Morfologija i ekologija dinoflagelata Prorocentrum arcuatum Issel iz jezera Zmajevo oko

Žmarić, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:989708

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Biološki odsjek

Marko Žmarić

Morfologija i ekologija dinoflagelata *Prorocentrum arcuatum* Issel u jezeru Zmajevo oko

Diplomski rad

Zagreb, 2022.

Ovaj rad je izrađen u Laboratoriju za biološku oceanografiju na Botaničkom zavodu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Zrinke Ljubešić. Rad je predan na ocjenu Biološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu radi stjecanja zvanja magistra ekologije i zaštite prirode.

Zahvala

Zahvalnost dugujem svojoj mentorici, izv. prof. dr. sc. Zrinki Ljubešić na neizmjernom strpljenju i razumijevanju te stručnim savjetima bez kojih ovaj rad ne bi bio izrađen.

Zahvaljujem se Antoniji Matek na pomoći i vrijednim savjetima pri statističkoj obradi podataka. Također se zahvaljujem ostalim članicama Laboratorija za biološku oceanografiju na gostoprimstvu, susretljivosti i ugodno provedenom vremenu tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se Hrvatskoj zakladi za znanost u sklopu čijeg projekta: „Rogozničko morsko jezero kao model odziva ekosustava na promjene u okolišu“ (IP-2018-01-1717, MARRES) je izrađen ovaj rad.

Zahvaljujem se Ireni Ciglenečki i Sandi Skejić na podacima potrebnima za izradu ovoga rada.

Zahvaljujem se svim prijateljima što su bili uz mene sve ove godine i obogatili moj život.

Zahvaljujem se obitelji, a posebno roditeljima Sunčani i Damiru na beskrajnom razumijevanju.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Biološki odsjek Diplomski rad

Morfologija i ekologija dinoflagelata *Prorocentrum arcuatum* Issel u jezeru Zmajevo oko

Marko Žmarić

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Vrsta *Prorocentrum arcuatum* Issel je fotosintetski dinoflagelat specifičan po rijetkoj pojavnosti u okolišu, dok je u meromiktičnom jezeru Zmajevo oko zabilježen kao dominanta vrsta u fitoplanktonskoj zajednici. Istražena je morfometrija stanica i dinamika pojavljivanja vrste *P. arcuatum* u euksiničnom jezeru Zmajevo oko. Učestalost pojavljivanja vrste *P. arcuatum*, za analizirano razdoblje od 1998. do 2021. godine, iznosila je 22,4%. Razvijala se većinom u toplijem dijelu godine, u razdoblju od lipnja do rujna, s najvećom abundancijom u lipnju 2018. godine (90530 st. L^{-1}). Najveća brojnost vrste zabilježena je u sloju iznad kemokline, a temperatura je glavni čimbenik koji pozitivno korelira s pojavnošću. Morfometrijske značajke stanica su odstupale od dosadašnjih podataka te su stanice bile manje s prosječnom dužinom stanica 58,26 ± 4,45 µm. Morfometrija vrste je varirala kroz istraživano razdoblje, a značajno je korelirana s ekološkim čimbenicima, prvenstveno temperaturom te koncentracijom otopljene i čestične organske tvari.

Ključne riječi: meromiktičko jezero, morfometrija, anoksija, dinoflagelati

(69 stranica, 35 slike, 11 tablica, 78 literaturnih navoda, jezik izvornika: hrvatski)
Rad je pohranjen u Središnjoj biološkoj knjižnici
Voditelj: izv. prof. dr. sc. Zrinka Ljubešić
Ocjenitelji: 1. izv. prof. dr. sc. Zrinka Ljubešić
2. prof. dr. sc. Renata Matoničkin Kepčija
3. izv. prof. dr. sc. Marija Gligora Udovič

Rad prihvaćen: 7.9.2022.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of science
Department of Biology

Graduation Thesis

Morphology and ecology of dinoflagellate *Prorocentrum arcuatum* Issel in lake Zmajevo oko

Marko Žmarić

Rooseveltov trg 6, 10000 Zagreb, Hrvatska

Species *Prorocentrum arcuatum I*ssel is a photosynthetic dinoflagellate specific for its rare occurrence in the environment, while in the meromictic lake Zmajevo oko it was recorded as the dominant species in the phytoplankton community. Cell morphometry and the dynamics of the appearance of *P. arcuatum i*n the euxinic Lake Zmajevo oko were investigated. The frequency of appearance of the species *P. arcuatum* for the analyzed period from 1998 to 2021 was 22.4%. Its occurrence and abundance are highest in the warmer period of the year, from June to September, while the highest abundance of the species was recorded in June 2018 (90530 cells L^{-1}). It reached the highest abundances in the layer above the chemocline, the temperature as the main factor positively correlated with its occurrence. The morphometric characteristics of the cells deviated from the previous data, and the cells were smaller with an average cell length of 58.26 ± 4.45 µm. Morphometry of species varied throughout the researched period, and was significantly correlated with environmental factors, primarily temperature, and the concentration of dissolved and particulate organic matter.

Key words: meromictic lakes, cell morphometry, anoxia, dinoflagellates

(69 pages, 35 figures, 11 tables, 78 references, original in: Croatian)
Thesis deposited in the Central Biological Library
Keywords.: meromictic lake, Rogoznica, anoxia, dinoflagellates
Supervisor: dr. Zrinka Ljubešić. Assoc. Prof.
Reviewers: 1. dr. Zrinka Ljubešić, Assoc. Prof.
2. dr. Renata Matoničkin Kepčija, Prof.
3. dr. Marija Gligora Udovič, Assoc. Prof.

Thesis accepted: 7.9.2022

Sadržaj

1. Uvod....1
1.1 Fitoplankton....1
1.1.2 Dinoflagelati....3
1.1.3 Rod *Prorocentrum*....6
1.1.4 *Prorocentrum arcuatum* Issel....6
1.1.4.1 Građa *Prorocentrum arcuatum*....8
1.1.4.2 Morfometrija *Prorocentrum arcuatum*....10
1.1.4.3 Ekologija *Prorocentrum arcuatum*....11
1.1.4.4 Distribucija *Prorocentrum arcuatum*....12
1.2 Obilježja meromiktičkih jezera....13
1.2.1 Organska tvar....16
1.3 Jezero Zmajevo oko....18
1.3.1 Fitoplankton u jezeru Zmajevo oko....24
1.3.2 *Prorocentrum arcuatum* u jezeru Zmajevo oko....26
2. Cilj istraživanja....27
3. Materijali i metode....28
3.1. Uzorkovanje....28
3.2 Obrada podataka....31
4. Rezultati....32
4.1 Dominantne vrste fitoplanktona....32
4.2 Vremenska raspodjela dinoflagelata *Prorocentrum arcuatum*....33
4.3 Morfometrijske značajke stanica *P. arcuatum* u odnosu na okolišne uvjete u jezeru Zmajevo oko....34
5. Rasprava....56
6. Zaključak....60
7. Literatura....61
8. Životopis....69

1. Uvod

1.1 Fitoplankton

Fitoplankton su fotosintetski mikroorganizmi raspršeni u vodenom stupcu, a naseljavaju sve vodene ekosustave, od slatkovodnih izvora, jezera, laguna, obalnih morskih područja do otvorenih oceanskih voda. Kvantitativno su ovi organizmi najznačajniji i najrasprostranjeniji primarni proizvođači biosfere te time i temelj trofičke piramide (Field i sur. 1998, Fahey i sur. 2017). Prostorna i sezonska raspodjela fitoplanktona direktna je posljedica različitih okolišnih čimbenika poput raspoloživosti hranjivih tvari, specifičnih temperaturnih raspona, dostupnosti i intenzitetu svjetlosti te cirkulacije vodenih masa i tipova (Kirchman 2000; Cushman-Roisin i sur. 2001; Mousing i sur. 2016). Osim kao mikroskopske solitarne stanice, neke tvore višestanične agregate u obliku nakupina, niti i dr. koji su vidljivi golim okom. Prema Sieburth i sur. 1978 veličinske frakcije fitoplanktona dijelimo na: pikoplankton (<2 μm), nanoplankton (2–20 μm) i mikroplankton (>20 μm). Navedeni veličinski razredi u ukupnoj biomasi fitoplanktona veoma variraju od područja do područja. Na relativni doprinos veličinskih razreda u zajednici utječe količina hranjivih tvari, fizikalni i hidrološki uvjeti, kao i atmosferski utjecaji na određenom području.

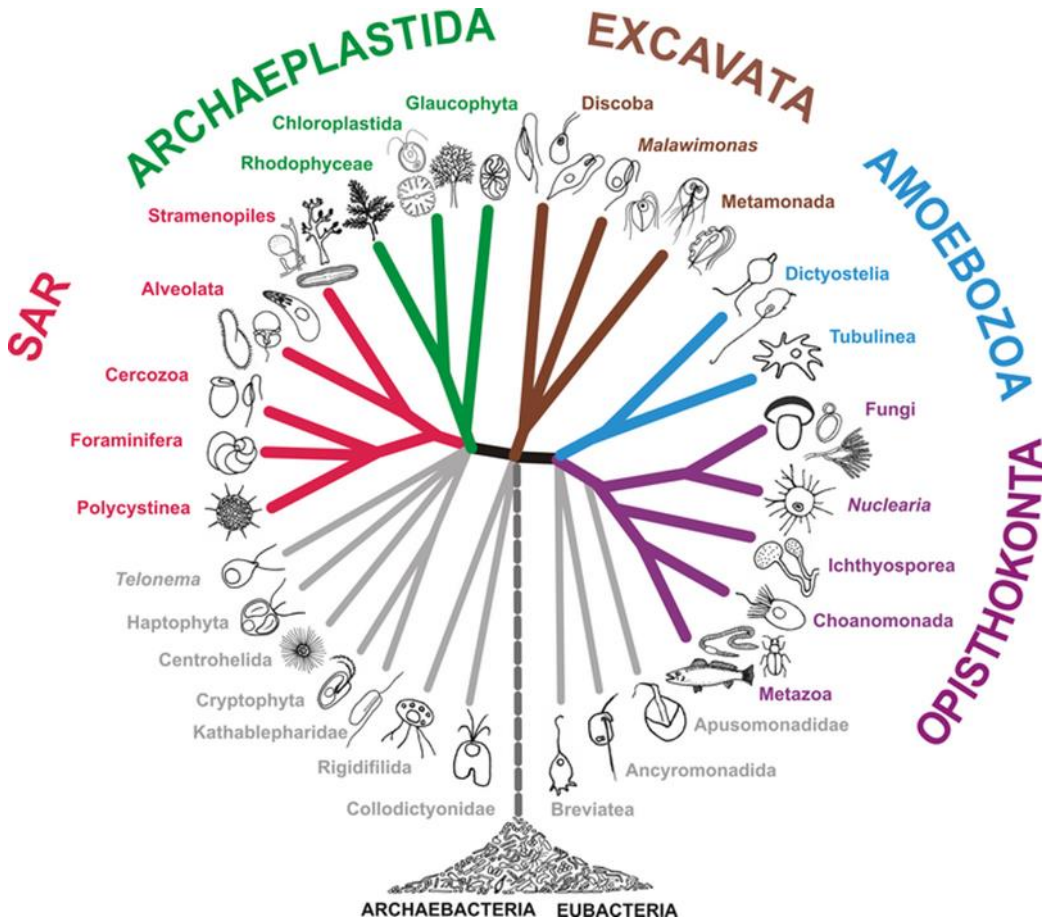
Na abundanciju fitoplanktona najviše utječu količina i dostupnost hranjivih tvari, kojih ima relativno jednako u svim morima no njihova se dostupnost veoma razlikuje. U pravilu, u morima u kojima dolazi do miješanja vodenih masa nutrijenti su mnogo dostupniji. Na miješanje vodenih masa utječu atmosferske prilike, morske struje te sama hidrografska svojstva mora. Također, abundancija i taksonomski sastav populacija fitoplanktona promjenjiva je i teško predvidiva u vremenu, a sezonske varijacije dominiraju vremenskim uzorcima abundancije fitoplanktona, posebno u velikim i dubokim jezerima te morskim ekosustavima (Basset i sur. 2008).

Glavne fitoplanktonske skupine su dijatomeje, dinoflagelati i cijanobakterije. Jedna od važnih svojstava fitoplanktona je preživljavanje nepovoljnih uvjeta tvoreći ciste. Kad dođe do povoljnih uvjeta dolazi do germinacija cista i njihove ponovno resuspenzije u vodeni stupac (Smetacek 1985). Većina stanica fitoplanktona nema staničnu stijenku, već periplast, gušći dio protoplazme koji preuzme funkciju memebrane, te često nailazimo na modifikacije periplasta poput pločica, kućica ili ljuski koje tvori celuloza, silikati ili karbonati. Zahvaljujući tim uklopinama, često tvore razne strukture kojima povećavaju površinu stanica, ili se pak povezuju u kolonije što im omogućuje duže zadržavanje u vodenom stupcu. Vrijeme

zadržavanja u vodenom stupcu je uvjetovano fizikalnim procesima u vodenom stupcu poput miješanja ili stratifikacije.

Fitoplankton je ključni proizvođač organske tvari u jezerima, posebno u pelagičnom pojasu, pri čemu pelagične alge i cijanobakterije uvjetuju pravilno funkcioniranje prehrambenog lanca. Kratko generacijsko vrijeme fitoplanktona, uzrokovano većinom obogaćivanjem jezera hranidbenim tvarima, uzrokuje nagle promjene u vodenom okruženju koje se događaju brzo i izravno te djeluju na cijeli vodeni ekosustav. Fitoplankton može biti rani indikator promjena u vodenom okolišu. Zbog stalnih prijetnji eutrofikacije vodenih okoliša, kao i povećanja stratifikacije uslijed globalnog porasta temperature, znanje o planktonskim algama i cijanobakterijama iznimno dobiva na značaju.

Vrste koje smatramo fitoplanktonom pripadaju dvijema filogenetskim grupama SAR (akronim SAR dolazi od prvih slova imena Stramenopila, Alveolata i Rhizaria) i Archaeplastida (Slika 1).

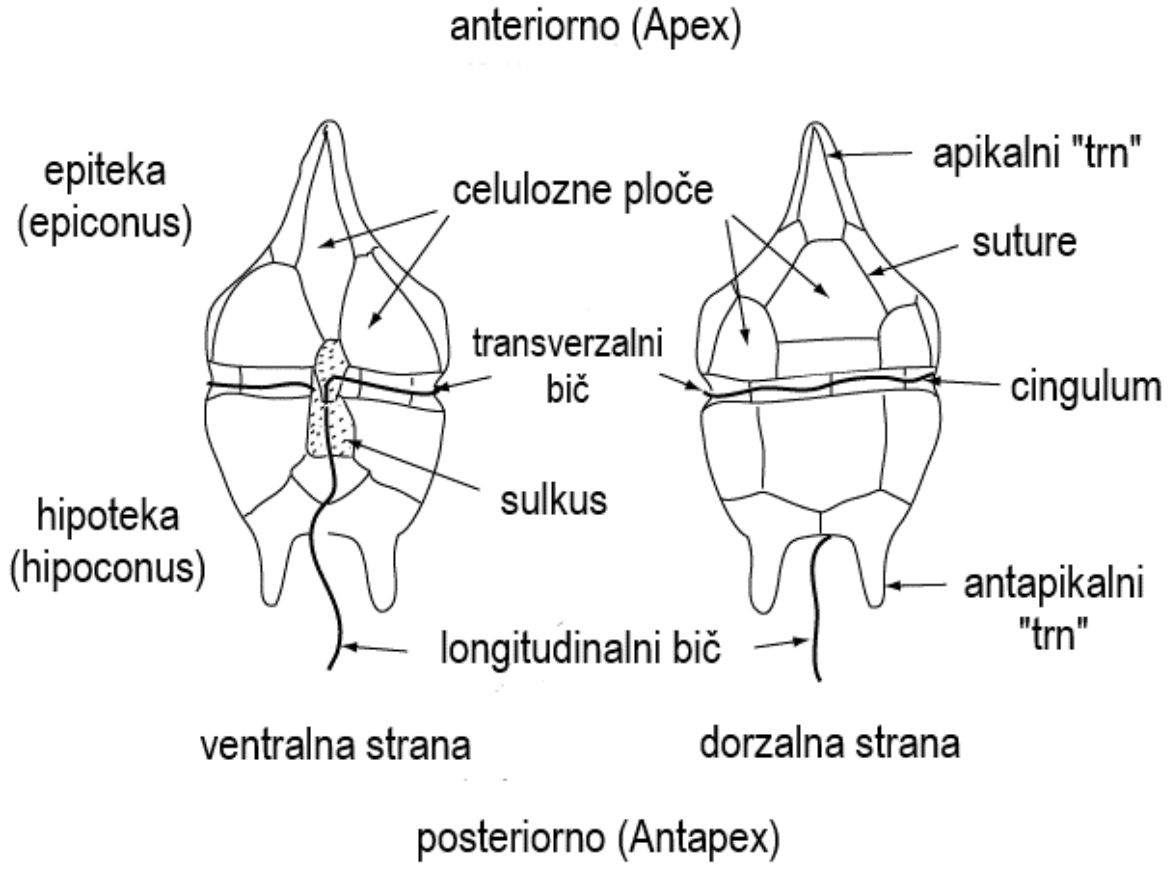


Slika 1. Filogenija eukariota koja odražava ovdje predstavljenu klasifikaciju (Preuzeto iz Adl i sur. 2012)

Prema Viličić i sur. (2002), fitoplankton Jadrana sastoji se od 888 utvrđenih vrsta. S 518 zabilježenih vrsta dijatomeje čine dominantnu fitoplanktonsku skupinu Jadrana. Sjeverni Jadran karakteriziraju penatne dijatomeje, dok centrične dominiraju južnim Jadranom. Osim najbrojnijih dijatomeja, zabilježeno je 264 vrsta dinoflagelata, 101 primnesiofita, 2 Chrysophyceae, 1 Raphidophyceae i 2 vrste Euglenophyceae.

