipl. ing. biol.

Prirodoslovno-matematički
 fakultet Sveučilišta u Zagrebu
 Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb
 dvilic@biol.pmf.hr

Estuarij Zrmanje je visokostratificirani sustav s oštrom haloklinom koja dijeli bočati od morskog sloja te različite zajednice pelagičkih organizama. Haloklina nakuplja suspendirane čestice i pokazuje ljetni potpovršinski temperaturni maksimum. Izmjena vode iznad halokline zimi traje jedan do dva dana, što je šest puta kraće vrijeme nego u susjednom estuariju Krke. Dotok Zrmanje veći od $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ uzrokuje pomicanje čela estuarija za dva km nizvodno od Jankovića buka pa je taj dio estuarija ekstremno ekološki nestabilan. Razvoj fitoplanktona ovisi o stabilnosti halokline, dotoku hranjivih tvari rijekom Zrmanjom i vruljama, brzini izmjene vode u estuariju i mikrobiološkoj regeneraciji hranjivih soli. Oligotrofni karakter estuarija pokazuje veliku prozirnost (dubina eufotičkog sloja veća od 5 m), nedostatak hipoksije niti anoksije te rijetke pojave cvjetanja fitoplanktona. Negdašnja privredna aktivnost kod Obrovca povremeno ostavlja tragove zagađenja u estuariju.

Ključne riječi: estuarij, hidrografija, produktivnost, Zrmanja, Jadransko more

1. UVOD

U morima, s malim rasponom između plime i oseke, manje rijeke stvaraju visoko stratificirane estuarije, gdje je vodeni stupac podijeljen na gornji bočati i donji morski sloj koje razdvaja oštra haloklina. Velike, turbulentne rijeke jače miješaju vodeni stupac. Sredozemno more je svojstveno po malom rasponu plime i oseke. Estuariji malih hrvatskih krških rijeka su bitno obilježje istočnog dijela Jadrana. Dosad su istraživanja provedena u estuariju rijeke Krke i Zrmanje, a slična svojstva pokazuje estuarij Cetine. U estuariju Zrmanje, bočati sloj, morski sloj i haloklina se razlikuju po biološkoj aktivnosti (Burić i sur., 2004., 2007., 2008., Viličić i sur., 2008.).

Prva istraživanja hrvatskih estuarija počela su u estuariju Krke, gdje se u haloklini nakuplja organska tvar, dolazi do kondenziranja organskih molekula u agregate (Žutić i Legović, 1987., Cauwet, 1991.), nakupljanja nanofitoplanktona (Denant i sur., 1991.), bakterija (Fuks i

sur., 1991.) i teških metala (Mikac i sur., 1989.). Haloklina dijeli slatkovodne od morskih populacija fitoplanktona (Viličić i sur., 1989., Legović i sur., 1991.). U estuariju Krke je dobro razvijen potpovršinski maksimum temperature uz donju granicu halokline, gdje dolazi do selektivne apsorpcije sunčeve energije na nakupljenim suspendiranim česticama (Legović i sur., 1991., Orlić i sur., 1991.).

U Sredozemlju su istražena još dva visokostratificirana estuarija; Ebro u Španjolskoj (Ibanez i sur., 1996.) te Strymon u Grčkoj (Haralambidou i sur., 2010.). Ebro je reguliran i znatno eutroficiran ekološki sustav, Strymon je sličniji našim estuarijima.

U svjetskoj je literaturi poznato da se u ušćima rijeka mrijeste mnoge vrste riba, jer su to sustavi obogaćeni hranjivim tvarima koje donose rijeke ispiranjem kopna i fitoplanktonom za prehranu njihovih ličinki (Hoeksema i sur., 2009.), a tako je i u estuariju Zrmanje (Sinovčić, 2000., 2004., Sinovčić i Zorica, 2006., Sinovčić i sur.,

2004.). Iz istog su razloga ušća pogodna za uzgoj školjkaša koji se hrane filtrirajući plankton. Zajednice riba brzo se mijenjaju od vanjskih prema unutrašnjim dijelovima estuarija, ovisno o gradijentu saliniteta (Greenwood, 2007.). Staništa estuarija čine izuzetno važan privredni resurs, ali su često pod velikim antropogenim utjecajem, jer se na takvim mjestima razvijaju gradovi.

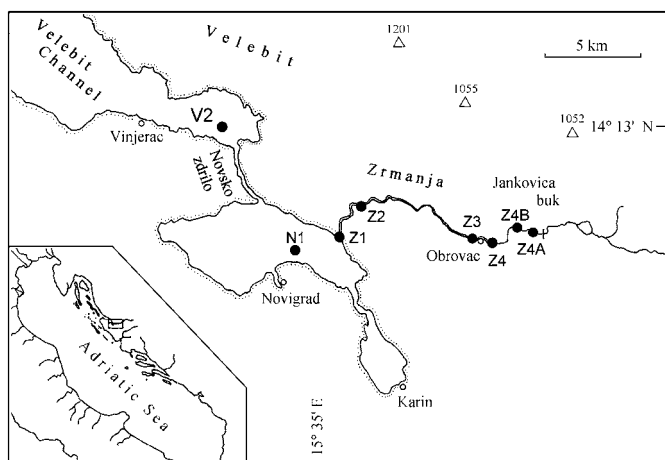
Antropogena eutrofikacija u području estuarija može štetno djelovati na ekološki sustav i na ljudsko zdravlje jer pogoduje pojavi virusnih infekcija i drugih zaraznih oboljenja kod riba, a intenzivna mikrobiološka razgradnja otpadne organske tvari može izazvati hipoksiju ili anoksiju u pridonemnom sloju. U usporedbi s drugim sličnim ekološkim sustavima u svijetu, naši estuariji uz koje su izgrađeni gradovi (npr. Šibenik uz estuarij Krke) nisu izloženi pretjeranoj eutrofikaciji (Svensen i sur., 2007.). Estuarij Zrmanje je pod još manjim antropogenim utjecajem nego estuarij Krke (Hrenović i sur., 2003.). Naše krške rijeke su oligotrofne pa je to jedan od razloga što je takvo i obalno more hrvatskog dijela Jadrana. Drugi je razlog relativne čistoće hrvatskoga obalnog mora specifična hidrodinamika Jadrana, jer se uz našu obalu proteže oligotrofna Istočnojadranska struja (siromašna hranjivim tvarima) iz istočnog Sredozemlja i Jonskog mora.

2. POLOŽAJ ESTUARIJA ZRMANJE

Rijeka Zrmanje je mala krška rijeka duga 69 km, koja nakon Jankovića buka prelazi u estuarij. Estuarij Zrmanje je položen između planinskog lanca Velebita sa sjevera i prostrane sjevernodalmatinske zaravni s juga i istoka (slika 1).

3. RAZDOBLJE ISTRAŽIVANJA I METODE

Istraživanja estuarija Zrmanje su provedena u okviru znanstveno-istraživačkih projekata Ministarstva znanosti Republike Hrvatske; broj 119121 (Organizmi i zajednice na kontaktu krških voda i mora), 119144 (Struktura i razvoj zajednica mikroalga u krškom estuariju) te 119-



Slika 1: Karta estuarija Zrmanje i položaj istraživanih postaja



A



B



C



D

Slika 2: Terenska istraživanja u estuariju Zrmanje provedena su istraživačkim brodom Hidra, Hrvatskog hidrografskog instituta, (slika 2a, b) i ribarskim barkama obitelji Baždarić iz Novigrada (slika 2c), CTD sondom i Niskinovim cpcima (slika 2d).

1191189-1228 (Struktura i razvoj zajednica mikroalga u trofičkom gradijentu). Interdisciplinarna istraživanja su proveli biolozi, kemičari i fizičari Biološkog i Geofizičkog zavoda Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta (Zagreb), Instituta Ruđer Bošković, Laboratorija za istraživanje mora i okoliša (Zagreb), Instituta za oceanografiju i ribarstvo i kasnije Sveučilišta (Dubrovnik) te Hrvatskog hidrografskog instituta (Split) (slika 2). Terenska istraživanja su provedena brodom Hidra, Hrvatskog hidrografskog instituta, (slika 2b) i ribarskim barkama obitelji Baždarić iz Novigrada (slika 2c). Uzorci za ekološka istraživanja su skupljeni Niskinovim crpcima (slika 2d), a termohalina svojstva su određena CTD sondom (slika 2d).

4. GEOMORFOLOŠKA I HIDROLOŠKA SVOJSTVA

Estuarij čini izrazito razveden i složen hidrogeomorfološki sustav (Bonacci, 1999.) u kojem more ulazi duboko u kopno i pod snažnim je utjecajem oborinskih voda (Fritz, 1972.). Zrmanja je krška rijeka koja najvećim dijelom protječe kroz karbonate, tako da nosi malu količinu suspendiranih čestica. Estuarij počinje od sedrene barijere Jankovića buka (slika 3), gdje se kod nižih vodostaja zaustavljaju suspendirane čestice (Juračić i Crmarić, 2003.). Estuarij Zrmanje dijeli se na gornji dio, od Jankovića buka do Novigradskog mora (slika 4a), srednji dio, koji uključuje dva proširenja: Novigradsko more (slika 4b) i Karinsko more te kratki donji dio estuarija, koji je ograničen na tjesnac Novsko ždrilo (slika 2d), što povezuje Novigradsko more i Velebitski kanal (slika 4c). Navedena geomorfološka podjela estuarija usklađena je s raspodjelom termohalinih svojstava i stratifikacijom vodenog stupca (Viličić i sur., 1999.). Područje sliva Zrmanje izloženo je jakoj eroziji (Vodička i Šturlan, 1991.). Oborinska voda ponire u porozno krško podzemlje u zaleđu i izvire u more kroz brojne potpovršinske izvore (vrulje) duž estuarija. Dotok vode s kopna, vjetrovi (pogotovo bura) i morfologija bazena reguliraju hidrodinamička svojstva Velebitskog kanala (Orlić i sur., 2000.) i estuarija Zrmanje (Olujčić i sur., 2007.). Vrijeme koje je potrebno da se zimi izmijeni voda iznad halokline u estuariju Zrmanje iznosi jedan do dva dana (Olujčić i sur., 2007.), dok je to vrijeme u susjednom estuariju Krke duže i iznosi 6 - 12 dana (Legović, 1991.).