1.1.2 Dinoflagelati

Dinoflagelati su uz dijatomeje najvažniji predstavnici mikrofitoplanktona i nanofitoplanktona. Pronalazimo ih i u morskim i slatkovodnim ekosustavima, no oko 90% vrsta su stanovnici mora gdje žive slobodno lebdeći u vodenom stupcu, iako postoje i bentoske, epifitske, parazitske i simbiotske vrste. Iako široko rasprostranjeni, najzastupljeniji su u toplim morima te je njihova brojnost najveća tijekom toplih mjeseci. Vrlo su dobro prilagođeni okolišu u kojemu žive, što pokazuje i njihova evolucijska starost koja seže na početak eukariotske



Slika 2. Građa dinoflagelata (Preuzeto i prilagođeno: URL1)

evolucije. Jednostanični su organizmi, građom i podijeklom veoma kompleksni, te morfološki raznoliki. Obuhvaćaju 8 redova, 130 rodova te približno 1200 opisanih vrsta.

Svaki predstavnik posjeduje dva nejednaka biča otkuda i ime dinoflagelat koje doslovno prevodimo kao „vrtložni bičevi“ (flagele). U mnogih dinoflagelata susrećemo bioluminiscenciju pa se ova skupina često naziva svijetlećim bičašima. Nemaju pravu staničnu stijenku već njihovu površinu prekriva omotač nazvan amfijezma, a specifična je samo za dinoflagelate. One predstavnike kod kojih je amfijezma kruta nazivamo tekatnim, dok one kod kojih je ona odsutna nazivamo golim ili netekatnim. Tekatni se međusobno razlikuju po broju i rasporedu pločica, te se na temelju toga determiniraju (Slika 2). Za razliku od njih, pri determinaciji one netekatne je neophodno određivati u živom stanju, jer se međusobno razlikuju po obliku, načinu kretanja i po obliku i broju kromatofora. Većina predstavnika ove skupine ima gornju (epitheca) i donju polovicu (hypotheca) među kojima se nalazi poprečna brazda ili cingulum, dok se ventalno nalazi udužna brazda ili sulculus. Iz svake brazde izlazi po jedan bič, odnosno iz cinguluma izlazi transvezalni bič koji služi pri rotaciji stanice, dok iz sulculusa izlazi uzdužni bič koji stanicu pokeće naprijed. Za dinoflagelate je karakteristična velika jezgra nazvana dinokarion s trajno kondenziranim kromosomima. Stanice imaju vakuoliziranu jezgru.

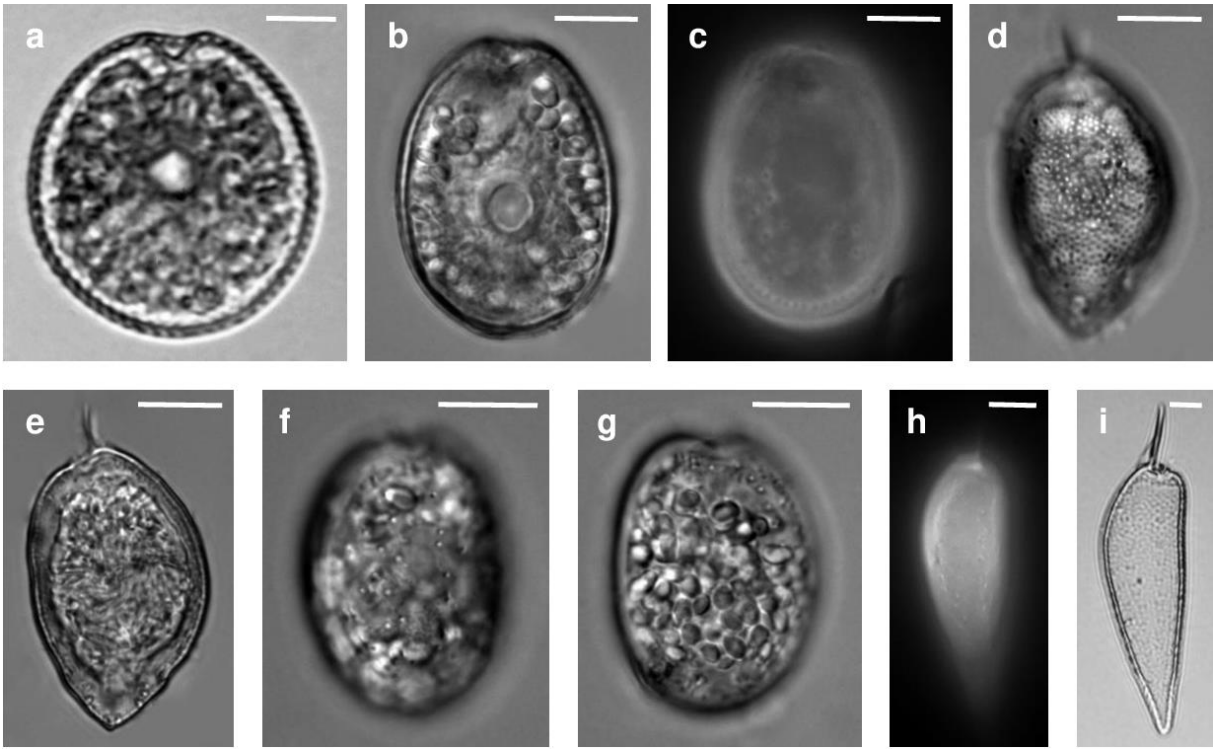
Dinoflagelati imaju mogućnost brze reprodukcije te pri određenim uvjetima mogu stvoriti veliku gustoću populacija koju nazivamo cvjetanjem mora. Najčešće su crvenkasto do smeđe boje, a prema boji koju tvore dobivaju i ime (engl. *red tide*, *green tide*). Zavisno od vrste, te cvatnje mogu biti bezopasne i samo neugodne oku, dok neke vrste (*Karenia brevis*, *Noctiluca* spp.) pri cvatnji izlučuju toksine te posljedično uzorkuju pomor riba i ostalih morskih organizama. Za ljude mogu biti pogubne u vidu konzumiranja morskih organizama izloženih cvatnji. Navedene vrste tvore crvene plime koje su često oceanskog podrijetla, ali mogu ući i u estuarijska područja, posebno tijekom ljetnih mjeseci (Hasle i sur. 1996).

Razmnožavaju se uzdužnom diobom stanice. Često je vegetativno razmnožavanje s pomoću nepokretnih spora, tako da stanični protoplast stvori pojedinačnu aplanosporu. Tekatni dinoflagelati koriste dva specifična načina pri diobi. Pri prvom roditeljska stanica odbaci oklop, nakon čega se podijeli i svaki dio stvara novu teku. Drugi se svodi na dijeljenje roditeljske teke u dva dijela, te svaka nova stanica zadrži polovicu teke sintetizirajući izgubljenu polovicu. Potvrđeno je da mnogi dinoflagelati imaju mogućnost spolnog načina reprodukcije, češće izogamije, a rjeđe anizogamije. Spolno razmnožavanje gametama obično završava stadijem cista.

Većina predstavnika su fotosintetski organizmi i većinom veoma dobri plivači, a karakteriziraju ih dnevne vertikalne migracije. Danju su bliže površini gdje koriste svjetlosnu energiju za fotosintezu, dok noću migriraju u dublje slojeve, gdje upijaju i skladište višak nutrijenata. Kao rezervnu hranu proizvode škrob ili lipidne kapljice. Posjeduju klorofil a i c, β-karoten te ksantofile: peridinin, neoperidinin, dinoksantin i neodinoksantin. Manji dio dinoflagelata su fakultativni heterotrofi, koji za ishranu koriste manje fitoplanktone, bakterije i otopljeni organski ugljik (DOC; engl. *dissolved organic carbon*).

1.1.3 Rod *Prorocentrum*

Vrsta *P. arcuatum* pripadnik je roda *Prorocentrum* koji je prvi opisao Ehrenberg 1834. Vrste roda *Prorocentrum* rasprostranjene su po cijelom svijetu, dostižući najveću raznolikost u tropskim i suptropskim područjima. Gotovo isključivo su morski organizmi, a mogu biti planktonske, bentoske ili epifitske vrste. Fotosintetski su organizmi, odnosno posjeduju plastide. Stanicu obavija amfijezma koja se sastoji od dviju celuloznih ploča. Imaju dvije nasuprotne teke, lijevu i desnu koje su povezane šavovima u obliku traka (Fensome i sur. 1993). Površina im je perforirana porama, areolama ili sitnim bodljama koje su specifične za pojedinu vrstu (Steidinger i Tangen 1997). Osim oblika i veličine stanica glavna specifična morfološka obilježja roda *Prorocentrum* su prisutnost apikalnih nastavaka u obliku trna. Najčešće posjeduju dva biča, te ih od ostalih dinoflagelata odvaja neposjedovanje poprečne i uzdužne brazde. Bentoske vrste roda *Prorocentum* danas plijene pažnju radi mogućnosti proizvodnje toksina (Ignatiades, Gotsis-Skretes, 2010), često okadaične kiseline, snažanog toksina koji uzrokuje dijaretično trovanje školjkašima (DSP; engl. *diarrhetic shellfish poison*) u ljudi, npr. *Prorocentrum lima* (Slika 3b, c), dok je ekologija planktonskih vrsta u mnogim slučajevima nedovoljno istražena.



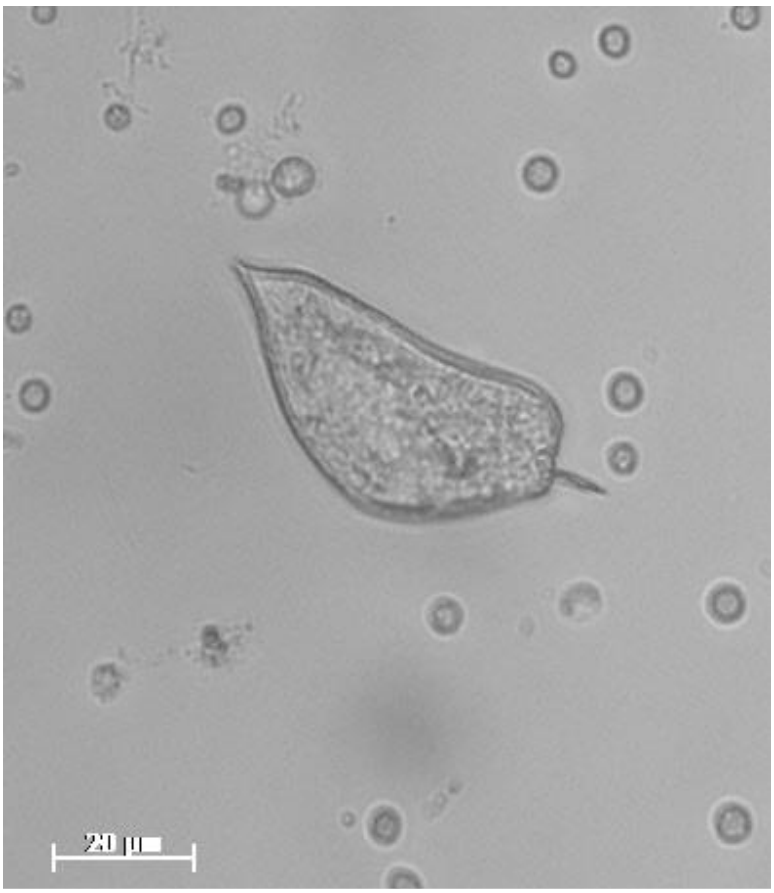
Slika 3. Neke od vrsta roda *Prorocentrum* mikroskopirani invertnim svjetlosnim i fluorescentnim mikroskopom: a - P. *hoffmannianum*, b, c – *P. lima*, d, e - *P. micans*, f, g - *P. rhathymum*, h, i - *P. sigmoides*. Mjerka 10 μm. (Preuzeto iz An-Cheng Yin i sur. 2018)

1.1.4 *Prorocentrum arcuatum* Issel

Tablica 1. Taksonomija vrste *Prorocentrum arcuatum*

(Preuzeto i prilagođeno: URL 2)

Carstvo	Chromista
Potcarstvo	Harosa
Infracarstvo	Alveolata
Koljeno	Myzozoa
Potkoljeno	Dinozoa
Infrakoljeno	Dinoflagellata
Razred	Dinophyceae
Red	Prorocentrales
Porodica	Prorocentraceae
Rod	*Prorocentrum*
Vrsta	*Prorocentrum arcuatum*

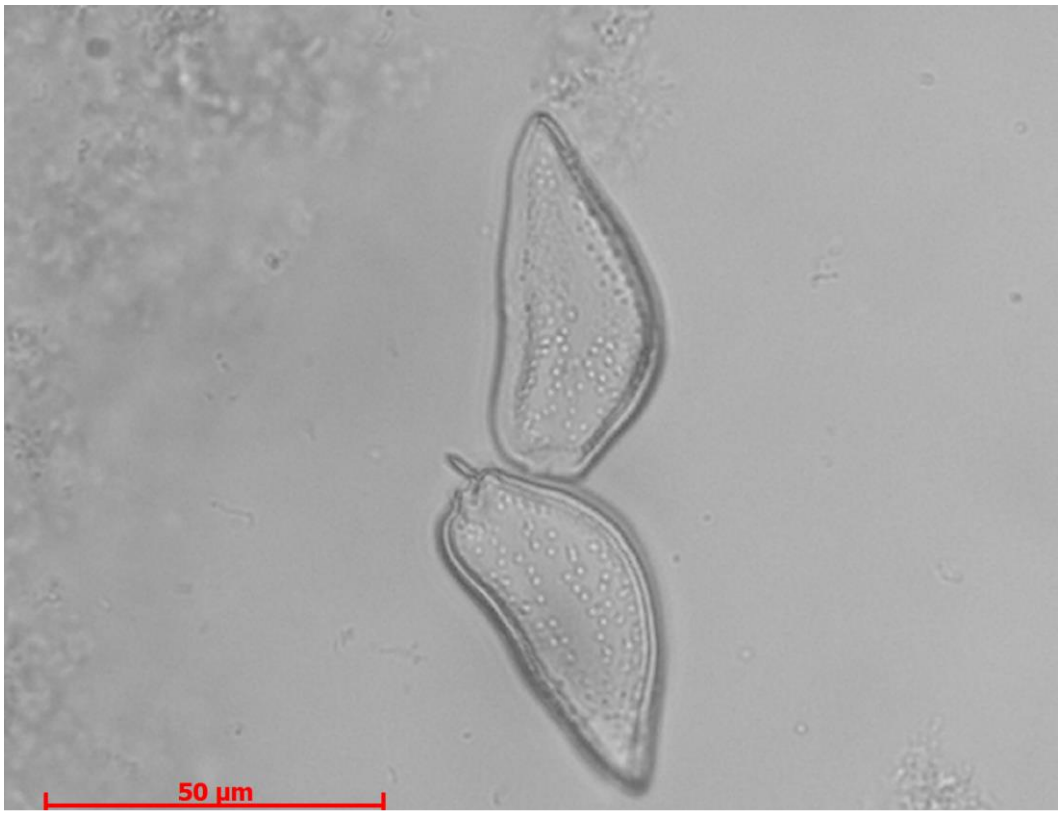


Slika 4. Vrsta *Prorocentrum arcuatum* u fitoplanktonu jezera Zmajevo oko (fotografija: Marko Žmarić)

Vrsta *Prorocentrum arcuatum* Issel je fotosointetski dinoflagelat (Slika 4) kojeg je opisao Issel (1928), a izmijenio ga je Dodge (1975) ukazujući na različite morfološke karakteristike *P. arcuatum* kao zasebne vrste. Iako izrazito ograničene raspodjele, poznat je kao neritna, tropska i umjerena vrsta (Sournia 1986), a do sada je zabilježen u obalnim vodama Atlantskog i Tihog oceana te Mediterana. Kada je riječ o pojavnosti u Jadranskom moru, pronalazimo ga u jezeru Zmajevo oko kod Rogoznice kao uobičajenog predstavnika fitoplanktonske zajednice (Viličić i sur. 1997; Marasović i Ninčević 1998; Barić i sur. 2003; Burić i sur. 2009), dok je drugi nalaz vrste zabilježen samo u Medulinskom zaljevu (Skejić i sur. 2017). Tim istraživanjem dat je prvi detaljni opis dinoflagelata *Prorocentrum arcuatum* na temelju skenirajuće elektronske mikroskopije. Pojavljuje se sporadično, te je njegova biologija i ekologija nedovoljno poznata.