Dotok vode Zrmanjom ovisi o režimu oborine, površini sliva, sastavu i svojstvima stijena. Dotok vode varira od $160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ u jesenskom kišnom razdoblju i za vrijeme proljetnog topljenja snijega, do minimalnih $0.95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ u ljetu (slika 5, tablica 1). U zimskim uvjetima s dotokom riječne vode većim od oko $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, čelo estuarija se povlači za oko dva kilometra nizvodno od Jankovića buka (Viličić i sur., 2008.) pa gornji dio estuarija funkcionira kao rijeka. Stalni utjecaj mora i kod jakih protoka je prisutan u pridnenom sloju nizvodno od postaje Z3 (slika 6). U takvim uvjetima niski površinski salinitet u Novskom ždrilu pokazuje snažno istjecanje površinske



Slika 3: Jankovića buk je ušće Zrmanje u more i najčešći položaj čela estuarija.



A



B

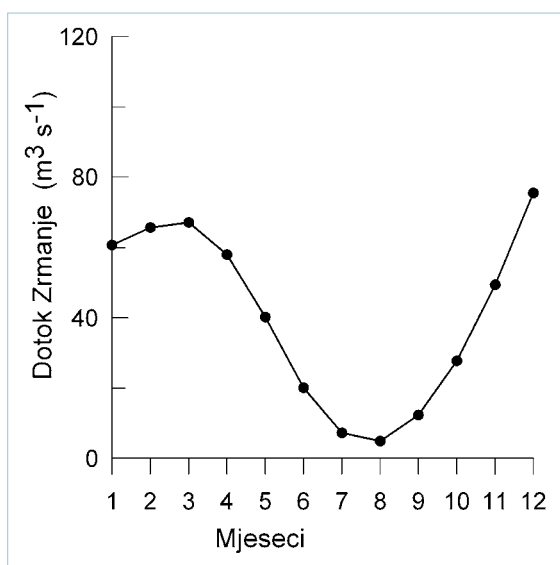


C

Slika 4: Gornji dio estuarija, između Obrovca i Novigradskog mora (slika 4a), srednji dio estuarija (Novigradsko more) (slika 4b) i unutrašnji dio Velebitskog kanala (slika 4c).

Tablica 1: Morfometrijske, hidrografske i biološke značajke estuarija Zrmanje (1998.-2000.)

Parametar	Min	Maks	Aritm. sredina	STD	Ukupno	Jedinica
Dužina					22.5	Km
Širina	0,05	3				Km
Dubina	5	40				m
Površina					22.05	Km ²
Volumen					0.37	Km ³
Raspon plime i oseke			20			cm
Dubina halokline (postaja Z4)	1,2	5	2,7			m
Dubina halokline (postaja Z2)	0,5	5	2,2			m
Površina sliva					854	Km ²
Godišnja oborina (Knin)	835	1133	966			mm
Mjesečna oborina (Knin)	0	221	80,60			mm
Mjesečni dotok vode (u 2000. g.)	0,95	162	19			m ³
Godišnji dotok vode (u 2000. g.)					5.9 x 10 ⁸	m ³
Temperatura	6,70	26,55	16,34			°C
Salinitet	0,00	38,00	18,05	13,35		PSU
Vidljivost Secchijevog diska	3	11	5,60	1,66		m
Mikrofitoplankton – abundancija	0,8	2128	163	361		10 ³ cells L ⁻¹
Fitoplankton - klorofil <i>a</i>	40	1130	280	240		ng L ⁻¹
PO ₄	0,00	0,25	0,07	0,06		μmol L ⁻¹
NO ₃	0,05	22,36	6,78	5,32		μmol L ⁻¹
TIN	0,00	23,10	7,60	5,35		μmol L ⁻¹
TIN/PO ₄	1	4002	149	299		
SiO ₄	0,10	43,90	11,30	9,77		μmol L ⁻¹
Zasićenje kisikom	64	115	95	35,70		%

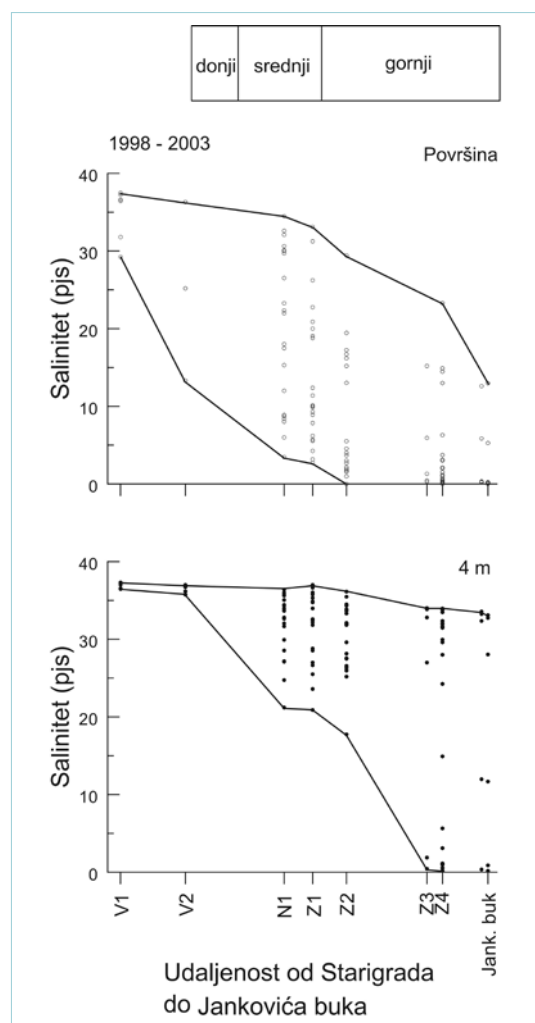


Slika 5: Srednji mjesečni dotok vode Zrmanjom

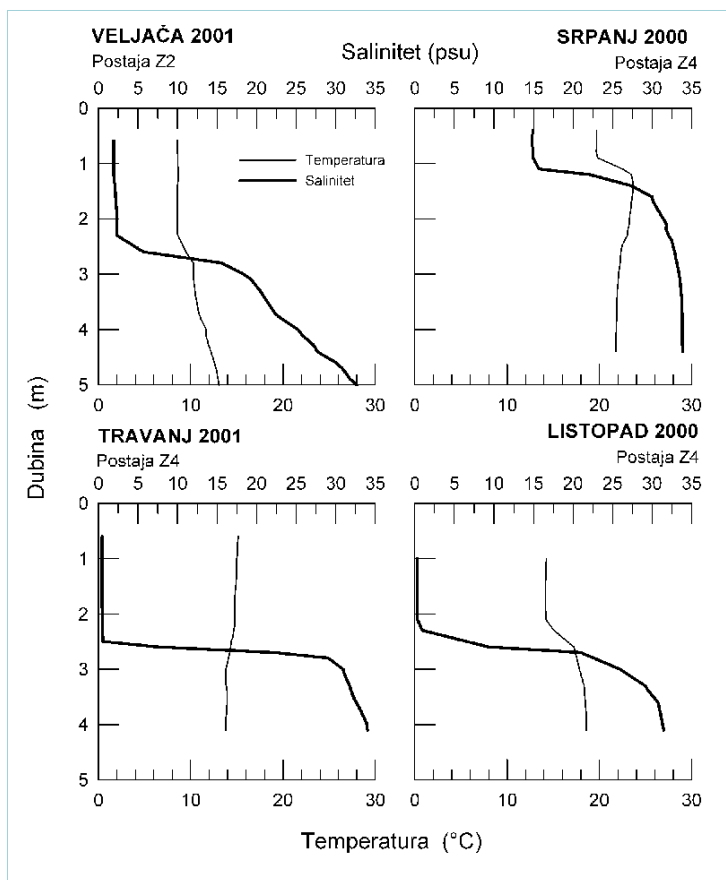
vode prema Velebitskom kanalu pa se estuarijska obilježja protežu i na južni dio Velebitskog kanala gdje reguliraju cirkulaciju (Orlić i sur., 2000.). Termoklina se najčešće poklapa s haloklinom.

5. SLOJEVITOST VODENOG STUPCA

Oštrina halokline u estuariju Zrmanje se povećava u vrijeme pojačanog dotoka slatke vode (slika 7), Viličić i sur., 1999.). Ljeti čelo estuarija uvijek dopire do slapova Jankovića buka. Oštrina halokline je tamo manja, jer se u nestabilnijim uvjetima morski sloj brže miješa s riječnom vodom iznad halokline. Ljeti je zanimljiv potpovršinski temperaturni maksimum u



Slika 6: Raspon saliniteta duž profila od Velebitskog kanala do početka estuarija Zrmanje (Jankovića buka), uz površinu i u pridnom sloju, na 4 m dubine



Slika 7: Stratifikacija vodenog stupca u gornjem dijelu estuarija Zrmanje, u četiri godišnja doba

sloju halokline, koji nastaje zbog selektivne absorpcije sunčeve energije na suspendiranim česticama nakupljenim u haloklini i ograničene vertikalne izmjene topline u području halokline. Fenomen je primijećen i u drugim estuarijima krških rijeka uz istočnu obalu Jadrana, u Krki (Legović i sur., 1991.) i Ombli (Viličić i sur., 1995.).

Haloklina je u gornjem dijelu estuarija najčešće položena na dubini između 2 i 3 m te je za 0.5 do 1 m dublje na postaji Z4 (kod Obrovca), nego 7 km nizvodno, u kanjonu gornjeg dijela estuarija (na postaji Z2, [slika 8](#)). Ekološki uvjeti iznad halokline su manje stabilni nego ispod halokline, što pokazuje razlike u salinitetu ([slika 9](#)). Na postaji Z2 salinitet je ispod halokline najčešće viši od 25.