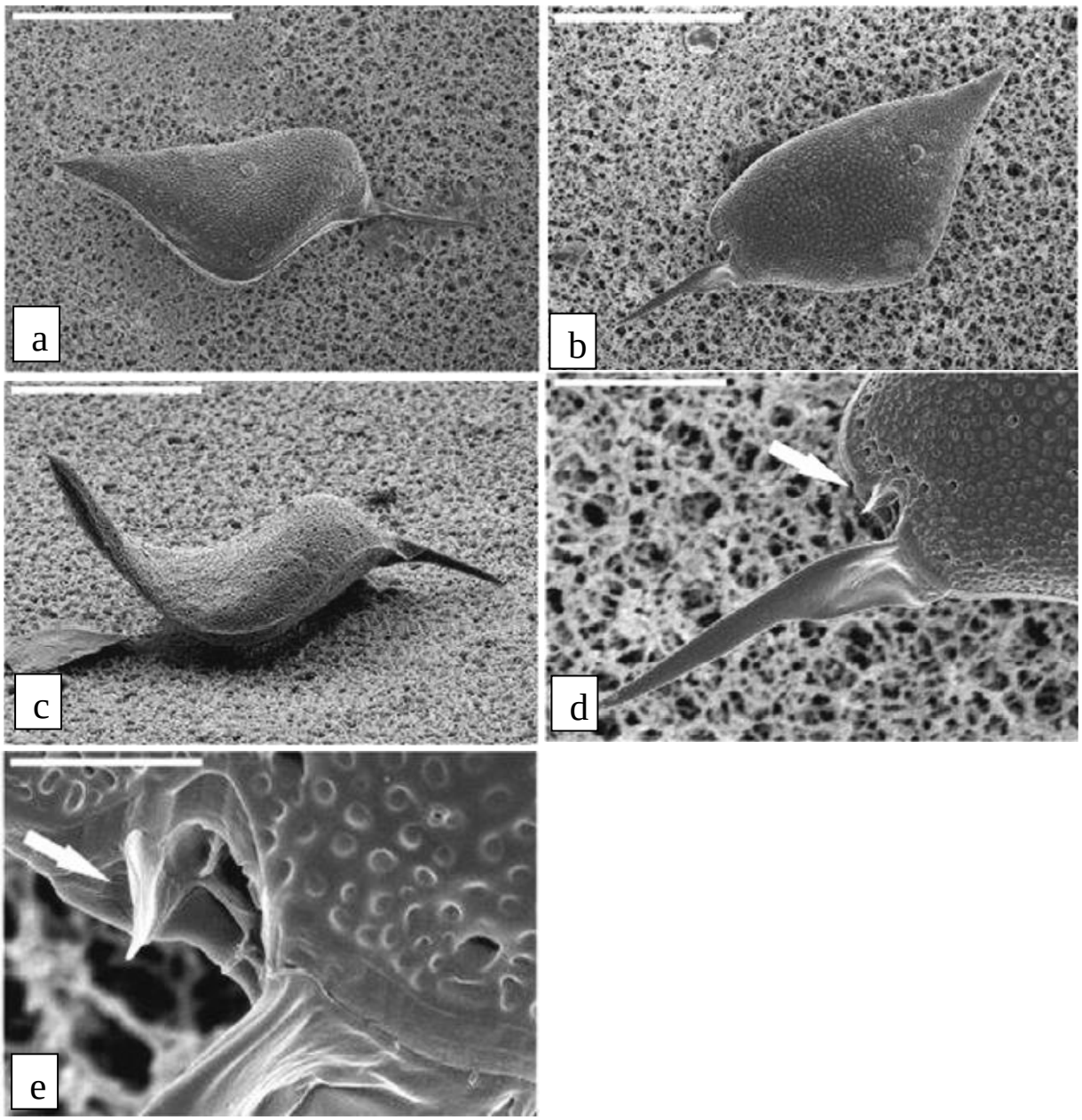
1.1.4.1 Građa *Prorocentrum arcuatum*

Stanice su karakterističnog asimetričnog i izduženog oblika, najšire u prednjem dijelu i sužavaju se prema stražnjem kraju. Dorzalno su konveksne, a ventralno konkavne. Morfološki se razlikuju od ostalih vrsta dinoflagelata najočitije u vidu nedostatka udužne (sulculusa) i



Slika 5. Prikaz dvije komplementarne teke *Prorocentrum arcuatum* iz uzorka Zmajevog oka (fotogafija: Marko Žmarić)

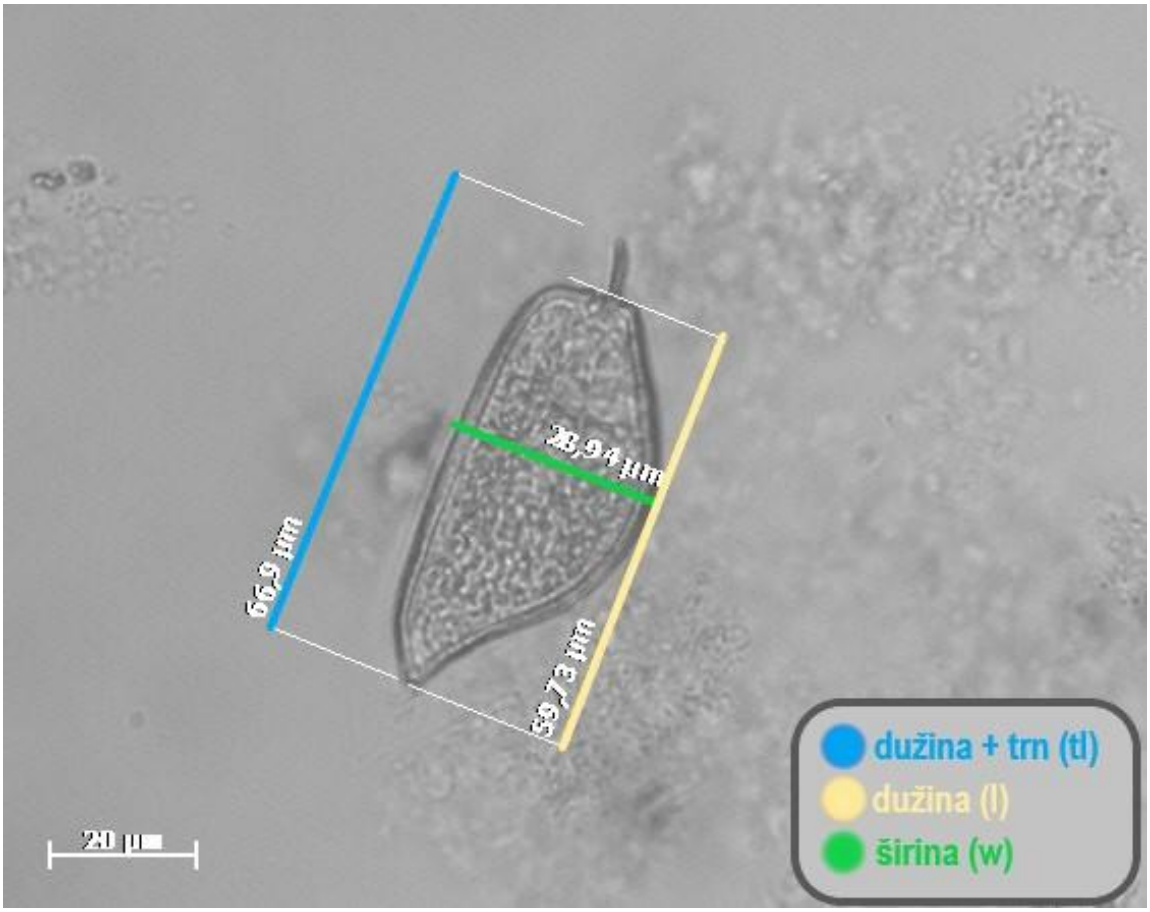
poprečne brazde (cinguluma), a amfijezma se sastoji od dviju celuloznih ploča koje nazivamo valve ili teke (Slika 5). Površina teka nije glatka već je prekrivena raznim nepravilnostima koje variraju od pora do areola (Steidinger i Tanger 1996). Posjeduje dva trna. Masivniji trn dug je i oštar te najširi u osnovici, dok se pored njega nalazi manji (Slika 6 d,e). Na apikalnom dijelu stanice, u periflagelarnoj regiji nalaze se dvije pore. Uloga jedne od pora je lučenje organske tvari, dok se kroz drugu provlači trn.



Slika 6. Snimke *P.arcuatum* pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM, engl. *scanning electron microscopy*): a) mjerka 40 μm, b) mjerka 30 μm, c) karakteristična torzija stanice, d) oba trna e) periflageralno područje (Preuzeto i prilagođeno iz Skejić i sur. 2017)

1.1.4.2 Morfometrija *Prorocentrum arcuatum*

Vrstu *Prorocentrum arcuatum* veličinski svrstavamo u mikroplankton. Morfometrija uključuje izmjeru osnovnih dimenzija duljine (l) i širine (w) stanica te ukupnu duljinu (tl) koja uključuje i duljinu trna (Slika 7). Prema Skejić i sur. (2017) veličina stanica srednjih je do velikih dimenzija (raspon duljina 40–74 µm; raspon širine 20–36 µm). Omjer duljina/širina obično je oko 2 ili malo veći no taj omjer varira kako među mjestima istraživanja tako i sezonski pa govorimo o morfotipovima.



Slika 7. Prikaz izmjere osnovnih dimenzija *Prorocentrum arcuatum* mikroskopirano iz uzorka Zmajevog oka (fotogafija: Marko Žmarić)

1.1.4.3 Ekologija *Prorocentrum arcuatum*

Globalno, ekologija *P. arcuatum* gotovo je neistražena. Izuzetak su istraživanja na Jadranu koja posljednjih desetljeća dovode do novih saznanja o ovoj vrsti. Na temelju rezultata s Rogozničkog jezera i rezultata iz Medulinskog zaljeva, čini se da su optimalni fizički uvjeti za širenje *P. arcuatum* u vodenom stupcu temperatura oko 20 °C i salinitet od najmanje 37 ‰ (Barić i sur. 2003; Burić i sur. 2009; Skejić i sur. 2017). *P. arcuatum* u Rogozničkom jezeru uspješno se reproducira i u uvjetima kada je dostupnost nitrata u vodenom stupcu niska, ako su čimbenici poput temperature i saliniteta optimalni (Burić i sur. 2009). Za razliku od nekih srodnih vrsta, za *P. arcuatum* nije zabilježeno da je u mogućnosti proizvesti toksine.

U Medulinskom zaljevu *P. arcuatum* kontinuirano je primijećen kroz razdoblje od 15 mjeseci, sa značajnom proliferacijom od rujna do listopada 2013. s maksimalnih 13200 st. L^{-1} (Skejić i sur. 2017). Učestalost pojavnosti *P. arcuatum* u razdoblju istraživanja iznosila je 95%. Očekivana velika brojnost *P. arcuatum* u jesen sljedeće istražne godine (2014.) nije zabilježena. Umjesto toga, abundancija *P. arcuatum* iznosila je jedva 80 st. L^{-1}. Sličnu međugodišnju varijabilnost zabilježili su Munir i sur. (2013), koji su utvrdili neujednačenu sezonsku rasprostranjenost tijekom dvogodišnjeg istraživanja, unatoč činjenici da su okolišni uvjeti u obje istraživane godine bili prilično slični. Abudancija *P. arcuatum* između površinskog i donjeg sloja bila je u visokoj korelaciji.

Maksimalan doprinos abudancije *P. arcuatum* u Medulinskom zaljevu u ukupnoj zajednici mikrofitoplanktona zabilježen je u lipnju 2014. (69,5%). Populacijom fitoplanktona tijekom razdoblja istraživanja uglavnom su dominirale Bacillariophyceaea (49 svojti), a vrste s najvećom brojnošću i učestalošću pojavljivanja bile su *Chaetoceros curvisetus* Cleve, *Cyclotella* sp., *Proboscia alata* (Brightwell) Sundström, *Pseudonitzschia* sp. i *Thalassionema nitzshioides* (Grunow) Mereschkowsky. Dinoflagelati su također bili taksonomski raznoliki (57 svojti), ali sa znatno nižim abudancijama. Spomenuto odsustvo proliferacije *P. arcuatum* 2014. godine, usprkos značajnoj sličnosti u uvjetima okoliša, moglo bi se pripisati povećanoj konkurenciji zbog promjena u strukturi zajednice fitoplanktona. Glavna promjena u fitoplanktonu u Medulinskom zaljevu u jesen 2014. u odnosu na jesen 2013. bila je porast broja vrsta Tripos (Skejić i sur. 2017).

Primijećene su i sezonske razlike u duljini stanice (l); najmanja duljina stanica (mjesečni prosjek) od 49-52 μm zabilježena je zimi (od prosinca do ožujka), dok su se veće stanice javljale u razdoblju od svibnja do srpnja (62-67 μm). Ni prosječna duljina stanice (l) ni ukupna duljina

stanice (tl) nisu bile u značajnoj korelaciji s temperaturom, ali pozitivna korelacija za oba parametra zabilježena je za salinitet (Skejić i sur. 2017).

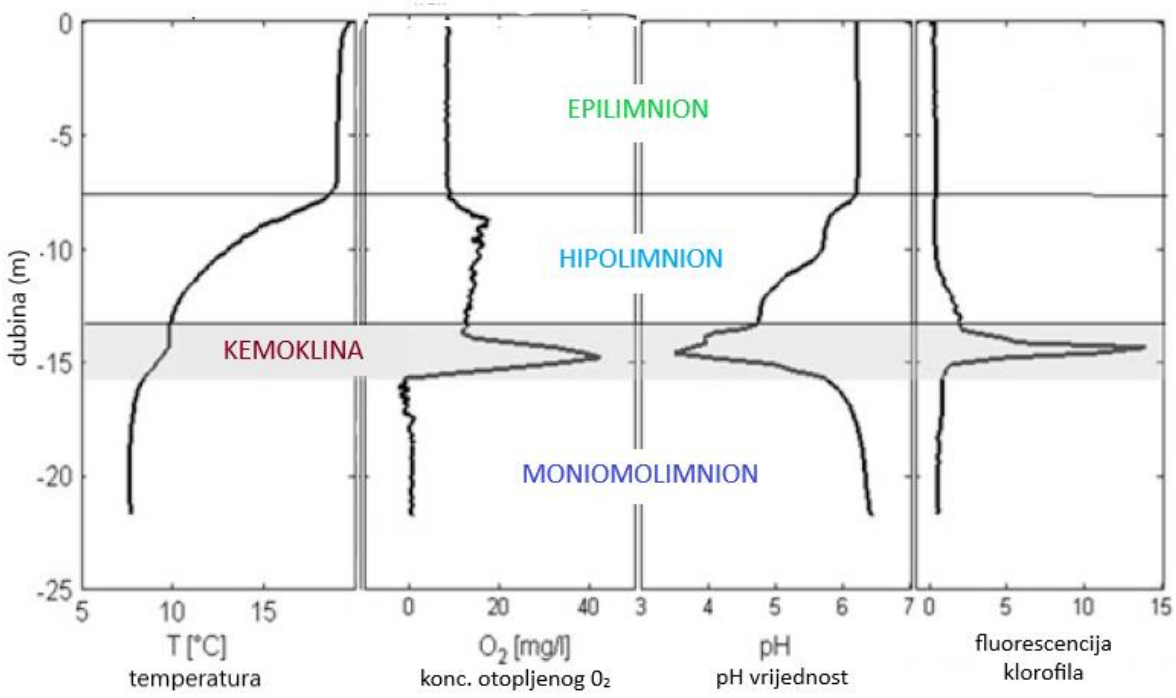
Podpovršinsko nakupljanje *P. arcuatum* moglo bi se pripisati dostupnosti nekih hranjivih tvari koje stimuliraju rast i kretanje oko halokline. Sloj halokline mogao bi predstavljati utočište od predacije. To je sloj u kojem osmotski stres regulira ponašanje zooplanktona, što rezultira njihovim bijegom u povoljnije životne uvjete iznad i ispod haloklina i reduciranom vremenu zadržavanja u istoj.

1.1.4.4 Distribucija *Prorocentrum arcuatum*

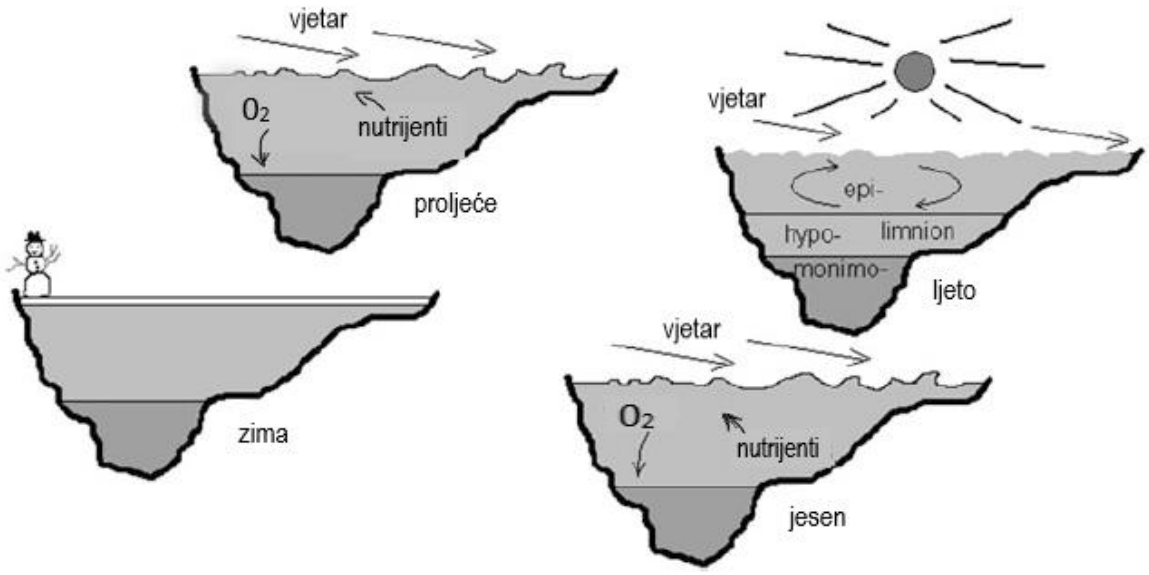
Prorocentrum arcuatum se rijetko pojavljuje te na globalnoj razini postoji vrlo malo informacija o organizmu. Većina zapisa o vrsti *P. arcuatum* pruža samo napomenu o izgledu, dok su mu morfologija i populacijska dinamika gotovo neistražene. Obično se javlja u obalnim područjima Atlantika, Pacifika i Mediterana (Hernández-Becerril i sur. 2000; Gil-Rodríguez i sur. 2003.; Felder & Camp 2009; Odebrecht 2010; Lakkis 2011; Guiry & Guiry 2013). Na Jadranskom moru pronađen je na dva lokaliteta, konstantno u Zmajevom oku kod Rogoznice, a drugi je nalaz vrste zabilježen u Medulinskom zaljevu u periodu istraživanja 2013. i 2014. godine (Skejić i sur. 2017).

1.2 Obilježja meromiktičkih jezera

Meromiktična jezera su ona koja imaju uvjete trajne kemijske slojevitosti uz nepotpuno miješanje vodenog stupca tijekom godine. Gornjem površinskom sloju Hutchinson (1937) dao je naziv miksolimnion, a karakterizira ga stratifikacija i cirkulacija kao u holomiktičnih jezera, odnosno ona bez monimolimniona s vertikalnom podjelom kroz vodeni stupac na gornji sloj nazvan epilimnion i donji sloj hipolimnion (Slika 8). Pridnenom dubokom sloju Findenegg (1935) daje ime monimolimnion. Najčešće u jesen, odnosno na kraju perioda toplinske slojevitosti recirkulacija miješa oba sloja (Boehrer i Schultze 2008).



Slika 8. Vertikalni profili temperature, koncentracije kisika, pH vrijednosti te fluorescencije klorofila s obzirom na dubinu u meromiktičkom jezeru. Gornja horizontalna linija predstavlja granicu između epilimniona i hipolimniona, dok donja horizntalna linija predstavlja granicu između hipolimniona i kemokline (preuzeto i prilagođeno iz Boehrer i Schultze 2008).



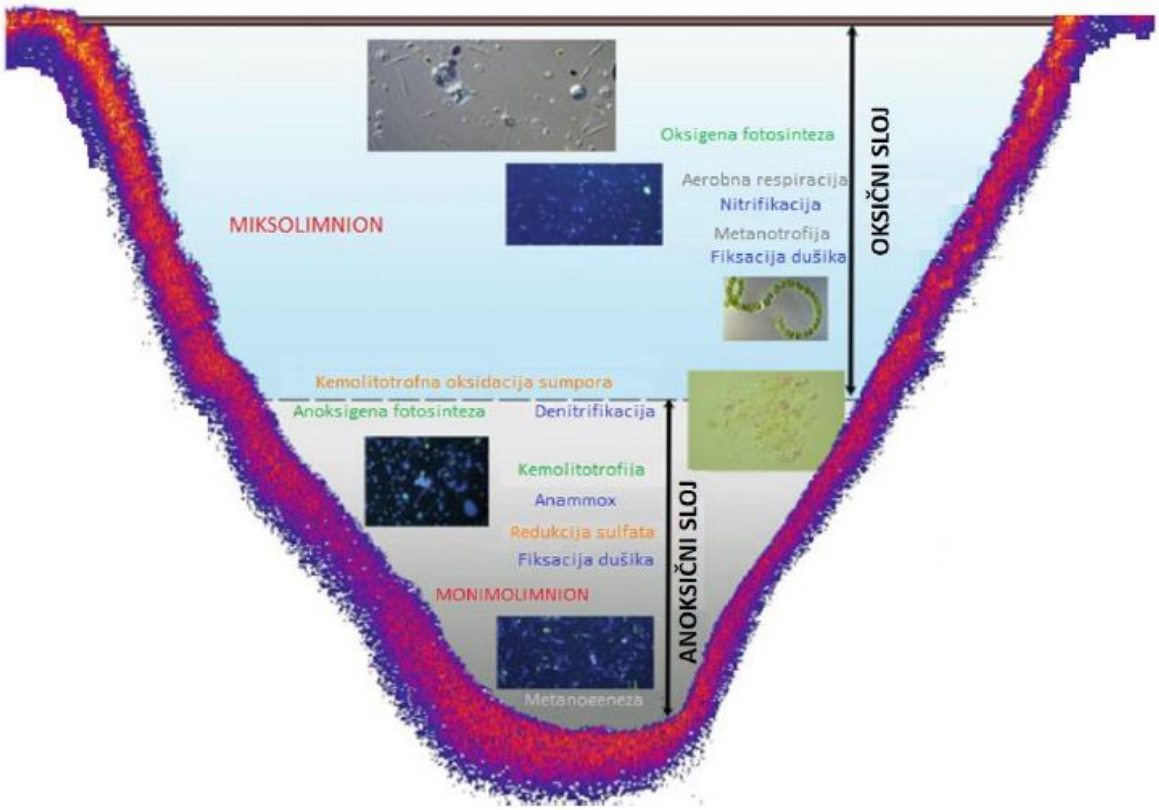
Slika 9. Stratifikacija i recirkulacija u meromiktičkom jezeru tijekom godišnjeg ciklusa (Preuzeto i prilagođeno iz Boehrer i Schultze 2008)

U proljeće sloj vode na površini posljedično se zagrijava radi pojačanog sunčevog zračenja te kontakta s toplijom atmosferom. Kao posljedica, formira se toplija voda koja pluta na hladnijoj, gušćoj vodi (Slika 9). Dok je gornji sloj, epilimnion, izložen izmjeni plinova i energije s atmosferom tijekom cijele godine, hipolimnion je zaštićen od izravnog udara tijekom ljeta te obično ostaje stratificiran tijekom ljetnog razdoblja. Kao posljedica, vertikalni transport otopljenih tvari i topline je veoma malen tijekom razdoblja stratifikacije (Boehrer i Schultze 2008).

Tijekom ljetne stratifikacije u miksolimnionu kemoklina je stabilna. Ono što može utjecati su podzemne vode koje mogu ući u monimolimnion i pridonijeti na njegovom volumenu, pa se stoga kemoklina polako podiže. Osim toga, difuzija i transport otopljenih tvari iz monimolimniona može lokalno povećati gradijent gustoće i dovesti do potrebe za kisikom u najnižoj zoni hipolimniona. Zahvaćena voda može promijeniti svoja svojstva od hipolimnetskih do monimolimnetskih i na kraju postaje dio monimolimniona.

U hladnijim mjesecima ledeni pokrivač može dodati još jedno razdoblje takvih uvjeta (zimska stagnacija). U geografskim širinama gdje ledeni pokrivač traje dugo, to može rezultirati meromiksijom (jezera Shira i Shunet), jer je kasnija cirkulacija u proljeće kratka ili je potpuno odsutna. Kasnije tijekom godine, hlađenje na površini jezera uklanja zaštitnu toplinsku stratifikaciju, a konvekcija tjera vodu do kemokline. Kemoklina se pomiče prema dolje i

gradijenti postaju oštriji. Gornji dio monimolimniona se uključuje u miksolimnion. Volumen vode uveden u miksolimnion ovisi o vremenskim uvjetima tijekom razdoblja recirkulacije i stoga može uvelike varirati od godine do godine (Boehrer i Schultze 2008).



Slika 10. Glavni biogeokemijski procesi u različitim slojevima meromiktičkog jezera. Procesi vezani za fiksaciju anorganskog ugljika označeni su zelenom bojom. Respiratorni procesi i procesi potrošnje CO_2 označeni su sivom. Glavni procesi vezani za ciklus sumpora označeni su žutom, a za ciklus dušika plavom bojom (Preuzeto iz Čanković 2017).

Većina bioloških procesa koji doprinose stratifikaciji vodenog stupca u meromiktičkim jezerima uključuje mikrobiološku razgradnju tonućih čestica organske tvari i stvaranje topivih spojeva što dovodi do povećanja gustoće vode u monimolimnionu (Boehrer i Schultze 2008). Također, mikrobne zajednice u kemoklini potencijalno su važna komponenta hranidbene mreže meromiktičkih jezera (Čanković 2017). Utvrđeno je i da se zajednice znatno razlikuju između oksičnog i anoksičnog sloja pojedinih jezera, te da su bakterijska raznolikost i brojnost konzistentno više u anoksičnom nego u oksičnom sloju (Baatar i sur. 2016). Različite mikrobne zajednice su karakteristične za svako pojedino jezero, no pokazuju sličnost u procesima razgradnje ugljika i redukcije sulfata (Slika 10). Prema tome, cikluse kruženja hranjivih tvari,

koji su u meromiktičkim jezerima usko povezani, provode različiti mikroorganizmi ali s istom biogeokemijskom ulogom (Casamayor i sur. 2012; Andrei i sur. 2015).

1.2.1 Organska tvar

Organska tvar (OM; engl. *organic matter*) u morskom sustavu predstavlja kompleksnu mješavinu molekula u otopljenoj i suspendiranoj fazi vodenog stupca, a rezultat je autohtone proizvodnje i alohtonog unosa. Različitog je porijekla, sastava i fizikalno-kemijskih svojstava (Dautović, 2019). Bez obzira što udio organske tvari u morima iznosi svega 0,01% on ima važnu ulogu u globalnim ciklusima kruženja ugljika, hranidbenom lancu mora, utječe na prodiranje svjetlosti, biodostupnost metala u tragovima i hranjivih tvari, te izmjenu plinova u površinskom sloju mora (Repeta 2015). Više od 97% organskog ugljika u morima i oceanima nalazi se u otopljenom obliku (DOM, eng. *dissolved organic matter*), a intenzitet proizvodnje DOM-a u oceanima razlikuje se s obzirom na utjecaj bioloških, kemijskih i fizikalnih parametara poput intenziteta primarne proizvodnje, izvanstaničnog lučenja, oslobađanja i lučenja ispašom (engl. *grazing*) zooplanktona, autolize i viralne lize stanica, otapanja detritalnih i tonućih čestica i prokariotskog lučenja (Hansell i Carlson 2015). U neritičkoj zoni, za razliku od otvorenog oceana, ulogu glavnih proizvođača preuzimaju bentičke mikroalge i makrofiti (Wada i sur. 2007). Alohtona organska tvar nastaje izvan morskog sustava, gdje je uglavnom kopnenog porijekla uz atmosferski donos i donos podzemnim vodama (Raymond i Spencer 2015). Bakterije su glavni potrošači DOM u morskom sustavu, međutim, proizvode ga i tijekom procesa diobe stanica ili virusne lize (Kawasaki i Benner, 2006). Partikularni organski ugljik (POC, eng. *particulate organic carbon*) predstavlja glavni put kojim se ugljik proizveden primarnom proizvodnjom prenosi, uglavnom tonjenjem, s površine u duboki ocean i na kraju u sedimente, te je stoga ključna komponenta biološke pumpe (Eppley i Peterson, 1979).

Razgradnja organske tvari u anoksičnim uvjetima je sporija u odnosu na razgradnju u oksičnim uvjetima (Lee 1992). Međutim, dok se autohtona organska tvar mineralizira sličnom brzinom u oksičnim i anoksičnim uvjetima, mineralizacija alohtone organske tvari je supresirana u anoksičnim uvjetima. Razlog tome je što alohtona organska tvar sadrži visok udio alifatskih polimera, triterpena, lignina i humične tvari koji su otporni na anaerobnu razgradnju. Duži i snažniji periodi stratifikacije u morskom okolišu rezultirat će smanjenjem koncentracije kisika u dubljim slojevima vodenog stupca i time skratiti vrijeme interakcije organske tvari s kisikom, mijenjajući dinamiku proizvodnje i njenog uklanjanja (Tranvik i sur. 2009).

Nakupljena organska tvar pridnenog anoksičnog sloja u interakciji s mikrobnim zajednicama će biti oslobođena u površinskom oksičnom sloju nakon miješanja vodenog stupca. Fotodegradacija sulfuriziranog DOC nastalog u pridnenom anoksičnom sloju vodi ka oslobađanju sulfata i plinova koji se mogu ispustiti u atmosferu, ali i narušiti stabilnost stratifikacije (Gomez-Saez i sur. 2021).

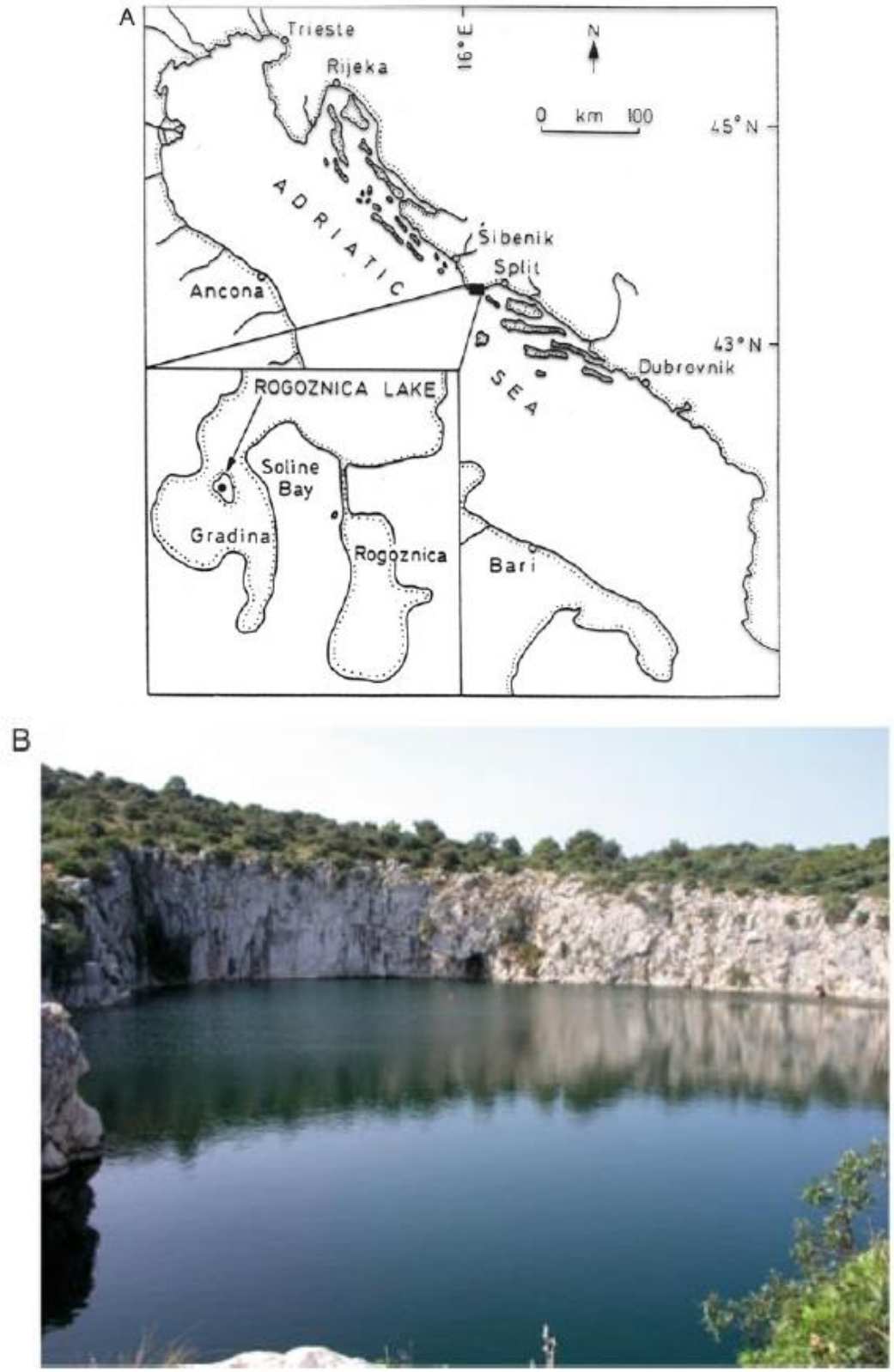
1.3 Jezero Zmajevo oko

Jezero Zmajevo oko jedinstven je krški morski sustav odlikovan euksiničnim i meromiktičkim karakteristikama. Jezero se nalazi usred istočne jadranske obale, na poluotoku Gradina u blizini sela Rogoznica, na transektu između gradova Šibenika i Splita (43°32′N 15° 58′E; Slika 11). Jezero je krška depresija kružnog oblika najvjerojatnije nastalo u ranom holocenu posljedično glacijalnom porastu razine mora (Buljan 1956). Ispunjeno je morskom vodom i prostire se na površini od 10276 m^2. Jezero je maksimalne duljine 143 m, maksimalne dubine 15 m i volumena izvedenog iz batimetrijskih podataka od oko 85700 m^3 (Mihelčić i sur. 1996). Ono nije površinski povezano s morem niti je poznata ikakva opsežna podzemna veza, već se izmjena vode između jezera i otvorenog mora odvija kroz porozne karbonatne stijene. Takva povezanost prohodna je zooplanktonu i ličinkama bentoskih organizama te tako naseljavaju jezero. Također, prisutan je fazni pomak između plime i oseke u jezeru i plime izvan zaljeva oko 2 sata. Jezero je od vjetra zaštićeno liticama visokim 4–23 m koje sprečavaju miješanje vode. Pretpostavlja se da bi atmosferski utjecaj zbog poluzatvorene prirode jezera mogao biti nekoliko puta jači nego u ostalim obalnim i otvorenim područjima istočnog Jadrana (Ciglenečki i sur. 2006). Po svojim fizikalno-kemijskim svojstvima Zmajevo oko može se smatrati jedinstvenim sustavom s meromiktičkim i holomiktičnim uvjetima vode koji se izmjenjuju sezonski.

Iako je Zmajevo oko tipičan primjer anoksičnog i euksinskog vodenog sustava (Helz i sur. 2011), po mnogo čemu je i specifično u usporedbi s najistraživanijim europskim primjerima Crnim morem (Izdar i Murray 1991.), Framvaren Fjord (Norveška) (Lending and Westerlund 1988) i Lac Pavina (Francuska) (Michard i sur. 1994.) Te specifičnosti odražavaju se u biološkim, geokemijskim, geomorfološkim i hidrološkim karakteristikama, uključujući vrlo mali volumen i vrlo jednostavan pristup anoksičnim uvjetima.