6. PLANKTON – RASPODJELA I ČIMBENICI RAZVOJA

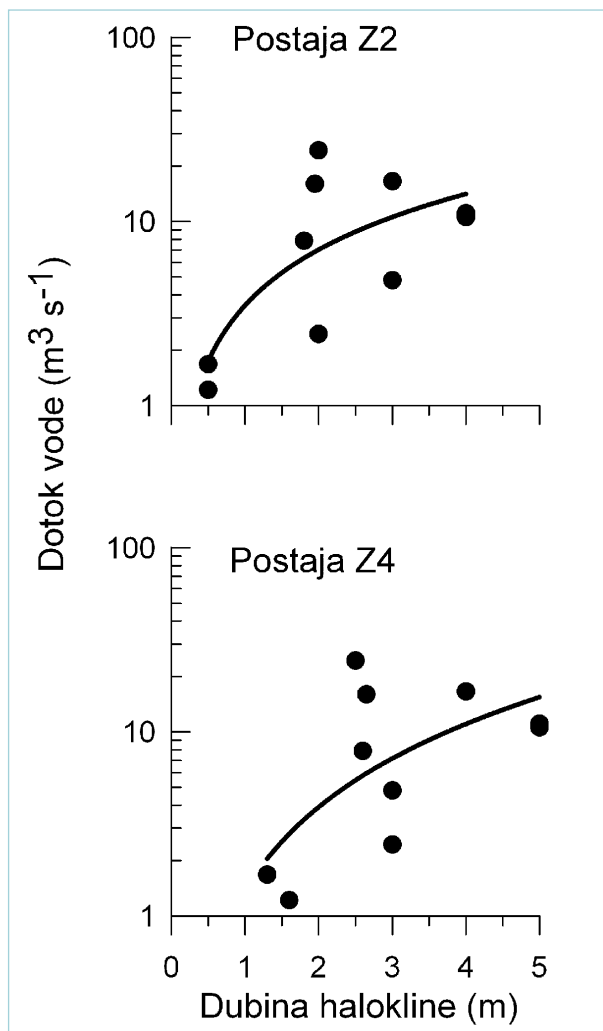
Termohalina svojstva i koncentracija hranjivih soli reguliraju biološka svojstva; prvenstveno sezonsku raspodjelu fitoplanktona (Viličić, 1989., Viličić i sur., 2008.) i mikrozooplanktona (Kršinić, 1980., 1987.) u estuariju.

Fitoplankton se bolje razvija u hidrološki stabilnijim uvjetima. Vrijednosti biomasa izražene koncentracijom klorofila *a* ([slika 10](#)) i abundancije izražene

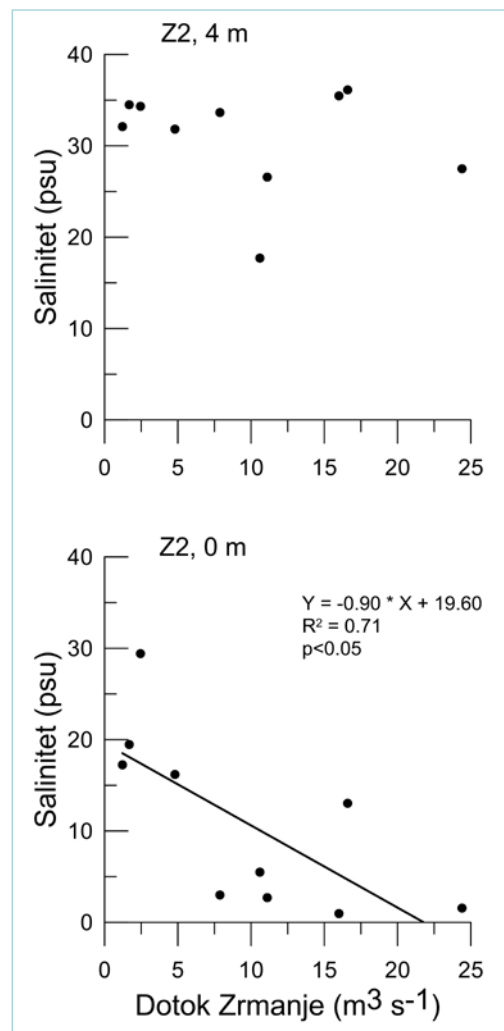
brojem stanica po litri uzorka ([slika 11](#)), manje su u uvjetima niskog saliniteta (< 10), dok je maksimalni razvoj fitoplanktona zabilježen u uvjetima saliniteta između 15 i 30. U svjetskoj literaturi je poznato da se morski fitoplankton razvija kod saliniteta većeg od 15, usprkos činjenici da postoje vrste s velikom tolerancijom saliniteta (McLusky, 1989.). Stenohaline morske vrste nisu prisutne kod nižeg saliniteta od 25. U subtropskom estuariju zabilježena je najveća biomasa fitoplanktona kod saliniteta između 5 i 23, uz prevladavajuće vrste s malim stanicama (Putland i Iverson, 2007.). Mnoge vrste se mogu prilagoditi životu u bočatim vodama, a njihov razvoj ovisi i o drugim čimbenicima (temperatura, svjetlost, hranjive tvari, interspecijski odnosi). U principu, veći donos hranjivih tvari riječnom vodom omogućava veći razvoj fitoplanktona. Vjerodostojnu korelaciju između dotoka Zrmanje i abundancije dijatomeja (kao prikladnih predstavnika autotrofnog fitoplanktona) u estuariju Zrmanje nije, na žalost, moguće izračunati zbog nedovoljnog broja raspoloživih podataka; pridružene vrijednosti su raspoložive samo za 2000. i 2003. godinu. Iako dvije točke na [slici 12](#) nisu primjeren i reprezentativni pokazatelj, mogu uputiti da

oko dva puta manji prosječni dotok vode Zrmanjom u razdoblju od siječnja do lipnja 2000. godine nego 2003. godine, daje oko osam puta veću prosječnu abundanciju dijatomeja u istom razdoblju 2003. godine. Sličan odnos je dobiven u sjeveroistočnom Jadranu, gdje je utvrđeno da dvostruko povećanje dotoka vode rijekom Po, u razdoblju od siječnja do lipnja, uzrokuje deseterostruko povećanje abundancije dijatomeja (Viličić i sur., 2009.).

Koncentracija hranjivih soli u estuariju Zrmanje je niska; koncentracija ortofosfata najčešće je manja od 0,1 $\mu\text{mol L}^{-1}$ ([slika 13](#)), a zasićenje kisikom je visoko, što pokazuje kako je estuarij oligotrofan ekološki sustav (Viličić i sur., 2008.). Slaba korelacija između saliniteta i ortofosfata pokazuje da je rijeka Zrmanja siromašna fosforom, što je svojstveno svim našim krškim rijekama. Koncentracija ortofosfata je najveća u srednjem dijelu estuarija (u Novigradskom moru), čemu jedino može biti razlog mikrobiološka regeneracija nizvodno u sedimentu ([slika 14](#)). Resuspenzijom sedimenta hranjive tvari obogaćuju vodeni stupac ispod halokline ([slika 15](#)). Zbog toga su biomasa fitoplanktona (koncentracija klorofila *a*) i abundancija dijatomeja najveće u Novigradskom moru ([slika 16, 17](#)). Obrnuto proporcionalna, značajna korelacija između saliniteta i koncentracije dušika, odnosno silikata ([slika 13](#)) te Box Whiskerovi dijagrami raspodjele ([slika 14](#)), pokazuju da je rijeka Zrmanja glavni izvor dušika i silikata u estuariju (Viličić i sur., 2008.). Vidljivost Se-



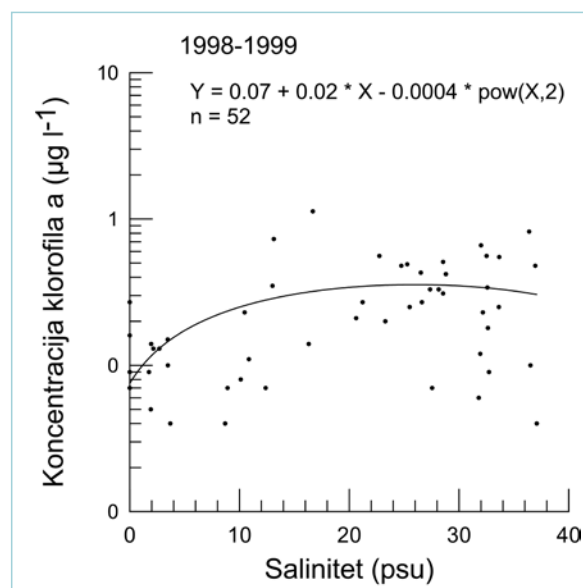
Slika 8: Odnos dubine halokline i dotoka riječne vode na dvije postaje u gornjem dijelu estuarija Zrmanje; bliže čelu estuarija (postaja Z4) i dalje od čela estuarija (postaja Z2)



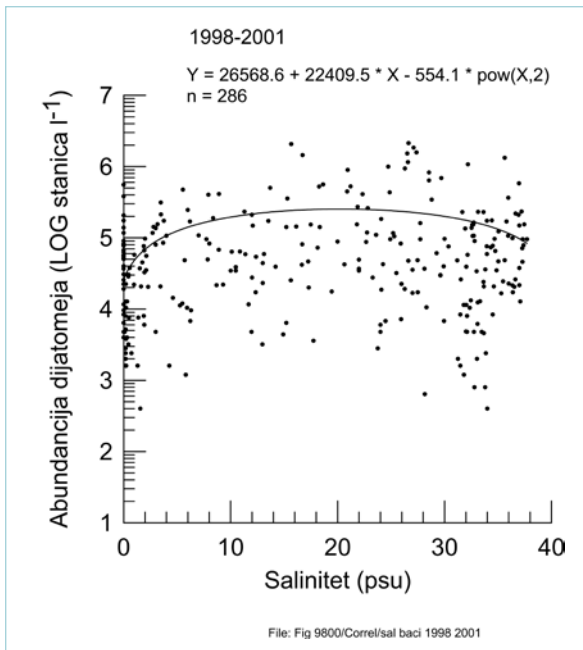
Slika 9: Utjecaj dotoka Zrmanje na vrijednosti saliniteta uz površinu i u pridonem sloju, na postaji Z2, u gornjem dijelu estuarija Zrmanje

cchijsve ploče u gornjem dijelu estuarija uvijek dostiže dno, što dokazuje da svjetlost nikad ne ograničava rast primarnih proizvođača. U unutrašnjem dijelu Velebitskog kanala prozirnost je oko dvaput veća nego u gornjem dijelu estuarija, a slična je kao u srednjem dijelu estuarija. U udaljenijim dijelovima Velebitskog kanala (kod Jablanca), prozirnost je prosječno dva puta veća nego u unutrašnjem dijelu Velebitskog kanala.