Jezero je toplinski i kemijski raslojeno u površinski oksični i dublji anoksični sloj tijekom cijele godine. Posljedično visokoj aktivnosti fitoplanktona miksolimnion je dobro oksigeniran, dok procesi razgradnje uzrokuju pojačano taloženje organskih tvari i hranjivih tvari u dublje vode, što dovodi do pojave hipoksije/anoksije i mikrobne proizvodnje H^2S. Anoksičnu vodu karakteriziraju visoke koncentracije reduciranih sumpornih vrsta (engl. reduced sulphur species, RSS), hranjivih sastojaka i otopljenog organskog ugljika kao rezultat izrazite remineralizacije autohtonih organskih tvari proizvedenih u površinskim vodama (Kamyshny i sur. 2011; Pjevac 2015.; Čanković 2015, 2017). Treba napomenuti da dubina

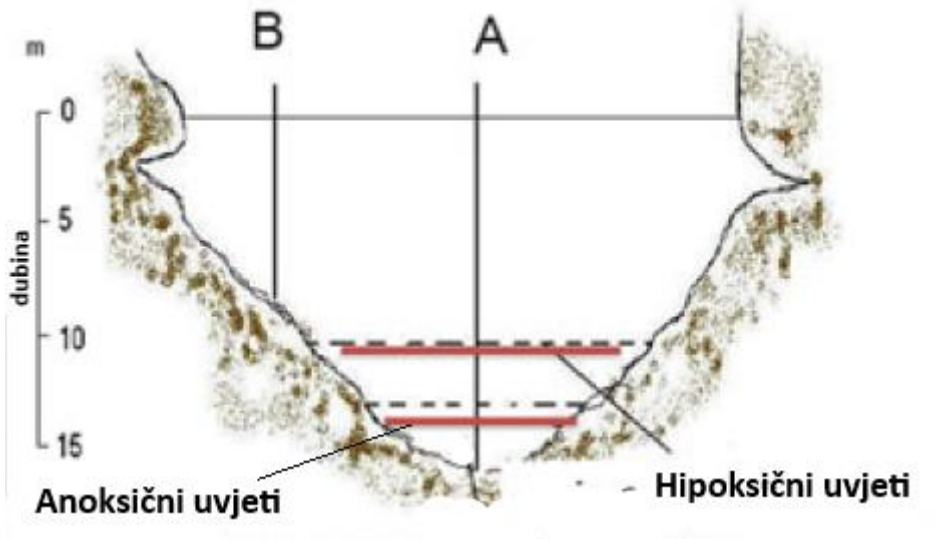
miksolimniona sezonski varira, pod velikim utjecajem meteoroloških uvjeta (temperatura, vjetar, padaline), koji također utječu na razmjenu vodenih slojeva. Prema tome, monimolimnion



Slika 11. a) Karta i (b) fotografija Zmajevog oka (sjeverozapadna strana jezera) (Preuzeto iz Ciglenečki i sur. 2017)

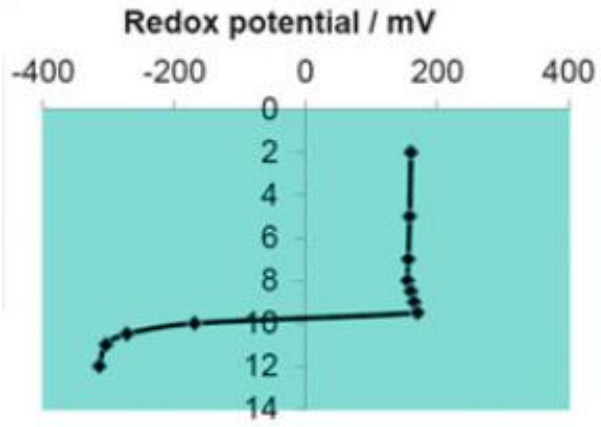
se kemijski razlikuje zbog višegodišnjeg nedovoljnog miješanja s miksolimnionom te je obično gotovo trajnan ispod 10 m dubine. Dva navedena sloja razdjeljuje kemoklina čija širina i položaj u vodenom stupcu variraju sezonski (Boehrer i Schultze 2008; Ciglenečki i sur. 2017). U jesen i zimu dolazi do holomiksije, odnosno miješanja vode u vodenom stupcu. Rezultat toga miješanja je obogaćenje površinskog sloja hranjivim solima koje će biti ključne za daljnju produkciju i razvoj fitoplanktona. Osim hranjivih soli, iz pridnenog u površinski sloj dolaze i visoke koncentracije H_2S koji sada u novim uvjetima oksidira do polisulfida i elementarnog sumpora pri čemu dolazi do povećane potrošnje koncentracija kisika koja konačno dovodi do ugibanja fitoplanktonskih vrsta i viših organizama. Jezero se zabijeli te dolazi do smanjene prozirnosti vode (Kršinić i sur. 2000, Ciglenečki i sur. 2017).

Slika 12. vjerno dočarava realne omjere u jezeru. Mjesto uzorkovanja A u jezeru nalazi se na dubini od 14 m. Karakteriziraju ga trajni anoksični uvjeti koji postoje u prekrivenom vodenom stupcu obogaćenom relativno visokim koncentracijama reduciranih sumpornih vrsta (RSS; engl. *sumporareduced sulphur species*)(najviše u obliku sulfida), otopljenih organskih tvari i nutrijenata (Ciglenečki i sur. 2005), uključujući jodne vrste (Stipaničev i Branica 1996.). Mjesto uzimanja uzoraka B uvijek leži unutar stupca oksične vode, a redoks prijelazna zona nalazi se ispod granice sediment-voda (Ciglenečki i sur. 2006). U uvjetima anoksičnog sedimenta dolazi do obogaćivanja metala u tragovima, posebno onih koji akumuliraju sulfide (Fe, Mo).



Slika 12. Okomit profil vodenog stupca Zmajevog oka s označenim mjestima uzorkovanja sa stalnim anoksičnim (mjesto A) i oksičnim (mjesto B) uvjetima okoliša (Preuzeto i prilagođeno iz Ciglenečki i sur. 2017)

Redoks potencijal u vodenom stupcu i površinski sediment na lokaciji A dostiže negativne vrijednosti, do -420 mV, dok je u površinskim sedimentima na mjestu B oko 100 mV. pH na oba mjesta iznosi oko 7 (Slika 13). Sediment na oba mjesta sastoji se od siltnog ilovastog mulja, no na mjestu A specifična površina s finijim čestica je mnogo veća nego na mjestu B.



Slika 13. Redoks potencijal kroz vodeni stupac Zmajevog oka (Preuzeto i prilagođeno iz Ciglenečki i sur. 2017)

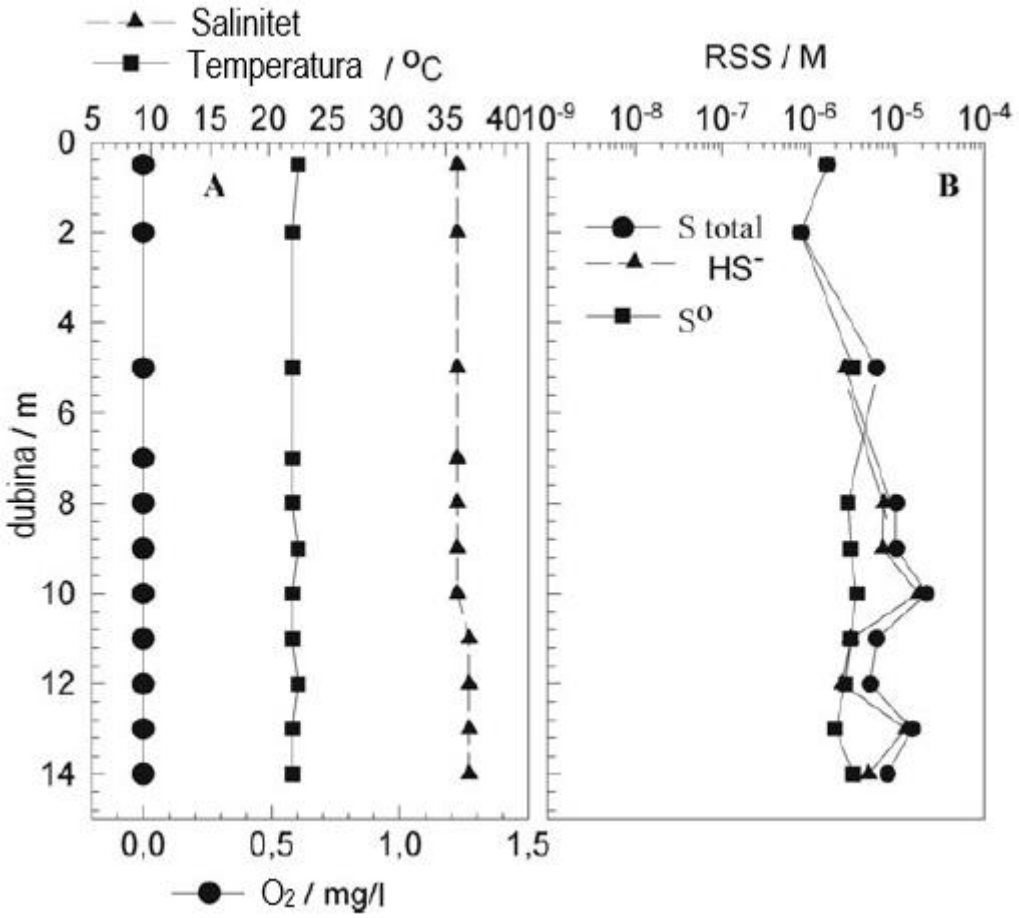
Sezonske i vertikalne varijacije slanosti i temperature ukazuju na postojanje dva sustava vodenih masa. Površinski sloj (0–5 m), karakteriziran promjenjivom i nižim salinitetom (14-30 ‰) i temperaturom (6–33 °C) i donji sloj (7–12 m), karakteriziran višim salinitetom (33–38 ‰) i temperaturom (23–31 °C) (Ciglenečki i sur. 2013).

Tipična slojevitost proljetno-ljetnih vodnih masa s jasnom kemoklinom koja se nalazi oko 10 m dubine značajna je odlika jezera. Na granici oksičko-anoksičnih uvjeta tijekom proljetnih i ljetnih mjeseci razvija se sloj kemokline debljine 50 cm najčešće ružičaste boje, obogaćen gustom populacijom anoksigenih fototrofa (Pjevac i sur. 2015). Dubina kemokline kao i njezina debljina obično fluktuira dnevno za oko 1 m, što utječe na dubinu maksimalnog intenziteta svjetlosti i procese oksidacije i redukcije koji kontroliraju koncentracije kisika i sulfida.

Ovisno o atmosferskim uvjetima, termoklina u pratnji halokline slabi počevši od ljeta, a kemoklina se spušta dublje. Kasnije, obično u jesen, termohalinska slojevitost zajedno s redoksklinom u potpunosti se gubi. Holomiksija je zabilježena u jesenskim razdobljima 2003. i 2011. godine (Ciglenečki i sur. 2015). Miješanje između slojeva vode prvenstveno ovisi o meteorološkim uvjetima. Oni jako utječu na vertikalnu dinamiku i trajanje postupka miješanja unutar vodenog stupca (Romero i Melack, 1996). Zahvaljujući miješanju, relativno visoke

koncentracije sulfida prenose se s dna jezera na površinu gdje se oksidira u sulfid, polisulfid i organske spojeve sumpora (Bura-Nakić i sur. 2009). Potrošnja kisika može rezultirati anoksičnim holomiktičkim uvjetima u cijelom vodenom stupcu. U uvjetima stratifikacije prozirnost vode je relativno visoka, dok se tijekom holomiksije ta prozirnost gubi i poprima mliječno žućkastu boju.

Dok površinski sloj ostaje oksigeniran cijelo vrijeme, donji slojevi obično ostaju hipoksični ili anoksični. U takvim uvjetima, transport amonijaka u gornji sloj olakšava procese nitrifikacije, što je vidljivo iz viših koncentracija nitrata i nitrita u površinskim vodama (Žic i sur. 2013). Također, brzi prodor hranjivih tvari pridnene vode na površinu smanjuje omjer N/P zbog oslobađanja P iz donje vode. Nasuprot tome, postoji ograničenje P u površinskoj vodi tijekom proljetno i ljetne stratifikacije. Tijekom i nakon pojave holomiksije cijeli vodeni stupac ograničen je s N. To veoma utječe na biologiju jezera. Anoksični i sulfidni holomiktički događaji proučavani su u rujnu 1997. (Slika 14) (Bura-Nakić i sur. 2009) i u listopadu 2011. (Ciglenečki i sur. 2015). U navedena razdoblja u cijelom vodenom stupcu utvrđene su visoke koncentracije sulfida i amonijaka. To je dovelo do masovne smrtnosti svih fitoplanktona i bentoskih organizama (Kršinić i sur. 2000). Mortalitet pridonio je povećanim koncentracijama hranjivih sastojaka u cijelom jezeru, uključujući površinske slojeve. Koncentracije hranjivih tvari ostale su visoke nekoliko mjeseci nakon stanja anoksije zbog razgradnje velike količine organskih ugljika u obliku čestica (POC; engl. *particulate organic carbon*) i niskih stopa primarne proizvodnje.

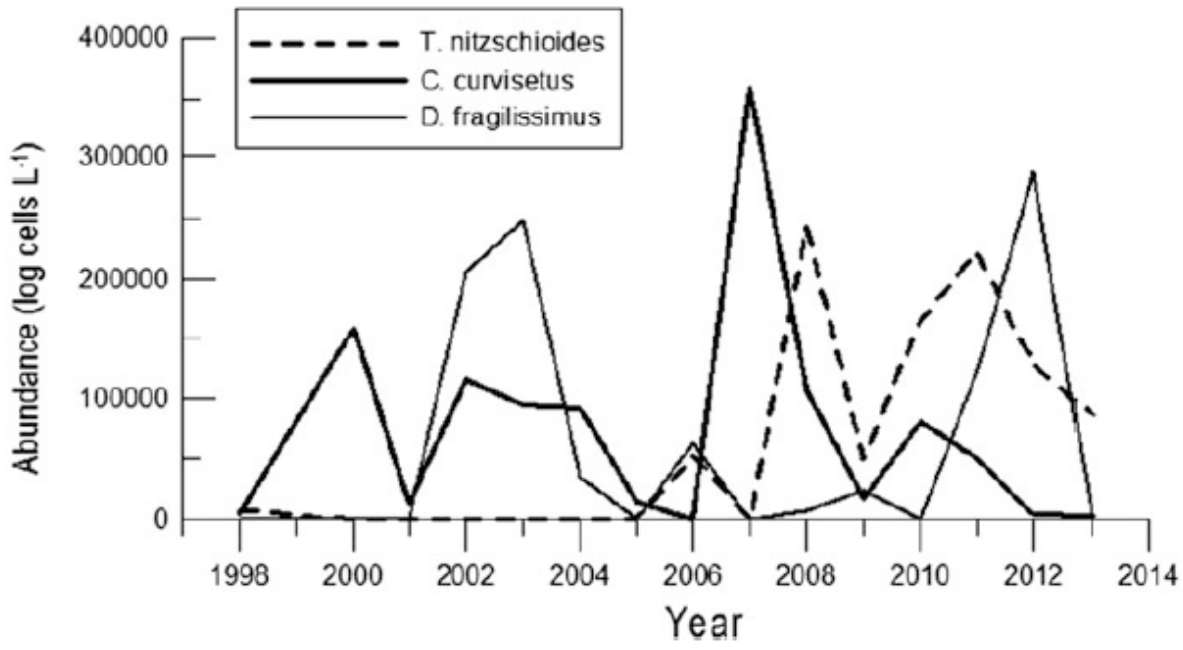


Slika 14. Okomiti profili otopljenog kisika, temperature i saliniteta (lijevo) i reduciranih vrsta sumpora (RSS) (desno) u vodenom stupcu Rogozničkog jezera tijekom holomiktičko-anoksičnog perioda u rujnu 1997. (Preuzeto i prilagođeno iz Ciglenečki i sur. 2017)

1.3.1 Fitoplankton u jezeru Zmajevo oko

Izuzetno fluktuirajući uvjeti okoliša, poput velikih sezonskih varijacija, neslanost i temperatura, raslojavanje vode s jakim redoks gradijentom i euksinijom popraćeno visokim koncentracijama i varijabilnošću hranjivih sastojaka s jedne strane i epizodična pojava holomiksiije s hipoksijom i anoksijom s druge strane, uvelike utječu na strukturu zajednice fitoplanktona i zooplanktona u jezeru. Visoke koncentracije organskog detritusa također stvaraju zamućenje ispod 5 m dubine, što pokazuje dubina Secchi diska, obično 5-6m. Pod utjecajem ovih fizikalno-kemijskih ograničenja, malobrojne vrste koje mogu preživjeti u Rogozničkom jezeru moraju se distribuirati kroz usku zonu s maksimalnom dubinom od 9–10m (Svensen i sur. 2008).

U većini slučajeva kada sulfidi dospiju u gornje slojeve, i fitoplankton i raznolikost vrsta smanjuju se zbog toksičnosti sulfida (Kršinić i sur. 2000). S druge strane, holomični uvjeti rezultiraju obogaćivanjem hranjivih sastojaka površinskog sloja, stimulirajući rast i proizvodnju fitoplanktona, dok općenito termohalina stratificiranost sprečava hranjive tvari da dođu do slojeva vode iznad termokline. Takvi uvjeti rezultiraju smanjenom raznolikošću fitoplanktona u jezeru u usporedbi s otvorenim jadranskim vodama gdje je broj vrsta više od reda veličine veći. Sastav vrsta i raznolikost u ostalim krškim i slanim jezerima u Mediteranu



Slika 15. Prostorna i vremenska distribucija (prosječne brojnosti po godini) mikrofitoplanktona i njegove dominantne vrste dijatomeja u razdoblju od 1998. do 2013. u jezeru Zmajevo oko (modificirano iz Malešević i sur. 2015)

također su ograničeni samo na prilagođene vrste čije su gustoće uglavnom vrlo visoke (Miracle i sur. 1992). Iznimno niska gustoća mikrofitoplanktona od oko 103–104 stanica L^{-1} je pronađena nakon pojave anoksije u rujnu 1997.

Specifični uvjeti koji prevladavaju u jezeru Zmajevo oko u oksičnom miksolimnionu uzrokuju cvjetanje relativno malog broja fitoplanktonskih vrsta, od kojih neke razvijaju guste populacije (Burić i sur. 2009). U fitoplanktonskoj zajednici jezera dominiraju dijatomeje (*Chaetoceros curvisetus* Cleve, *Thalassionema nitzschioides* (Grunow) Mereschkowsky, *Dactyliosolen fragilissimus* (Bergon) Hasle (=Rh. *fragilissima*)) (Slika 15) koje su zastupljene s malim brojem vrsta, no čija je abundancija veća nego u okolnom moru (Kršinić i sur. 2013). Dominacija dijatomeja u jezeru varira sezonski (Slika 15) s obzirom na njihovu prilagodbu uvjetima okoliša. Nakon dijatomeja najzastupljeniji su dinoflagelati (*Prorocentrum arcuatum*) i heterotrofni mikroflagelat *Hermesinum adriaticum* čiji taksonomski položaj još nije razriješen, a zabilježen je samo u Jadranu i Meksičkom zaljevu (Burić i sur.2009). Kalanoidni kopepod *Acartia italica* jedina je metazoska planktonska vrsta s visokom abundancijomu u jezeru. Izrazito je važan za kontrolu populacije putem „*top-down*“ kontrole i funkcioniranje ekosustava jezera (Kršinić i sur. 2013).

Prema Ciglenečki (2015) glavne snage sustava koje utječu na strukturu fitoplanktonske zajednice jezera Zmajevo oko su:

1) Sezonske promjene termohalina koje snažno kontroliraju meromiktične i holomiktične uvjete u jezeru

2) Sezonske fluktuacije hranjivim tvarima i omjeri hranjivih sastojaka u vodenom stupcu

3) Sezonske fluktuacije sulfidnih uvjeta

4) Anoksični stresni uvjeti uzrokovani holomiksijom i potrošnjom kisika

5) Pritisak ispaše zooplanktona.

1.3.2 *Prorocentrum arcuatum* u jezeru Zmajevo oko

U Jadranskom moru *Prorocentrum arcuatum* prvi je put zabilježen u jezeru Zmajevo oko (Viličić i sur. 1997). U sklopu daljnjih istraživanja jezera praćena je njegova pojavnost i ekologija sve do danas. Najveća abundancija *P. arcuatum* u Zmajevom oku zabilježena je u kolovozu 2004. godine, dok su velike koncentracije izmjerene i u kolovozu 2010. i 2013. godine. Abundancija od samo 40 stanica L^{-1} zabilježena je u ožujku i svibnju 2009., srpnju i listopadu 2011. te ožujku i svibnju 2012. Tijekom istraživanog perioda, *P.arcuatum* pojavljivao se s učestalošću od 26% (Žiroš 2020).

2. Cilj istraživanja

Cilj ovog istraživanja je:

1. Odrediti broj taksona i dominantne vrste fitoplanktona u zajednici u jezeru Zmajevo oko u razdoblju 1998. – 2021. godine.
2. Ispitati morfometriju i dinamiku pojavljivanja rijetke vrste *Prorocentrum arcuatum* u jezeru Zmajevo oko.
3. Usporediti morfometriju stanica *P. arcuatum* prema sezonama (proljeće, ljeto, jesen) i dubinama uzorkovanja.
4. Ispitati odnose između morfometrije stanica *P. arcuatum* i fizikalno-kemijskih čimbenika u jezeru Zmajevo oko.
5. Odrediti najčešće vrste s kojima se *P. arcuatum* pojavljuje u fitoplanktonu jezera Zmajevo oko.

3. Materijali i metode

3.1. Uzorkovanje

Uzorci vode Zmajevog oka prikupljeni su Niskinovim crpcima volumena 5 L na različitim dubinama (0 m, 2 m, 5 m, 7 m, 8 m, 9 m, 10 m, 11 m, 12 m i 13 m) te su pohranjeni u neutraliziranom formaldehidu konačne koncentracije 2% (Slika 16). Prikupljeni su uzorci pohranjeni na temperaturi od 4 °C na Biološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu. Analizirani uzorci uzorkovani su: 26. kolovoza 2013., 19. travnja 2018., 8. lipnja 2020., 28. srpnja 2020., 20. listopada 2020 te 24.ožujka 2021. godine.

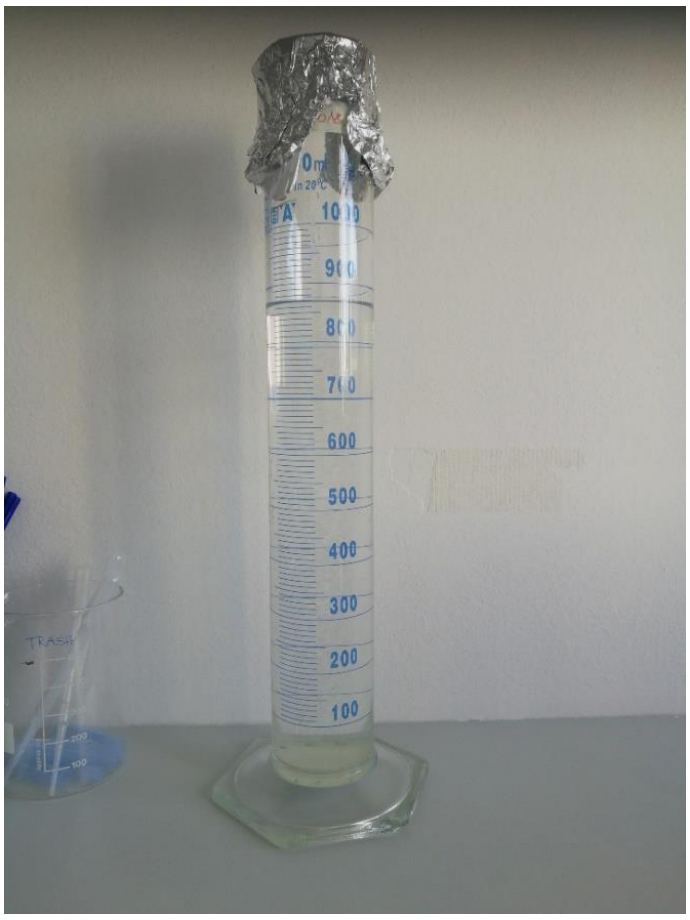


Slika 16. Prikupljeni uzorci Zmajevog oka za analizu (fotogafija: Marko Žmarić)

Prije sedimentacije izvršio sam homogeniziranje uzoraka vertikalnom inverzijom svake bočice 30 puta. Sedimentaciju sam izvršio pomoću menzure (Slika 17) najmanje 48 sati te zatim dekantacijom odijelio sedimentirani dio uzorka. Tako dobivene poduzorke ponovno sam sedimentirao, no ovu sam sedimentaciju izveo prema Utermöhlu (1958) u trajanju od najmanje 24 sata (Slika 18).

Sedimentirane poduzorke (Slika 19A). podvrgnuo sam kvantitativnoj analizi metodom prema Utermöhlu (1958) na invertnom mikroskopu Zeiss Axiovert200 (Slika 19 B i C). Stanice

sam brojao pod povećanjem od 400x (1 transekt) i 200x (transekti duž ostatka osnovne ploče komore za brojanje). Pogreška metode brojenja je ± 10% (Lund i sur. 1958).



Slika 17. Sedimentacija pomoću menzure (fotogafija: Marko Žmarić)

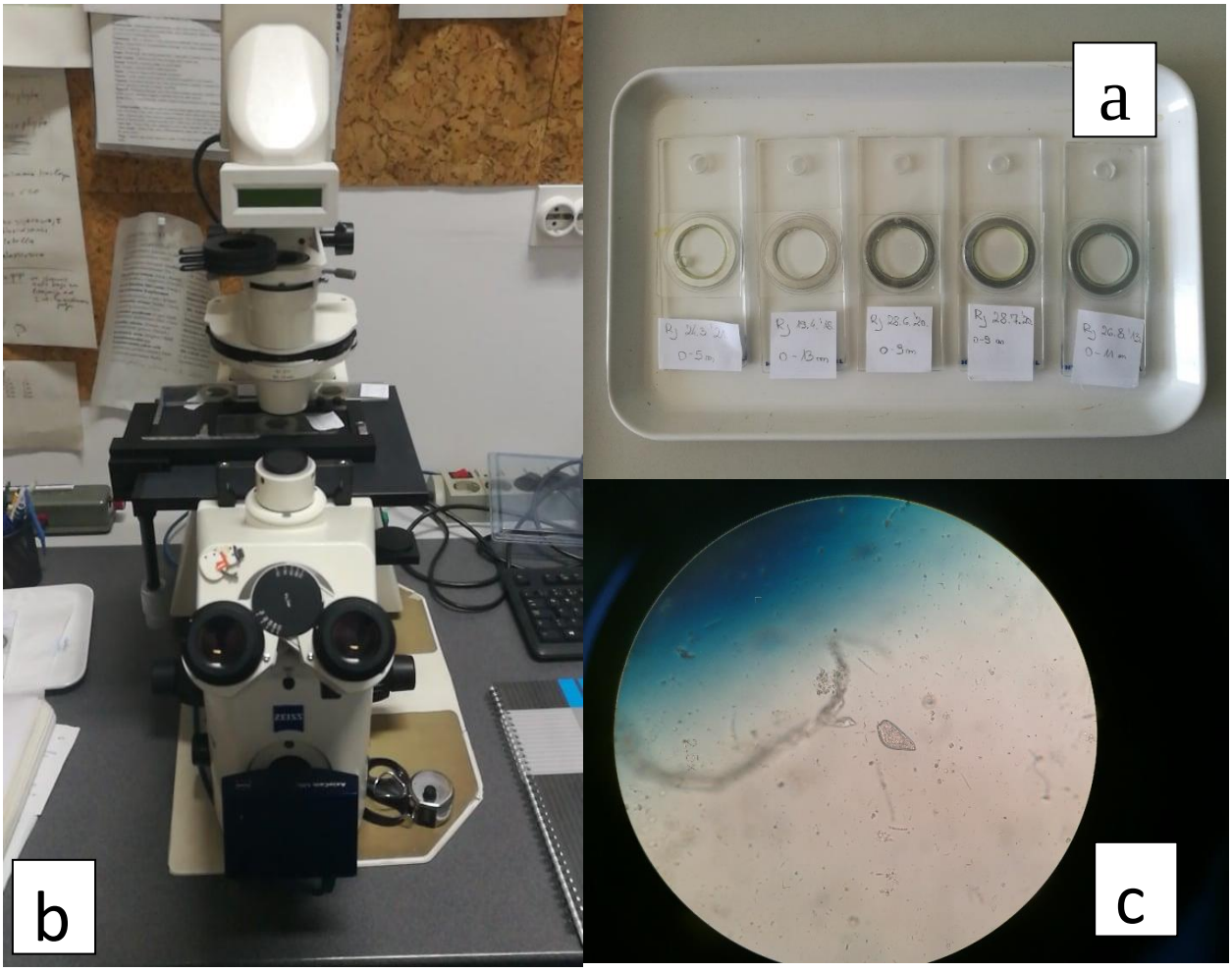
Determinaciju vrste odradio sam uz pomoć priručnika za determinaciju fitoplanktona (Hasle i sur. 1996), a nazive vrsta uskladio s onima na web-lokaciji AlgaeBase (URL 3). Osim analiziranih podataka, u ovaj rad uključeni su i povijesni podaci u razdoblju od 1998. do 2020. godine.

Iz istog Niskinovog crpca uzeti su uzorci za fizikalno-kemijske čimbenike. Temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika i saturacija izmjereni su *in situ* prijenosnim mjeračem HQ40d (Hach Lange, Njemačka). Relativna točnost za određivanje T iznosila je ± 0,3 °C, za pH ± 0,002, S ± 0,5 % i sadržaj kisika ± 1 %. Uzorci za analizu sadržaja organske tvari prikupljeni su u tamne boce od 1,3 L i filtrirani unutar 24 sata nakon uzorkovanja. Čuvanje uzoraka i priprema za DOC analize postupili su kao što je prethodno opisano (Ćosović i sur. 2000; Marguš i sur. 2015). Ukratko, za kvantifikaciju DOC i POC uzorci jezera filtrirani su

kroz Whatman GF/F vlaknaste filtre s veličinom pora od 0,7 μm, koji su prethodno zagrijani na 450 °C tijekom 4 sata. Triplikati filtrata za DOC analizu sakupljeni su u staklene bočice od 20 mL i konzervirani sa 100 μL živinog (II) klorida (10 mg L^{-1}), zapečaćeni teflonskim čepovima na navoj i pohranjeni u mraku do analize. Za POC analizu, filteri (nakon filtracije 0,3-0,5 L uzorka vode iz jezera) pažljivo su pohranjeni u krioepruvetama i smrznuti na -50 °C do analize. Nefiltrirani i filtrirani uzorci za SAS mjerenja pohranjeni su na +4 °C do mjerenja, koje je obavljeno unutar 24 sata od uzorkovanja.



Slika 18. Sedimentacija poduzoraka (fotogafija: Marko Žmarić)



Slika 20. a) Komorice s poduzorcima za mikroskopiranje b) invertni mikroskop Zeiss Axiovert200 c) *Prorocentrum arcuatum* u vidnom polju (fotografije: Marko Žmarić)

3.2 Obrada podataka

Određivanje morfometrije uključuje izmjeru osnovnih dimenzija dužine (l), širine (w) i ukupne dužine (tl) stanica te dužinu trna (tl – l) koje sam izradio pomoću mikroskopu komplementarnog računalnog programa AxioVisual v4.8. U analizi fitoplanktonske zajednice koristio sam i povijesne podatke fitoplanktona za istraživano područje od 1998. do 2021. Za obradu, vizualizaciju i grafički prikaz podataka koristio sam programe Microsoft Excell 2016 i Grapher v12, a za multivarijantnu statistiku software Primer v7.

4. Rezultati

4.1 Dominantne vrste fitoplanktona

Specifični uvjeti u jezeru Zmajevo oko dozvoljavaju pojavljivanje samo malog broja fitoplanktonskih vrsta u usporedbi s okolnim morem, no te vrste karakteriziraju visoke abundancije. U Tablici 2 izdvojene su dominantne vrste na temelju kriterija maksimalnih zabilježenih abudancija (>100000 st. L^{-1}) i učestalosti pojavljivanja (>Fr 10%). Ukupan broj taksona zabilježen od 1998. do 2021. godine je 47.

Tablica 2. Popis dominantnih fitoplanktonskih vrsta u periodu od 1998. do 2021. godine. MAX označava maksimalnu zabilježenu abundanciju stanica L^{-1}, a Fr učestalost pojavljivanja vrste.