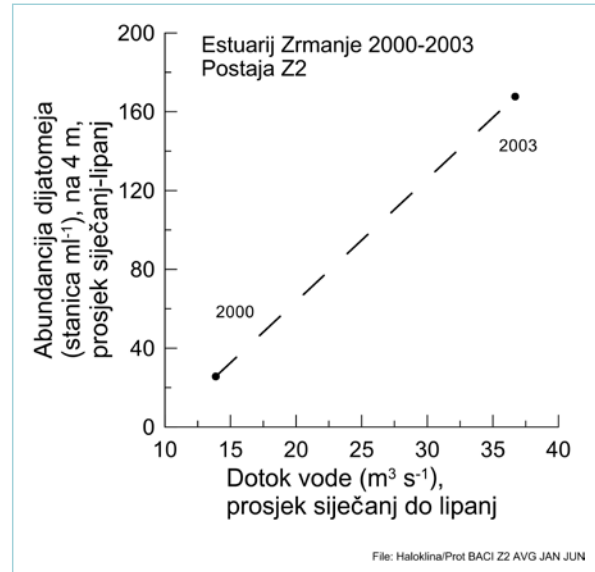
Koncentracija ortofosfata lokalno je povećana ispod halokline nizvodno od Obrovca (na postaji Z3), zbog obližnjeg ispusta otpadnih voda ispod halokline (slika 15). Nanoplanktonski miksotrofni protisti (dinoflagelati i kriptofiti) te heterotrofni protisti (cilijski), najbrojniji su upravo u području antropogenog utjecaja, gdje je prisutan dotok organske tvari i hranjivih tvari koje obogaćuju morski sloj (ispod halokline) (slika 16). Spomenuti mikroorganizmi, uz bakterije, sudjeluju u mikrobnj razgradnji otpadne organske tvari i regeneraciji hranjivih soli koje potiču razvoj krupnijeg fitoplanktona, pogotovo dijatomeja u Novigradskom moru.



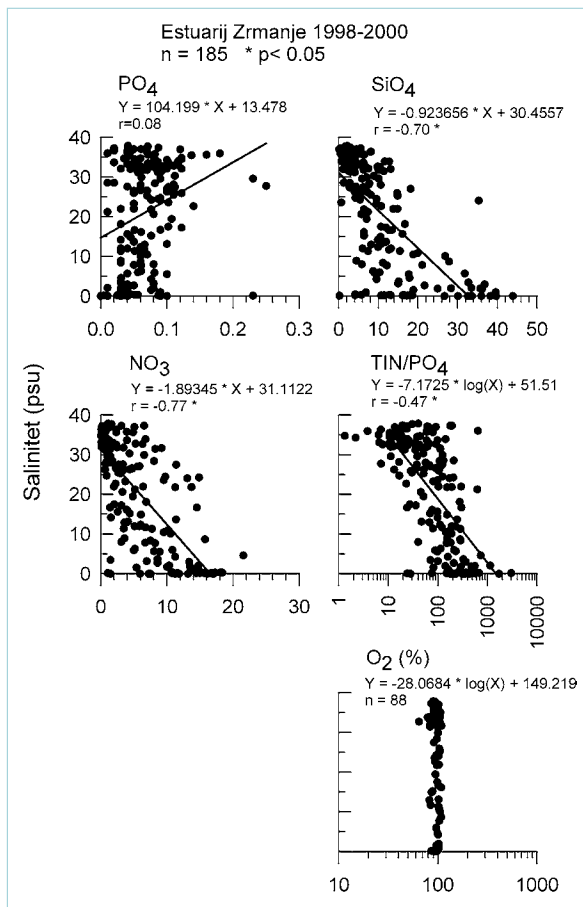
Slika 10: Razvoj fitoplanktona u uvjetima različitog saliniteta u estuariju Zrmanje



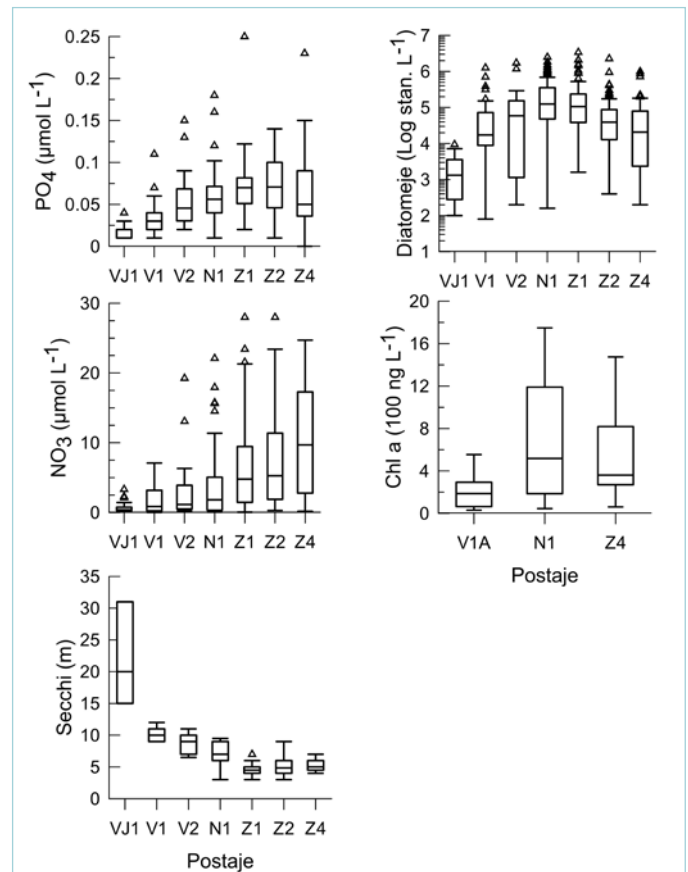
Slika 11: Razvoj alga kremenjašica (dijatomeja) u uvjetima različitog saliniteta u estuariju Zrmanje



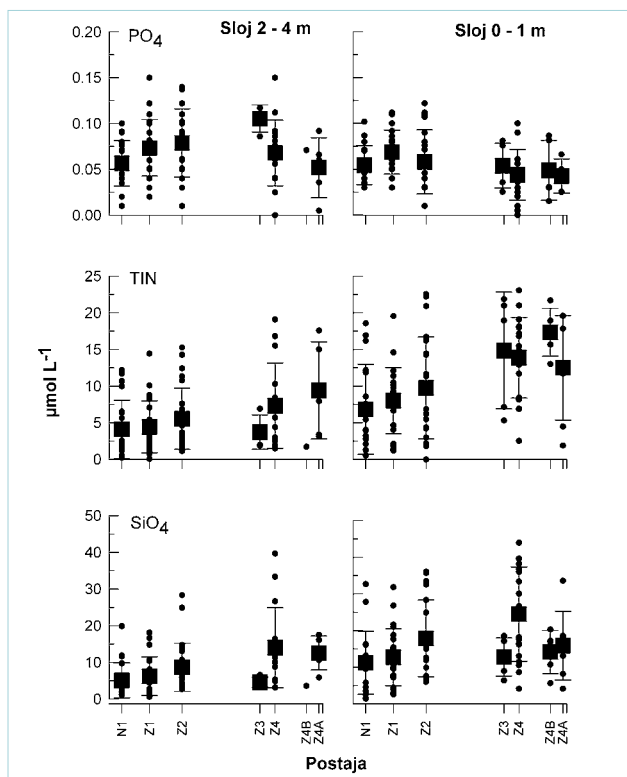
Slika 12: Odnos između prosječnog dotoka Zrmanje i prosječne abundancije dijatomeja, u razdoblju od siječnja do lipnja



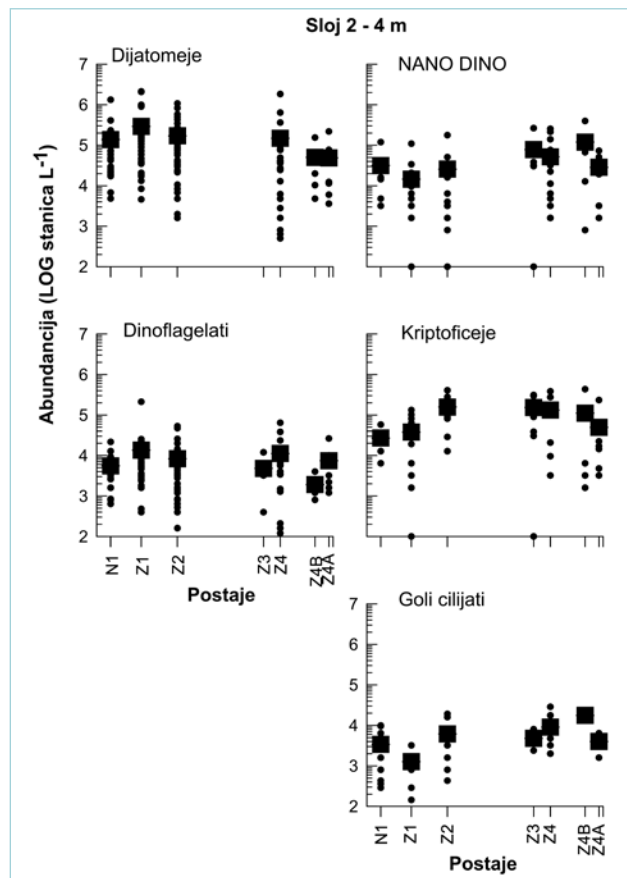
Slika 13: Korelogrami između saliniteta i koncentracija ortofosfata, nitrata, ortosilikata, Redfieldovog omjera i zasićenja kisikom.



Slika 14: Raspodjela ortofosfata, nitrata, prozirnosti (vidljivosti Secchijeve ploče), abundancije dijatomeja i ukupne biomase fitoplanktona izražene kao koncentracija klorofila *a*, duž Velebitskog kanala (postaja VJ1 – Jablanac, postaja V1 – Starigrad) i estuarija Zrmanje. Box-Whiskerovi dijagrami pokazuju raspon između 25 i 75 % podataka (donji do gornji rub četverokuta), medijan (horizontalna linija), raspon vrijednosti (vertikalne linije) i ekstremne vrijednosti (pojedinačne vrijednosti iznad maksimuma).



Slika 15: Uzdužna raspodjela hranjivih soli ortofosfata, ukupnog anorganskog dušika i ortosilikata u estuariju Zrmanje, u sloju 0-1 m i u sloju 2-4 m dubine.



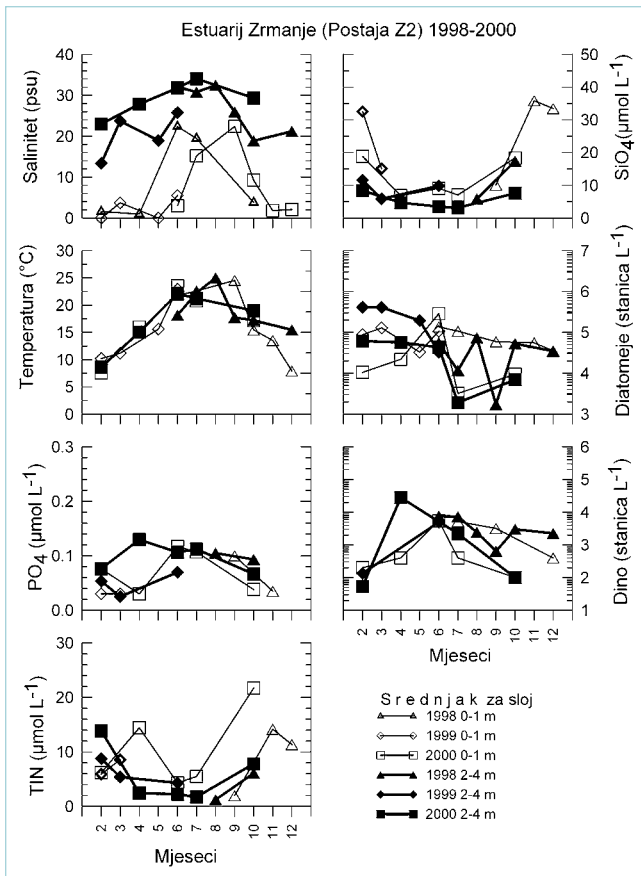
Slika 16: Uzdužna raspodjela fitoplanktona (dijatomeja, ukupnih dinoflagelata, nanoplanktonskih dinoflagelata, kriptofita) i trepetljikaša u estuariju Zrmanje, u morskom sloju (ispod halokline).

Dotok riječne vode opada ljeti, (lipanj do rujan), pa salinitet iznad halokline tada raste do 22,4 (slika 17). Salinitet ispod halokline varira između 13,4 i 34,1. Temperatura varira između 7,6 °C u veljači i 24,5 °C u kolovozu (na površini). Koncentracije ukupnog anorganskog dušika pokazuju ljetni minimum, kao rezultat potrošnje nakon proljetnog razvoja fitoplanktona i zanemarivog dotoka antropogenog dušika ljeti. Koncentracije silikata manje su od 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ u moru, a povećane su vrijednosti iznad halokline (maksimum 35,9 $\mu\text{mol L}^{-1}$) u kišnom razdoblju. Krupniji morski fitoplankton čine uglavnom diatomeje. Intenzivno cvjetanje fitoplanktona nije zabilježeno u razdoblju od 1998. do 2000., jer je maksimalna abundancija diatomeja i mikroflagelata bila manja od do 2×10^6 , odnosno 6×10^5 stanica L^{-1} . Relativno niske abundancije fitoplanktona u estuariju Zrmanje rezultat su, pored ostalog, ograničavajućeg učinka ortofosfata. Najčešći omjer između molarnih koncentracija ukupnog dušika i ortofosfata (Redfieldov omjer, TIN/PO_4) znatno je veći od 16, pogotovo za vrijeme povećanog dotoka riječne vode, što dokazuje određivanje hranjivih soli koje ograničavaju rast fitoplanktona (ukupnog anorganskog dušika i ortofosfata) kod bilo kojeg saliniteta (slika 18).

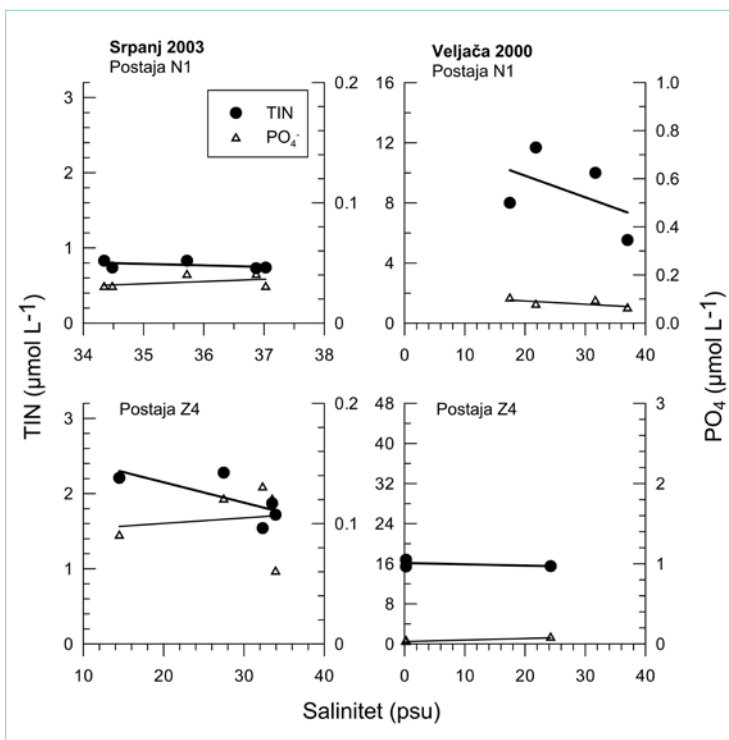
Na osnovi statističke analize razlikuju se ekološka svojstva u tri područja estuarija Zrmanje; u gornjem dijelu (od čela estuarija do postaje Z4), u srednjem kanjonskom dijelu (oko postaje Z2) te u srednjem proširenom dijelu estuarija (postaje Z1 i N1) (slika 19).

Raspodjela fitoplanktona duž profila od Velebitskog kanala do rijeke Zrmanje nije jednolika i odraz je termohalinih promjena, koncentracije hranjivih tvari, svjetlosnih prilika (Viličić i sur., 1999., 2008.) i izmjene vode u estuariju (Olujčić i sur., 2007.). Relativno kratkotrajna izmjena vode u estuariju Zrmanje iznad halokline (šest puta kraće vrijeme nego u Krki), jedan je od razloga što manju biomasu fitoplanktona nalazimo u estuariju Zrmanje nego u estuariju Krke. Međutim, brzinu strujanja treba istovremeno valorizirati s koncentracijom hranjivih tvari. To je pokazala usporedba uvjeta rasta fitoplanktona u dva ekstremna slučaja u estuariju Zrmanje; zimi i ljeti. Termohalini odnosi duž estuarija u veljači (slika 20) pokazuju pojačan dotok riječne vode i hranjivih tvari uz veliku izmjenu vode u estuariju. Suprotno, termohalini odnosi u srpnju (slika 21) pokazuju slab dotok vode, reduciranu izmjenu vode u estuariju i nedostatak hranjivih soli u nizvodnom smjeru (Viličić i sur., 2008.). U veljači u gornjem dijelu estuarija vladaju nestabilni hidrodinamički uvjeti i usprkos dovoljnoj količine hranjivih soli razvoj fitoplanktona nije moguć. Razvoj se događa u stabilnijem srednjem dijelu estuarija (slika 22). U srpnju mali dotok riječne vode održava hidrodinamičku stabilnost, donosi malu količinu hranjivih tvari, ali dovoljnu za razvoj nanoplanktonskih bičaša i malih diatomeja u gornjem dijelu estuarija (slika 23). Ljeti su česte nanoplanske jednostanične diatomeje (*Chaetoceros throsseni*), nanoplanktonski dinoflagelati (*Prorocentrum minimum*), kriptofita i zeleni bičaši (klorofita).

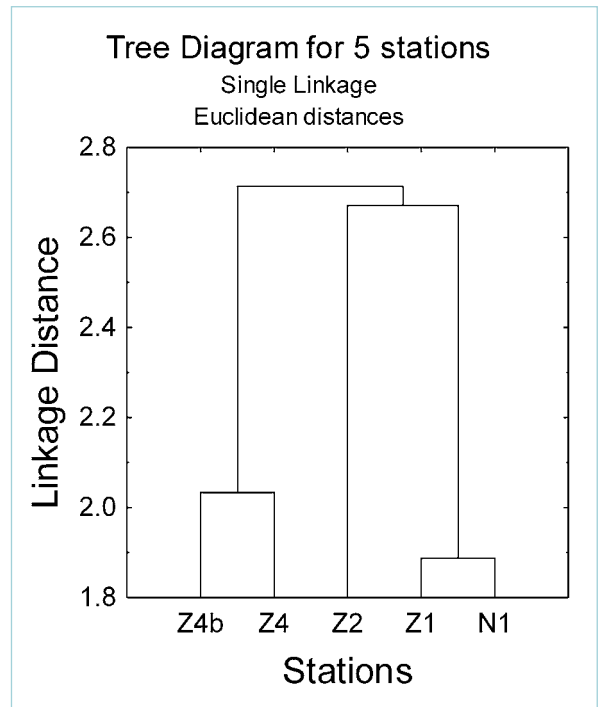
U specifičnim uvjetima estuarija Zrmanje nalazimo karakterističnu zajednicu fitoplanktona (Burić i sur., 2007., Viličić i sur., 2008.) i mikrozooplanktona (lorikatnih cilijata



Slika 17: Sezonska raspodjela termohalinih uvjeta, hranjivih soli (ortofosfata, ukupnog anorganskog dušika i ortosilikata) i fitoplanktona (dijatomeja i dinoflagelata) u površinskom (0-1 m) i pridnenom (2-4 m) sloju gornjeg dijela estuarija Zrmanje.