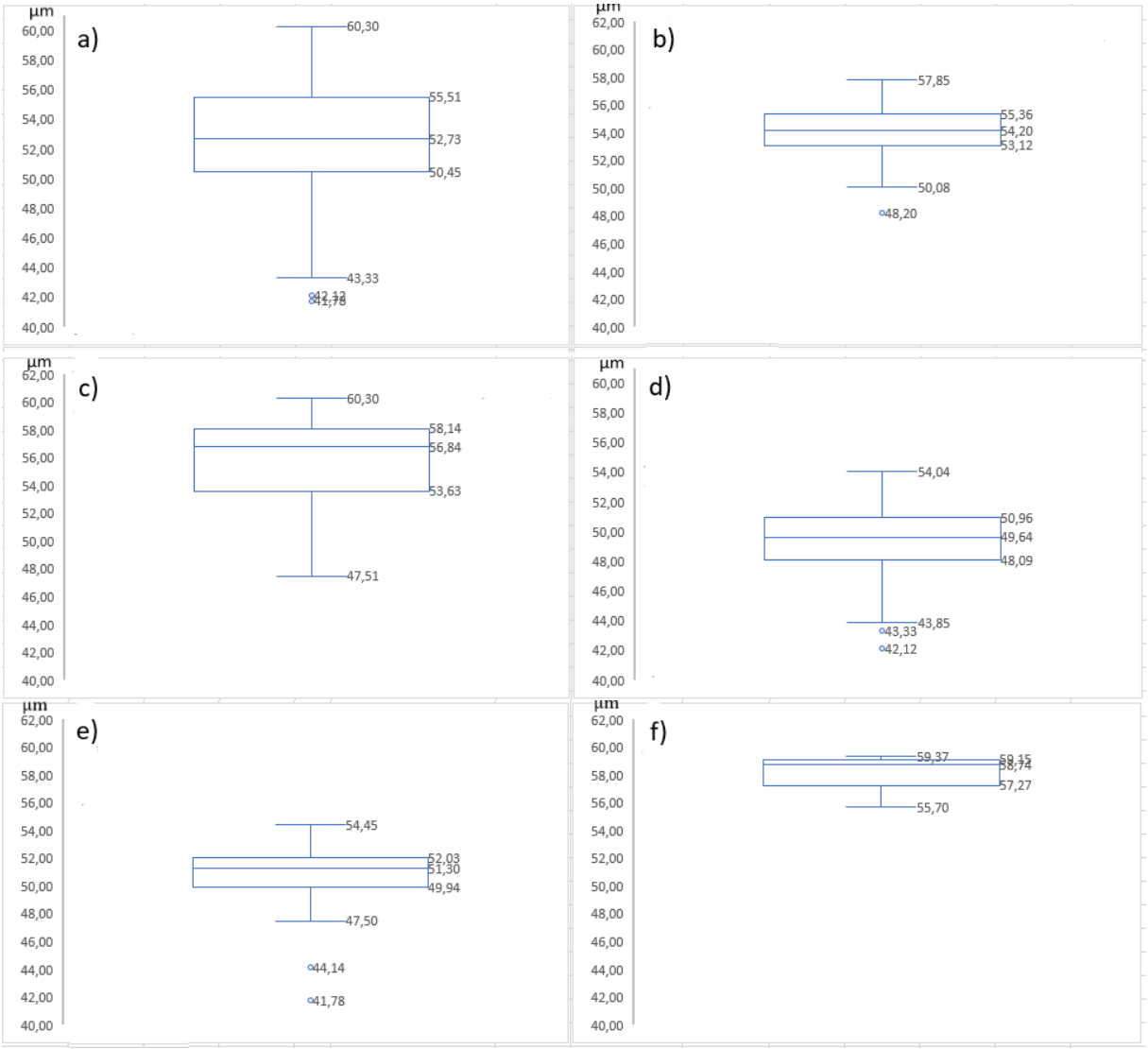
Vrsta	Max	Fr %
Chaetoceros curvisetus Cleve	1833840	45,1
Hermesinum adriaticum Zacharias	181920	25,8
Thalassionema nitzschioides (Grunow) Mereschkowsky	1667885	25,2
Dactyliosolen fragilissimus (Bergon) Hasle (=Rh. *fragilissima*)	2582208	24,9
Cyclotella choctawhatcheeana Prasad	7926200	21,8
Chaetoceros spp.	1165510	11,3

4.2 Vremenska raspodjela dinoflagelata *Prorocentrum arcuatum*

Učestalost pojavljivanja vrste *Prorocentrum arcuatum* za analizirano razdoblje od 1998. do 2021. godine iznosila je 22,4%. Najčešće se razvijao u većim abundancijama u toplijem dijelu godine i to u razdoblju od lipnja do rujna. Najveća abundancija vrste zabilježena je u lipnju 2018. godine (90530 st. L^{-1}), dok su velike abundancije izmjerene i u kolovozu 2010. godine i 2013. godine, travnju 2018. i srpnju 2020. Najniža zabilježena abundancija od samo 40 st. L^{-1} zabilježena je u ožujku i svibnju 2009., srpnju i listopadu 2011. te ožujku i svibnju 2012. Najčešće vrste s kojima se pojavljuje u zajednici jezera su *Ceratium furca*, *Cyclotella choctawhatcheeana*, *Cylindrothaeca closterium*, *Chaetoceros affinis, Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros* spp., *Hermesinum adriaticum*, *Pseudonitzschia* spp., *Thalassionema nitzschioides* te u manjoj brojnosti *Diplopsalis* "complex" i *Goniaulax* sp. Promatramo li njegovu pojavnost kroz vodeni stupac, najčešće se pojavljuje na dubinama između 5 i 9 m, s maksimalnim abundancijama u zoni između 7 i 8 m dubine.

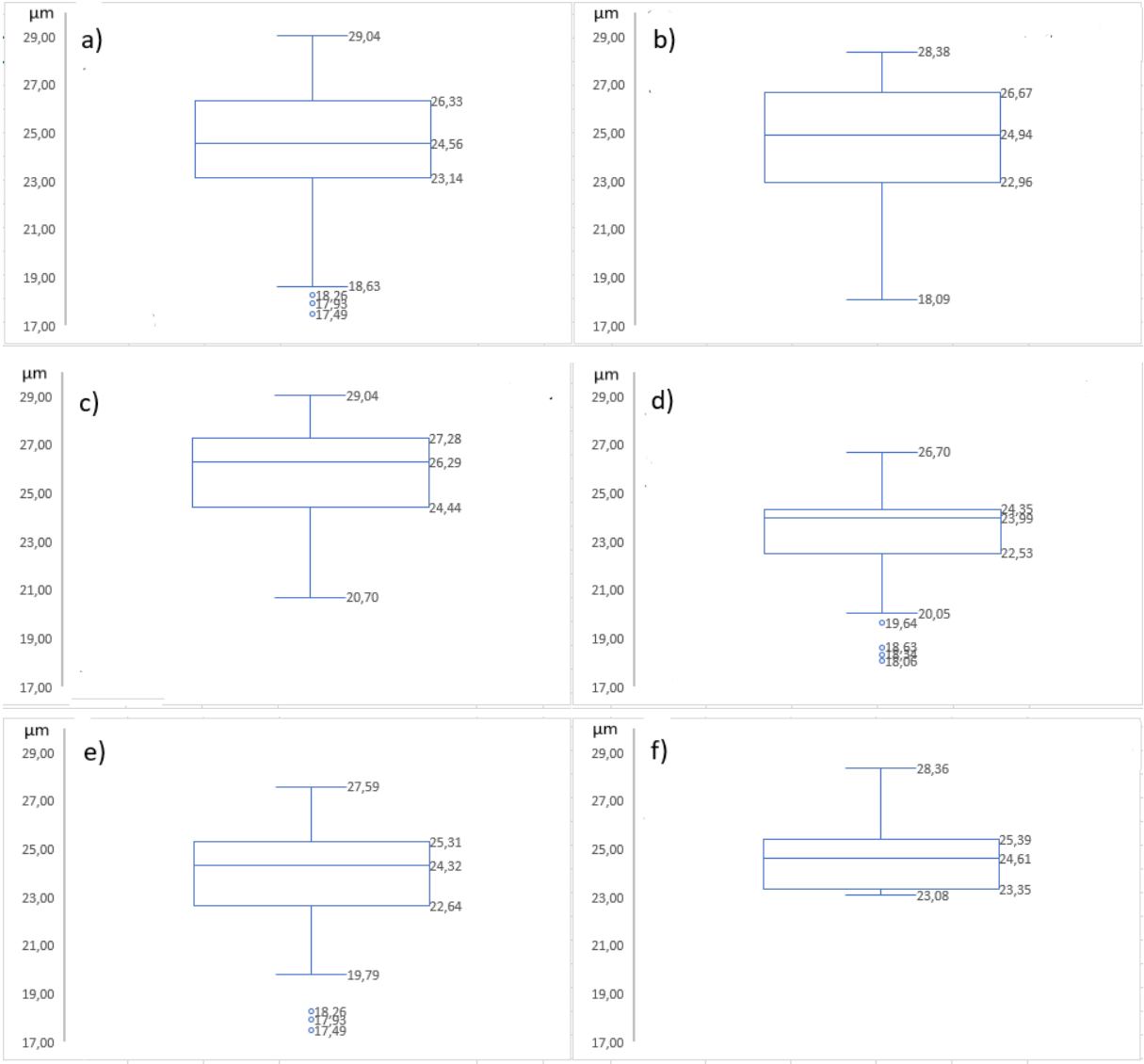
4.3 Morfometrijske značajke stanica *P. arcuatum* u odnosu na okolišne uvjete u jezeru Zmajevo oko

Prosječna dužina izmjerenih stanica *P. arceuatum* iznosi 52,89 ± 3,66 µm, a vrijednost medijana iznosi 52,73 µm. Najmanja dužina stanice izmjerena je 28. srpnja 2020. dužine 41,78 µm, dok je maksimalna vrijednost zabilježena 19. travnja 2018. i iznosi 60,30 µm. Usporedimo li dužine stanica među datumima mjerenja, one najduže zabilježene su za 24. ožujak 2021. no potrebno je naglasiti da je to datum s najmanjim brojem mjerenja. Najmanje dimenzije dužine izmjerene su za datum 8.6.2020. s iznosom medijana 49,64 µm (Slika 21).



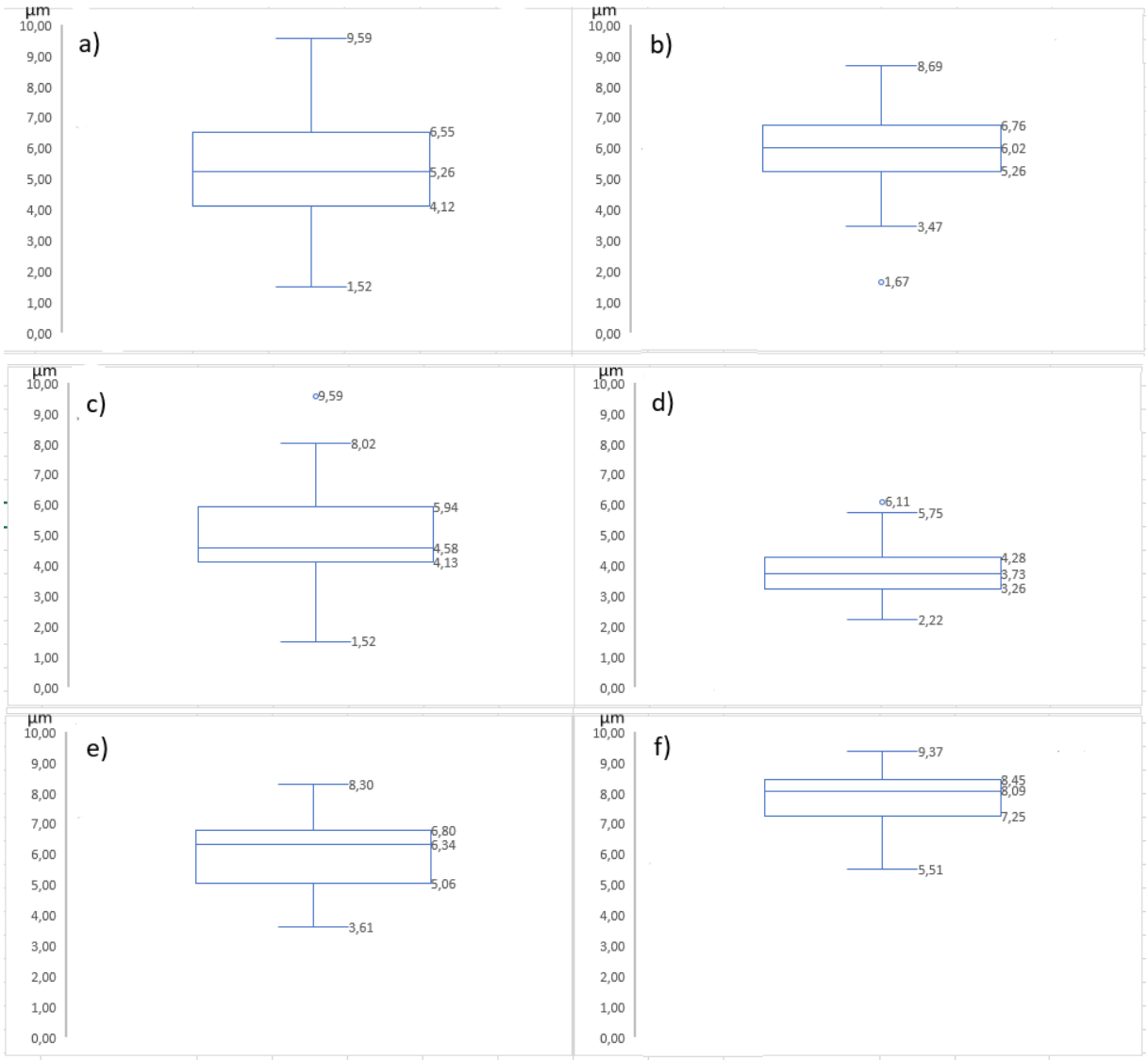
Slika 21. Boxplot analiza izmjere dimenzije dužine *P. arceatum*: a) sve izmjerene stanice (N=168); b) 26. kolovoz 2013. (N=42); c) 19. travanj 2018. (N=41); d) 8. lipanj 2020. (N=36); e) 28. srpanj 2020. (N=42); f) 24. ožujak 2021. (N=7)

Prosječna širina izmjerenih stanica *P. arceatum* iznosi 24,39 ± 2,48 µm, a vrijednost medijana iznosi 24,56 µm. Najmanja širina stanice izmjerena je 28. srpnja 2020. u iznosu 17,49 µm, dok je maksimalna vrijednost zabilježena 19. travnja 2018. i iznosi 29,04 µm. Usporedimo li širine stanica među datumima mjerenja, one najšire zabilježene su za 19. travnja 2018., dok su one najmanjih dimenzija širine izmjerene za datum 8.6.2020. s iznosom medijana 23,99 µm (Slika 22).

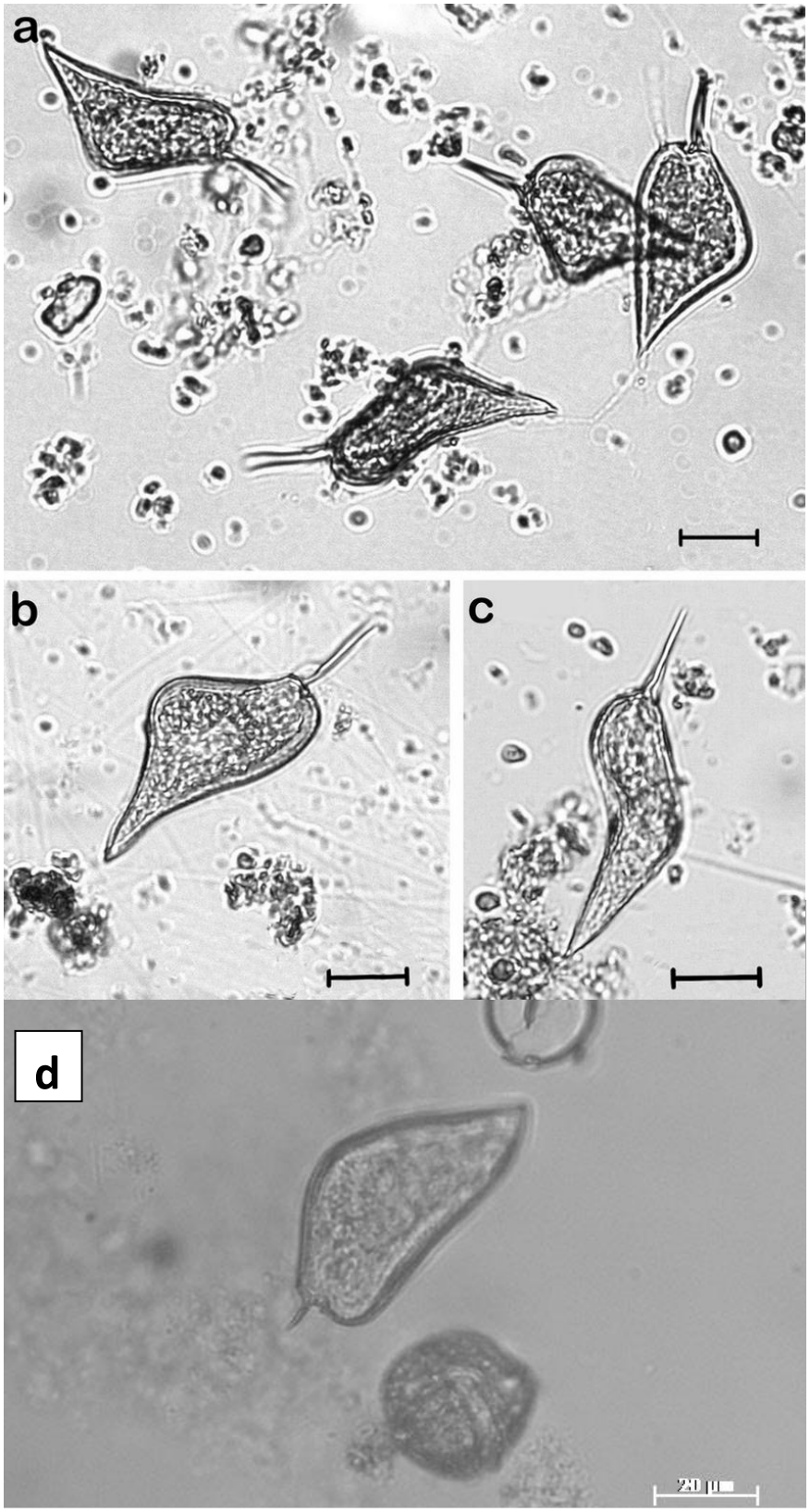


Slika 22. Boxplot analiza izmjere dimenzije širine *P. arceatum*: a) sve izmjerene stanice (N=168); b) 26. kolovoz 2013. (N=42); c) 19. travanj 2018. (N=41); d) 8. lipanj 2020. (N=36); e) 28. srpanj 2020. (N=42); f) 24. ožujak 2021. (N=7)

Prosječna dužina izmjerenih trnova *P. arceatum* iznosi 5,37 ± 1,60 µm, a vrijednost medijana iznosi 5,26 µm (Slika 23). Te dužine manje su od onih izmjenih u Medulinskom zaljevu (Slika 24). Najmanja dužina trna izmjerena je 19. travnja 2020. dužine 1,52 µm, dok je maksimalna vrijednost zabilježena za isti datum i iznosi 9,59 µm. Usporedimo li dužine trnova među datumima mjerenja, stanice s najdužim trnovima zabilježene su za 24. ožujak 2021. s iznosom medijana 8,09 µm. Stanice s najmanjim dimenzijama trna izmjerene su za datum 8.6.2020. s iznosom medijana 3,73 µm.