Slika 18: Koncentracije ukupnog anorganskog dušika (TIN) i ortofosfata (PO_4) u funkciji saliniteta u srednjem (postaja N1) i gornjem (postaja Z4) dijelu estuarija Zrmanje. Niža linija trenda pokazuje ograničavajuću hranjivu sol

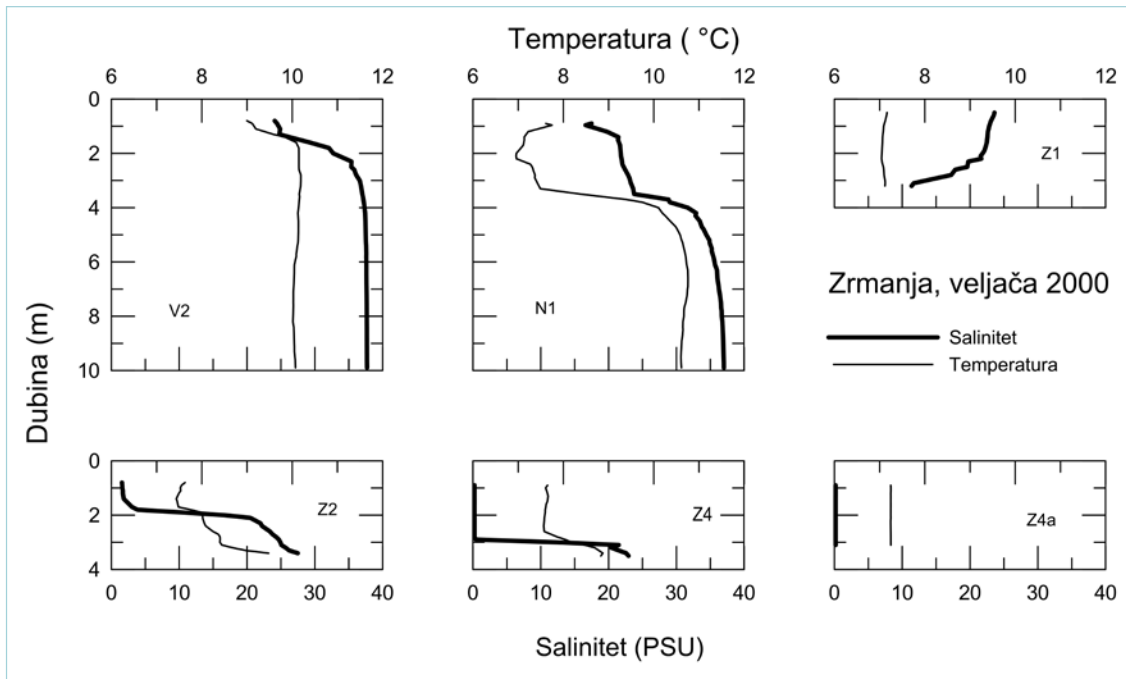


Slika 19: Klaster diagram za pet postaja u estuariju Zrmanje dobiven na osnovi analize prosječnih vrijednosti temperature, saliniteta, abundancije fitoplanktona (mikrofitoplanktona, dijatomeja, dinoflagelata, kokolitoforida), koncentracije ukupnog anorganskog dušika, ortofosfata i ortosilikata u razdoblju 1998. – 2000. Položaj postaja pokazuje slika 1.

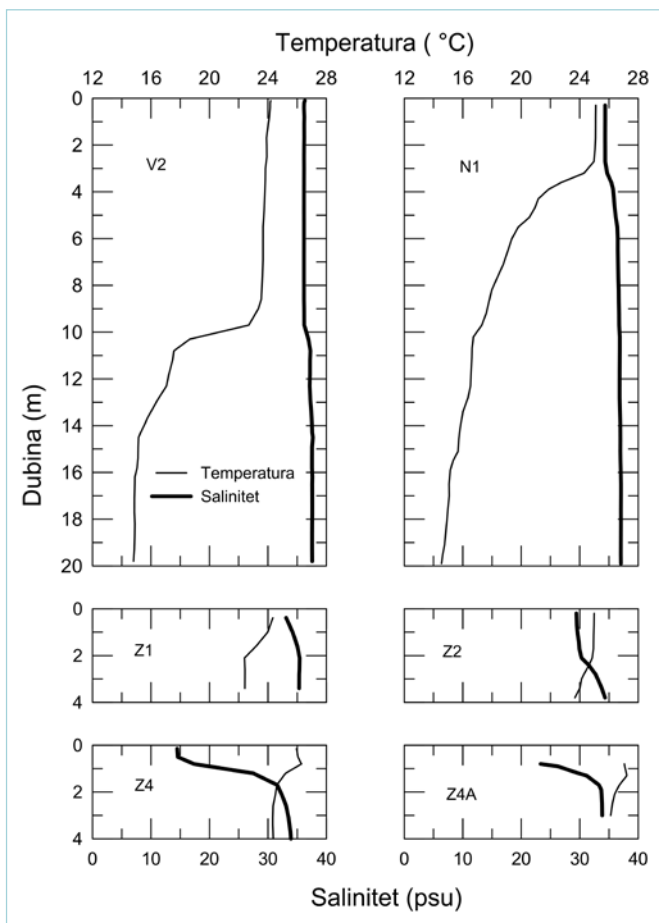
– tintinida) (Kršinić 1987.), svojstvenu za oligotrofno stanje okoliša. Najbrojnije su stanice dijatomeja (tablica 2, slika 24), dok je abundancija bičaća manja. Značajniji razvoj nekih vrsta tintinida događa se ljeti ispod halokline pa čini važan izvor hrane za pridnene filtratore u srednjem dijelu estuarija. Abundancija mikrozooplanktona najveća je u Novigradskom moru, a populacije se protežu u estuarij ispod halokline. Estuarij je bogat malom plavom ribom – inčunom (Sinovčić, 2004.). Nakon spolne zrelosti inčun migrira prema dubljim dijelovima vanjskog dijela estuarija (Sinovčić, 2000.).

Sezonski razvoj fitoplanktona u estuariju Zrmanje objašnjava Pearsonov korelogram koji pokazuje značajnu i negativnu korelaciju između temperature i dijatomeja te pozitivnu korelaciju između temperature i miksotrofnih dinoflagelata i kokolitoforida (tablica 3).

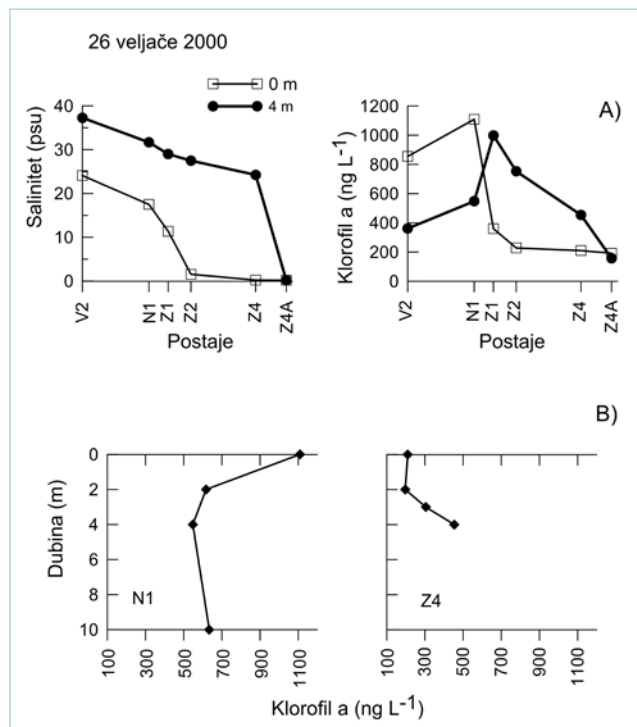
Vertikalna raspodjela fitoplanktonskih vrsta odraz je stratifikacije vodenoga stupca i pokazuje položaj halokline (tablica 4). Slatkovodne vrste, koje se razvijaju u akumulaciji hidroelektrane Velebit, nakupljaju se uz gornji rub halokline, što pokazuje vrste poredane na lijevoj strani tablice, ali se protežu i u morski sloj, jer stanice tonu kroz haloklinu ili ih uvlači struja u morski sloj. Iznad halokline zastupljene su slatkovodne dijatomeje čija je abundancija povećana na postaji bližoj



Slika 20: Vertikalna raspodjela temperature i saliniteta u Velebitskom kanalu (postaja V2) i u estuariju Zrmanje (postaje N1 – Z4A), 26. veljače 2000.



Slika 21: Vertikalna raspodjela temperature i saliniteta u Velebitskom kanalu (postaja V2) i u estuariju Zrmanje (postaje N1 – Z4A), 18. lipnja 2003.



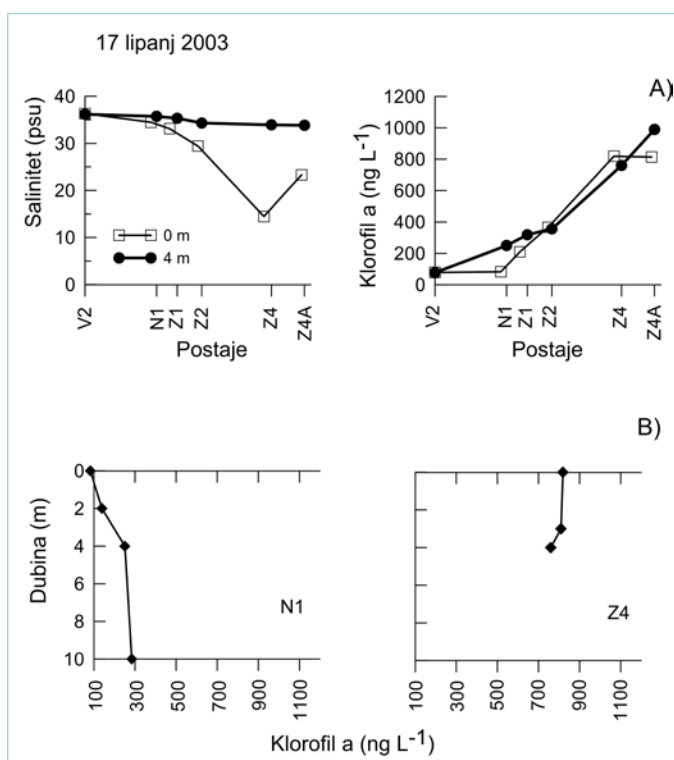
Slika 22: Uzdužna (A) i vertikalna (B) raspodjela saliniteta i biomase fitoplanktona (koncentracije klorofila a), u estuariju Zrmanje, 26. veljače 2000.

Jankovića buku (postaja Z4). Morskim vrstama koje su ograničene na sloj ispod halokline, abundancija se povećava nizvodno (prema moru, na postaji Z2).

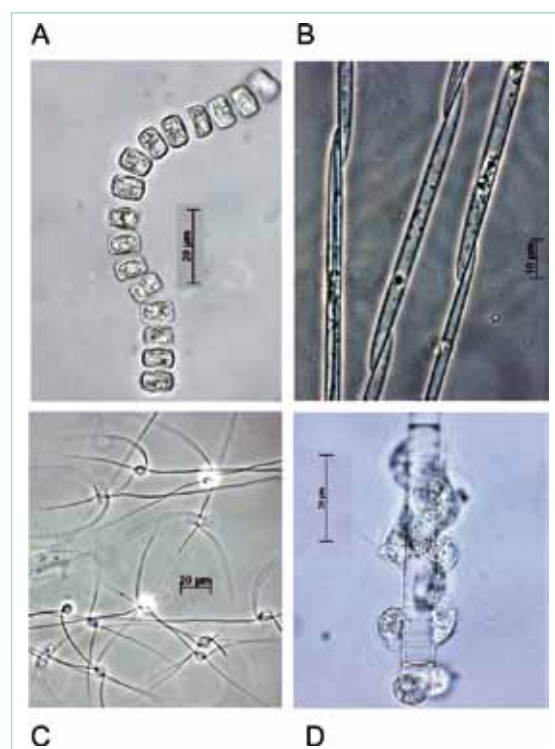
Termohalini odnosi i izmjena vodenih masa u istraživanom području izuzetno su važni za razvoj populacija planktonskih organizama, trofičke odnose i prijenos materije u ekosustavu. Dobiveni rezultati mogu poslužiti za

Tablica 2: Popis dominantnih taksona fitoplanktona (maksimalna abundancija $>5 \times 10^3$ stanica L^{-1} , frekvencija >10) u estuariju Zrmanje, u razdoblju od lipnja 1998. do veljače 2001. n (1998/99 + 2000/01) = 163 + 154. B – dijatomeje, C – krizoficeje, D – dinoflagelati. Masnim slovima su označeni taksoni čija je relativna učestalost (Fr) $>30\%$, a maksimalna abundancija (Maks) $>10^6$ stanica L^{-1} . Vol. st. – stanični volume izražen u μm^3 po stanici.

	Taxa	Vol. st.	Maks 1998/99	Maks 2000/01	Fr 1998/99	Fr 2000/01
B	<i>Cerataulina pelagica</i> (Cleve) Hendey	1847	21600	5000	40	20
B	<i>Chaetoceros diversus</i> Cleve	300	15200	16000	17	18
B	<i>Chaetoceros simplex</i> Ostenf.	360	46400	28800	17	10
B	Chaetoceros socialis Lauder	280	161300	2501000	21	41
B	<i>Chaetoceros</i> sp.	400	7200	790500	13	17
B	<i>Cocconeis scutellum</i> Ehrenb.	700	50000	27200	45	50
B	Cyclotella sp.	260	2058000	483900	63	45
B	<i>Dactyliosolen fragilissimus</i> (Berg.) Hasle	3500	12800	12800	26	24
C	Dinobryon sp.	800	251800	1120000	33	31
B	<i>Guinardia striata</i> (Stolter.) Hasle	27000	106500	36000	25	10
D	<i>Gymnodinium "simplex"</i> (Lohm.) Kof. et Sw.	1600	157700	153000	37	24
C	<i>Gymnodinium</i> sp.	-	48000	35200	25	22
D	<i>Gyrodinium</i> sp.	-	12800	6400	19	20
B	<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve	390	124800	12800	29	14
B	<i>Leptocylindrus mediterraneus</i> (Perag.) Hasle	5000	21800	6400	31	15
B	<i>Licmophora</i> sp.	-	7200	8000	18	15
B	<i>Nitzschia longissima</i> (Breb.) Ralfs.	50	19200	38200	37	46
B	<i>Proboscia alata</i> (Brightw.) Sund.	52000	11200	31200	27	20
D	<i>Prorocentrum micans</i> Ehrenb.	10000	109400	11200	49	14
D	<i>Prorocentrum minimum</i> (Pav.) Schiller	1020	70000	234300	29	32
B	Pseudo-nitzschia spp.	600	1749000	118100	45	31
B	<i>Rhizosolenia imbricata</i> Brightw.	17000	44000	11200	30	13
B	<i>Thalassionema nitzschioides</i> Grun.	530	173200	267100	60	44



Slika 23: Uzdužna (A) i vertikalna (B) raspodjela saliniteta i biomase fitoplanktona (koncentracije klorofila *a*), u estuariju Zrmanje, 18. srpnja, 2003.



Slika 24: Dominantne dijatomeje u estuariju Zrmanje. A – *Cyclotella choctawhatcheeana*, B – *Pseudo-nitzschia* sp., C – *Chaetoceros socialis*, D – *Leptocylindrus mediterraneus* sa simbiotima

Tablica 3: Pearsonova korelacija između analiziranih parametara u estuariju Zrmanje. Analiza je dobivena na osnovi 76 transformiranih podataka (Log+1) iz uzoraka ispod halokline, dobivenih na postajama N1, Z1 i Z2, u razdoblju 1998.-2000. godine. Istaknute su korelacije s razinom značajnosti $p < 0.05$ (*) i $p < 0.001$ (**).

	DIA	DINO	COCCO	TEMP	SAL	TIN	PO ₄	SiO ₄
DIA		-0.002	0.059	-0.487**	-0.029	0.009	-0.128	-0.202
DINO			0.461**	0.339**	0.239*	-0.243*	-0.202	-0.190
COCCO				0.421**	0.320	-0.389**	-0.243*	-0.128
TEMP					0.357*	-0.469**	0.029	-0.030
SAL						-0.612**	0.083	-0.536**
TIN							-0.347	0.591**
PO4								-0.012

procjenu dinamike populacija i zaštitu ovoga jedinstvenog ekološkog sustava.

7. ZAŠTITA ESTUARIJA

Područje Zrmanje i njenog estuarija predviđeno je zaštititi zakonom (u kategoriji parka prirode), jer je vrlo atraktivna krajobrazna cjelina (NN br 81, Uredba 1472, od 3. kolovoza 1999). Godine 2000. Ministarstvo zaštite okoliša Republike Hrvatske započinje kompleksnu zaštitu Velebita uz pomoć međunarodnog kapitala. Rijeka Zrmanja čini jugoistočnu granicu tog krševitog kompleksa i usko je povezana s hidrologijom slivnog područja rijeke Zrmanje i velebitskog podzemlja pa je odlučeno provođenje aktivne zaštite područja uz rijeku Zrmanju. Kroz slivno područje rijeke Zrmanje je izgrađena suvremena prometnica kojom su povezani kontinentalni i primorski dijelovi Hrvatske. Takav veliki zahvat, kao i ostatci nekadašnje tvornice glinice ostavili su tragove zagađenja u prostoru (Viličić, 2001.). Prirodni procesi u estuariju ovise

o hidrološkim svojstvima rijeke te o antropogenom utjecaju. Područje između ličke visoravni i sjevernodalmatinske zaravni je slabo naseljeno i gospodarski nerazvijeno. To je područje u kojem se očekuje gospodarski razvoj i obnova cjelokupnog života, a sliv rijeke Zrmanje je u budućnosti važan izvor podzemne vode potrebne stanovništvu i gospodarstvu te važan čimbenik uspješnog razvoja ribarstva u donjem dijelu estuarija i u susjednom Velebitskom kanalu. Zdrav okoliš ubuduće ovisi o zaštiti čitavog hidrološkog sustava slivnog područja rijeke Zrmanje i estuarija.

8. ZAHVALA

Istraživanja u estuariju Zrmanje provedena su uz financijsku potporu Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa RH. Istraživanja su najvećim dijelom obavljena dvjema ribarskim barkama Ive i Ante Baždarića iz Novigrada. Zahvaljujem anonimnim recenzentima na korisnim primjedbama. ■

Tablica 4: Vertikalna raspodjela abundancije fitoplanktona (stanica L⁻¹) u estuariju Zrmanje (na postajama Z2 i Z4), 26. veljače 2000. godine. Syn ul – *Synedra ulna*, Syn ac – *Synedra acus*, Dia elo – *Diatoma elongatum*, Bac del – *Bacteriastrium delicatulum*, Ch cur – *Chaetoceros curvisetus*, Ch div – *Chaetoceros diversus*, Lep med – *Leptocylindrus mediterraneus*, Cyc – *Cyclotella coctawhatcheeana*, Pseudo – *Pseudo-nitzschia* spp. 0 označava abundancije < 40 stanica L⁻¹.

Postaja	Dubina	Salinitet	Syn	Syn	Dia	Bac	Ch	Ch	Lep	Cyc	Pseudo
	(m)	(PSU)	ul	ac	elo	del	cur	div	med		
Z2	0	1.55	800	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1.62	1600	800	16800	1200	0	0	0	0	0
	2	16.65	800	2400	8000	14400	520	200	40	9600	2000
	3	24.92	1000	0	0	62010	1200	200	160	12800	2400
	4	27.48	0	0	0	23200	160	320	80	16000	1600
Z4	0	0.24	1000	600	0	0	0	0	0	0	0
	2	0.24	2400	800	0	0	0	0	0	0	0
	3	12.34	200	1600	0	1600	320	200	0	1200	600
	4	24.24	400	0	0	20400	360	2800	40	3600	24000

LITERATURA

- Bonacci, O. (1999.): Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja. *Hydrological Sciences Journal* 44, 373-386.
- Burić, Z., Kiss, K.T., Ács, E., Viličić, D., Caput Mihalić, K., Carić, M. (2007.): The occurrence and ecology of the centric diatom *Cyclotella choctawhatcheeana* Prasad in a Croatian estuary. *Nova Hedwigia*, 84, 135-153.
- Burić, Z., Caput, K., Viličić, D. (2004.): Distribution of the diatom *Cocconeis scutellum* in the karstic estuary (Zrmanja, eastern Adriatic Sea). *Biologia*, 59, 1 – 8.
- Burić, Z., Cetinić, I., Viličić, D., Caput Mihalić, K., Carić, M., Olujić, G. (2007.): Spatial and temporal distribution of phytoplankton in a highly stratified estuary (Zrmanja, Adriatic Sea). *Marine Ecology*, 28 (Suppl. 1), 169 – 177.
- 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.
- Denant, V., Saliot, A., Mantoura, R.F.C. (1991.): Distribution of algal chlorophyll and carotenoid pigments in a strati-

- fied estuary: the Krka river, Adriatic Sea. *Marine Chemistry*, 32, 285 – 297.
- Cauwet, G. (1991.): Carbon inputs and biogeochemical processes at the halocline in a stratified estuary: Krka River. *Marine Chemistry*, 32, 269 – 283.
- Fritz, F. (1972.): Razvitak gornjeg toka rijeke Zrmanje. *Krš Jugoslavije*, 8, 1-16.
- Fuks, D., Devescovi, M., Precali, R., Krstulović, N., Šolić, M. (1991.): Bacterial abundance and activity in the highly stratified estuary of the Krka river. *Marine Chemistry*, 32, 333 – 346.
- Greenwood, M. F. D. (2007.): Nekton community change along estuarine salinity gradients: Can salinity zones be defined? *Estuaries and Coasts*, 30, 537–542.
- Haralambidou, K., Sylaios, G., Tsihrintzis, V.A. (2010.): Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 90, 174 – 184.
- Hoeksema, S.D., Chuwen, B.M., Potter, I.C. (2009.): Comparisons between the characteristics of ichthyofaunas in nearshore waters of five estuaries with varying degrees of connectivity with the ocean. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 85, 22 – 35.
- Hrenović, J., Viličić, D., Stilinović, B. (2003.): Influence of nutrients and salinity on heterotrophic and coliform bacteria in the shallow, karstic Zrmanja Estuary (eastern Adriatic Sea). *Ekoloji*, 12, 29 – 37.
- Ibanez, C., Prat, N., Canicio, A. (1996.): Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and Estuary. *Regulated Rivers: Research and Management*, 12, 51 – 62.
- Juračić, M., Crmarić, R. (2003.): Holocenski sedimenti i sedimentacija na ušćima rijeka istočne obale Jadrana. *Zbornik radova 3. hrvatske konferencije o vodama* (ur. D. Gereš), 277 – 233, Sveučilišna tiskara, Zagreb
- Kršinić, F. (1980.): Kvalitativna i kvantitativna istraživanja tintinida uz istočnu obalu Jadranskog mora. *Acta Adriatica*, 21, 19 – 104.
- Kršinić, F. (1987.): Tintinnines (Ciliophora, Oligotrichida, Tintinnina) in eastern Adriatic bays. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 24, 527-538.
- Legović, T. (1991.): Exchange of water in a stratified estuary with an application to Krka (Adriatic Sea). *Marine Chemistry*, 32, 121 – 135.
- Legović, T., Gržetić, Z., Žutić, V. (1991.): Subsurface temperature maximum in a stratified estuary. *Marine Chemistry*, 32, 163 – 170.
- McLusky, D.S. (1989.): *The estuarine ecosystem*. Chapman and Hall, New York, USA.
- Mikac, N., Kwokal, Ž., May, K., Branica, M. (1989): Mercury distribution in the Krka River estuary (east Adriatic coast). *Marine Chemistry*, 28, 109 – 126.
- Olujčić, G., Mihanović, H., Carić, M., Gržetić, Z. (2007.): Izmjena vode u stratificiranom estuariju Zrmanje. *Zbornik radova 4. hrvatske konferencije o vodama* (ur. D. Gereš), 185-192, Sveučilišna tiskara, Zagreb.
- Orlić, M., Ferenčak, M., Gržetić, Z., Limić, N., Pasarić, Z., Smirčić, A. (1991.): High – frequency oscillations observed in the Krka Estuary. *Marine Chemistry*, 32, 137 – 151.
- 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.
- Putland, J.N., Iverson, R.I. (2007.): Phytoplankton biomass in a subtropical estuary: distribution, size composition and carbon:chlorophyll ratios. *Estuaries and Coasts*, 30, 878 – 885.
- Sinovičić, G. (2000.): Anchovy, *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758): biology, population dynamics and fisheries case study. *Acta Adriatica*, 41, 1 – 54.
- Sinovičić, G. (2004.): Growth and length-weight relationship of the juvenile anchovy, *Engraulis encrasicolus*, in the nursery ground (Zrmanja River estuary – eastern Adriatic Sea). *Journal of Applied Ichthyology*, 20, 79 – 80.
- Sinovičić, G., Franičević, M., Čikeš Keč, V. (2004.): Unusual occurrence and some aspects of biology of juvenile gilt sardine (*Sardinella aurita* Valenciennes, 1847) in the Zrmanja River estuary (eastern Adriatic). *Journal of Applied Ichthyology*, 20, 53 – 57.
- Sinovičić, G., Zorica, B. (2006.): Reproductive cycle and minimal length at sexual maturity of *Engraulis encrasicolus* (L.) in the Zrmanja River estuary (Adriatic Sea, Croatia). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 69, 439 – 448.
- Svensen, C., Viličić, D., Wassmann, P., Arashkevich, E., Ratkova, T. (2007): Plankton distribution and vertical flux of biogenic matter during high summer stratification in the Krka Estuary (Eastern Adriatic). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 71, 381 – 390.
- Viličić, D. (1989.): Phytoplankton population density and volume as indicators of eutrophication in the eastern part of the Adriatic Sea. *Hydrobiologia*, 174, 117-132.
- Viličić, D. (2001.): Estuarij rijeke Zrmanje – ljepota i nebriga. *Hrvatske Vode*, 36, 313–316.
- Viličić, D., Legović, T., Žutić, V. (1989.): Vertical distribution of phytoplankton in a stratified estuary. *Aquatic Sciences*, 51, 31 – 46
- Viličić, D., Jasprica, N., Carić, M. (1995.): Estuarij rijeke Omble: "cvjetanje" fitoplanktona, eutrofikacija i zaštita. *Zbornik radova 1. hrvatske konferencije o vodama* (ur. D. Gereš), 497 – 506, Sveučilišna tiskara, Zagreb.
- Viličić, D., Orlić, M., Burić, Z., Carić, M., Jasprica, N., Kršinić, F., Smirčić, A., Gržetić, Z. (1999.): Patchy distribution of phytoplankton in a highly stratified estuary (the Zrmanja estuary, October 1998). *Acta Botanica Croatica*, 58, 105–125.
- Viličić, D., Terzić, S., Ahel, M., Burić, Z., Jasprica, N., Carić, M., Caput-Mihalić K., Olujčić, G. (2008.): Phytoplankton abundance and pigment biomarkers in the oligotrophic, eastern Adriatic estuary. *Environmental Monitoring and Assessment*, 142, 199 – 218.
- Viličić, D., Djakovac, T., Burić, Z., Bosak, S. (2009.): Composition and annual cycle of phytoplankton assemblages in the north-eastern Adriatic Sea. *Botanica Marina*, 52, 291 – 305.
- Vodička, V., Šturlan, J. (1991.): *Vode Hrvatske*. Hrvatska vodoprivreda, Zagreb.
- Žutić, V., Legović, T. (1987.): A film of organic matter at the freshwater/seawater interface of an estuary. *Nature*, 328, 612 – 614.

ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ZRMANJA ESTUARY

Abstract. The Zrmanja estuary is a highly stratified system with a sharp halocline separating the brackish layer from the marine layer and different communities of pelagic organisms. The halocline accumulates suspended solids and shows the maximum of summer subsurface temperature. In winter, water exchange above the halocline lasts from one to two days, which is six times shorter than in the neighbouring Krka estuary. The Zrmanja water inflow of over $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ causes movement of the estuary foreshore by 2 km downstream the cascade of the Jankovića buk, which makes this part of the estuary extremely environmentally unstable. Phytoplankton development depends on the halocline stability, nutrient inflow from the Zrmanja River or submarine springs, velocity of water exchange in the estuary and microbiological regeneration of nutrient salts. The estuary's oligotrophic character is proved by high transparency (depth of euphotic layer of over 5 m), absence of both hypoxia and anoxia and rare occurrences of phytoplankton blooms. Former economic activity near Obrovac occasionally leaves traces of pollution in the estuary.

Key words: estuary, hydrography, productivity, Zrmanja River, Adriatic sea

ÖKOLOGISCHE EIGENSCHAFTEN DES ÄSTUARS DES FLUSSES ZRMANJA

Zusammenfassung. Das Ästuar des Flusses Zrmanja ist ein hochstratifiziertes System mit einer scharfen Halokline, die Brackwasserschicht und Salzwasserschicht sowie unterschiedliche Gemeinschaften von pelagischen Organismen trennt. Suspendierte Stoffe sammeln sich in der Halokline, die ein Sommermaximum der Unterflächentemperatur aufweist. Der Wasseraustausch oberhalb der Halokline dauert im Winter 1-2 Tage, sechs Mal kürzer als im benachbarten Krka-Ästuar. Ein über $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hoher Zufluss von Zrmanja verschiebt das obere Ende des Ästuars zwei Kilometer bis Jankovića Buk flussabwärts, so ist dieser Teil des Ästuars ökologisch außerordentlich instabil. Die Entwicklung des Phytoplanktons ist von der Stabilität der Halokline, Zufluss der Nährstoffe mit dem Flusswasser und aus Unterseequellen, Dauer des Wasseraustausches im Ästuar und mikrobiologischer Regeneration von Nährsalzen abhängig. Der oligotrophe Charakter des Ästuars lässt sich erkennen durch hohe Durchsichtigkeit (die Tiefe der euphotischen Schicht beträgt über 5 m) sowie durch die Tatsachen, dass Hypoxie und Anoxie nicht vorliegen und Phytoplankton selten blüht. Die frühere wirtschaftliche Tätigkeit bei Obrovac hinterlässt noch immer zeitweise Verschmutzungsspuren im Ästuar.

Schlüsselwörter: Ästuar, Hydrographie, Produktivität, Zrmanja, das Adriatische Meer