Slika 23. Boxplot analiza izmjere dimenzije dužine trna *P. arceatum*: a) sve izmjerene stanice (N=168); b) 26. kolovoz 2013. (N=42); c) 19. travanj 2018. (N=41); d) 8. lipanj 2020. (N=36); e) 28. srpanj 2020. (N=42); f) 24. ožujak 2021. (N=7)



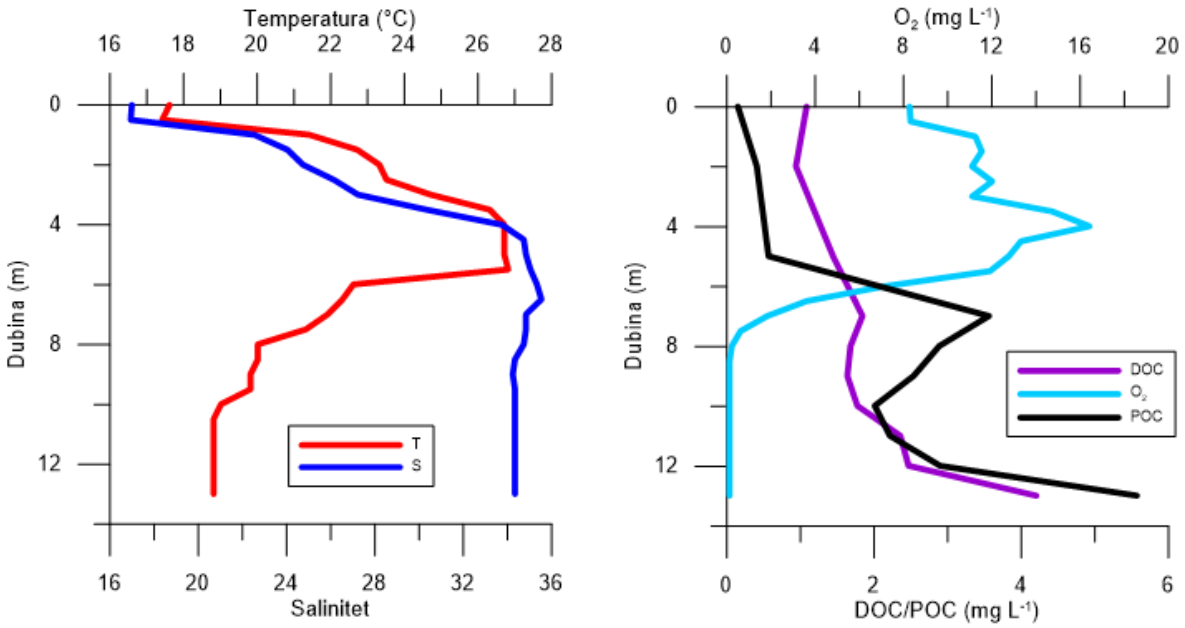
Slika 24. Razni morfotipovi *P. arcuatum* mikroskopirani svjetlosnim mikroskopom: a), b), c) Medulinski zaljev (Preuzeto iz Skejić i sur. 2017), d) Zmajevo oko (fotogafija: Marko Žmarić).

Tablicama 3-8 prikazani su fizikalno-kemijski čimbenici za površinski oksični sloj u jezeru u kojima *P. arcuatum* obitava.

Najniža temperatura jezera na dan 19. travnja 2018. izmjerena je na površini i iznosi 17,4 °C, dok ona najviša izmjerena iznosi 26,8 °C na 5,5 m dubine (Tablica 3). Salinitet čija je najniža vrijednost također izmjerena na površini jezera iznosi 16,9 ‰, dok je maksimalna izmjerena na 6,5 m dubine te iznosi 35,5 ‰. Te vrijednosti rastu do oko 4m dubine gdje se naglo mijenjaju te je piknoklina zabilježena na dubini između 5 i 6 m (Slika 25). Koncentracija otopljenog kisika na dan mjerenja pri površini iznosi 8,25 mg L^{-1} i raste do 4,5 m dubine gdje je maksimalna i iznosi 13,3 mg L^{-1}. Nakon te dubine koncentracija naglo pada te na 7 m dubine nailazimo na hipoksične uvjete (1,81 mg L^{-1}) i konačno anoksične na 8 m. Koncentracije DOC i POC najniže su pri površini jezera i rastu s dubinom te svoje maksimume bilježe na samom dnu.

Tablica 3. Morfološki podaci i fizikalno-kemijski parametri na dan 19. travnja 2018. Minimalna (MIN), maksimalna (MAX), srednja vrijednost (AVG), standardna devijacija (STDEV), širina (w), dužina (l), ukupna dužina (tl) organizma, dužina trna (tl – l), omjer dužina/širina (l / w), temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC)

N = 41	w µm	l µm	tl µm	tl – l µm	l / w	T °C	S ‰	O_2 mg L^{-1}	DOC mg L^{-1}	POC mg L^{-1}
AVG	25,78	56,08	61,09	5,01	2,19	23,50	28,40	10,95	1,15	0,37
STDEV	2,22	2,76	3,62	1,50	0,22	3,17	6,75	3,25	0,26	0,21
MIN	20,70	47,51	51,11	1,52	1,80	17,40	16,90	3,60	0,94	0,14
MAX	29,04	60,30	66,90	9,59	2,83	26,80	35,50	16,40	1,44	0,56

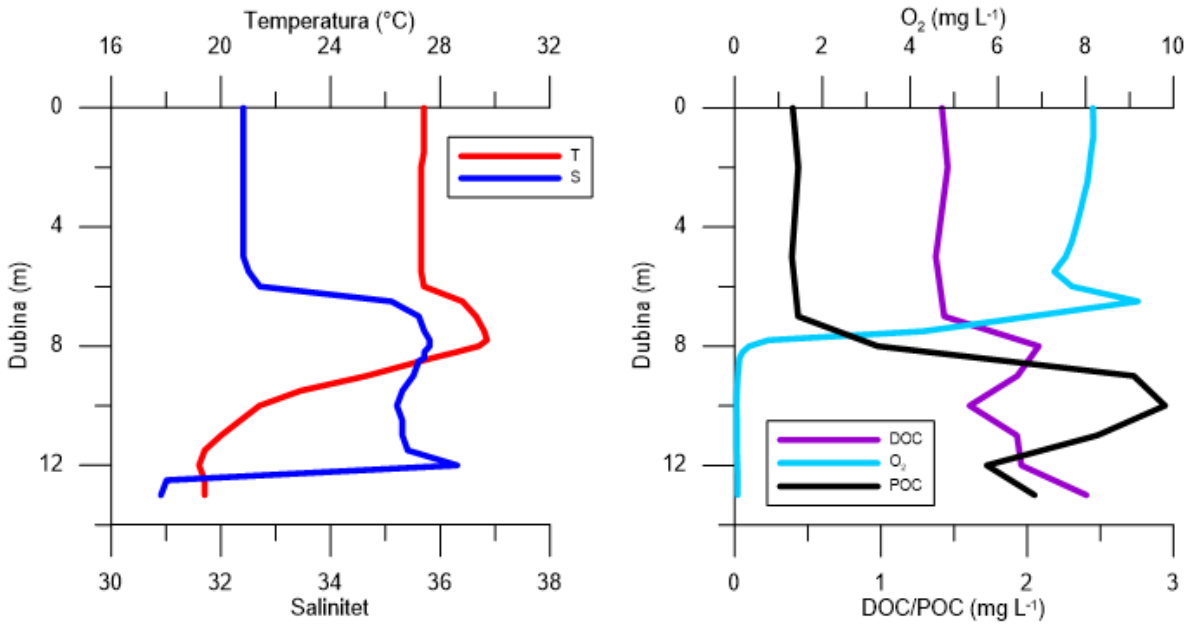


Slika 25. Vertikalni profili vodenog stupca jezera Zmajevo oko na dan 19. travnja 2018. Koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC).

Temperatura i salinitet jezera na dan 26. kolovoza 2013. od površine do 6 m dubine gotovo se ne mijenjaju i iznose 27,4 °C i 32,4 ‰. Na 6 m dubine nalazi se oštra piknoklina (Slika 26) te vrijednosti navedenih parametara naglo rastu. Na 8 m dubine bilježimo njihove maksimume 29,6 °C i 35,7 ‰ (Tablica 4) nakon čega vrijednosti padaju prema dnu. Minimalni iznos temperature 19,2 °C izmjeren je na 12 m, dok je minimum saliniteta 30,9 ‰ na samom dnu, odnosno 13 m. Kretanje koncentracija otopljenog kisika, DOC i POC kroz vodeni stupac prate navedeni obrazac temperature i saliniteta te su od površine do 6 m konstantne. Koncentracija otopljenog kisika maksimalna je 6,5 m i iznosi 9,19 mg L^{-1} nakon čega vrijednosti naglo padaju prema dnu. Uvjeti hipoksije nalaze se ispod 7,5 m dubine. Suprotno koncentracijama otopljenog kisika, koncentracije DOC i POC nakon 6 m dubine rastu.

Tablica 4. Morfološki podaci i fizikalno-kemijski parametri na dan 26. kolovoza 2013. Minimalna (MIN), maksimalna (MAX), srednja vrijednost (AVG), standardna devijacija (STDEV), širina (w), dužina (l), ukupna dužina (tl) organizma, dužina trna (tl – l), omjer dužina/širina (l / w), temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC)

N = 42	w µm	l µm	tl µm	tl – l µm	l / w	T °C	S ‰	O_2 mg L^{-1}	DOC mg L^{-1}	POC mg L^{-1}
AVG	24,48	54,06	59,99	5,93	2,24	27,7	33,00	7,67	1,42	0,41
STDEV	2,69	2,04	2,57	1,39	0,27	0,78	1,23	1,04	0,03	0,02
MIN	18,09	48,2	53,92	1,67	1,92	27,30	32,40	4,30	1,37	0,39
MAX	28,38	57,85	65,51	8,69	3,08	29,6	35,7	9,19	1,45	0,43

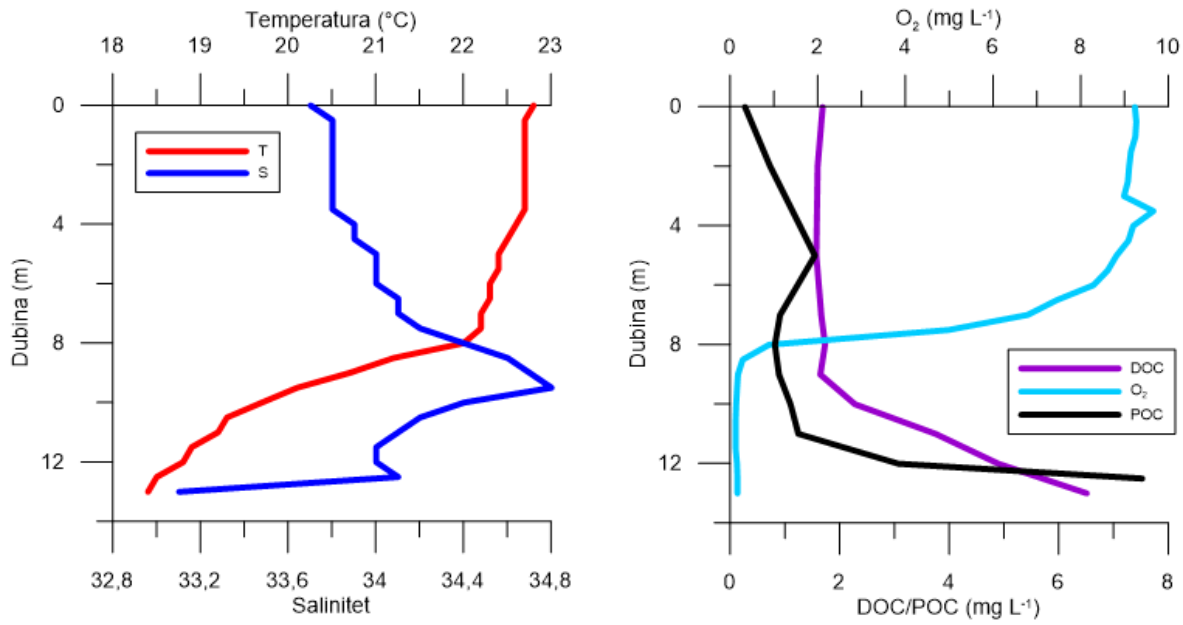


Slika 26. Vertikalni profili vodenog stupca jezera Zmajevo oko na dan 26. kolovoza 2013. Koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC).

Temperatura na dan 8. lipnja 2013. na površini jezera iznosi 22,8 °C te prema dubini pada i minimalna je na 13 m dubine. Salinitet je na površini jezera 33,7 ‰ te raste prema dnu s maksimumom 34,8 ‰ na 9,5 m dubine (Tablica 5). Piknoklina se nalazi na 9 m dubine (Slika 27). Koncentracija otopljenog kisika na površini jezera iznosi 9,25 mg L^{-1} i raste do 3,5 m dubine s maksimumom 9,67 mg L^{-1} nakon čega naglo pada te već ispod 7 m počinju anoksični uvjeti. Koncentracije DOC i POC minimalne su na površini jezera te rastu prema dnu gdje dosežu maksimalne vrijednosti 6,517 mg L^{-1} za DOC i 7,526 mg L^{-1} za POC.

Tablica 5. Morfološki podaci i fizikalno-kemijski parametri na dan 8. lipnja 2020. Minimalna (MIN), maksimalna (MAX), srednja vrijednost (AVG), standardna devijacija (STDEV), širina (w), dužina (l), ukupna dužina (tl) organizma, dužina trna (tl – l), omjer dužina/širina (l / w), temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC)

N = 36	w µm	l µm	tl µm	tl – l µm	l / w	T °C	S ‰	O_2 mg L^{-1}	DOC mg L^{-1}	POC mg L^{-1}
AVG	23,26	49,31	53,13	3,82	2,14	22,5	33,91	8,57	1,64	0,87
STDEV	2,10	2,61	3,00	0,88	0,24	0,21	0,14	1,20	0,05	0,53
MIN	18,06	42,12	45,31	2,22	1,74	22,2	33,7	5	1,58	0,28
MAX	26,7	54,04	58,61	6,11	2,89	22,8	34,8	9,67	1,69	1,55

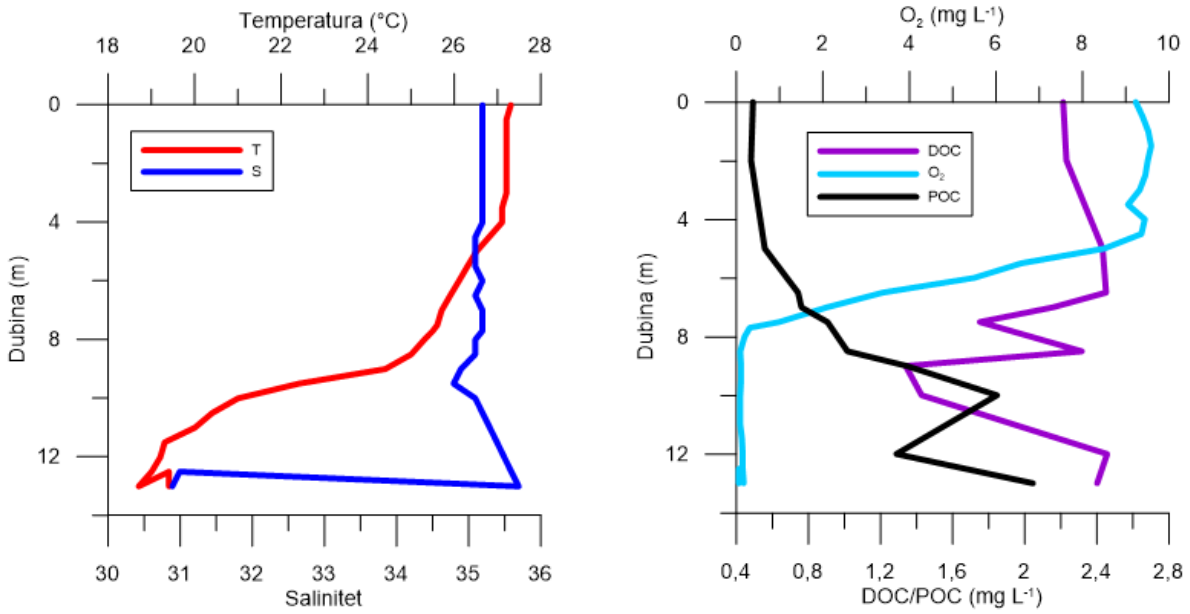


Slika 27. Vertikalni profili vodenog stupca jezera Zmajevo oko na dan 8. lipnja 2020. Koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC).

Dana 28. srpnja 2020. maksimalan iznos temperature vodenog stupca 27,3 °C (Tablica 6) zabilježen je na površini. Konstantna je do 4 m dubine nakon čega iznosi padaju sve do dna s minimalnih 18,7 °C na 13 m dubine. Iznosi saliniteta podjednaki su za cijeli vodeni stupac s minimalnih 34,8 ‰ (9 m) i maksimalnih 35,7 ‰ (13 m). Koncentracija otopljenog kisika na dan mjerenja pri površini iznosi 9,24 mg L^{-1} dok je maksimum 9,60 mg L^{-1} zabilježen na 1,5 m dubine nakon čega pada s dubinom te su ispod 7 m dubine zabilježeni hipoksični uvjeti (Slika 28). Površinska koncentracija DOC iznosi 2,212 mg L^{-1}, nakon čega pada prema dnu i minimalno iznosi 1,427 mg L^{-1} na 10 m dubine. Koncentracija POC na površini jezera iznosi 0,496 mg L^{-1} te raste s dubinom do maksimuma 0,765 mg L^{-1} na 10 m dubine.

Tablica 6. Morfološki podaci i fizikalno-kemijski parametri na dan 28. srpanja 2020. Minimalna (MIN), maksimalna (MAX), srednja vrijednost (AVG), standardna devijacija (STDEV), širina (w), dužina (l), ukupna dužina (tl) organizma, dužina trna (tl – l), omjer dužina/širina (l / w), temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC)

N = 42	w µm	l µm	tl µm	tl – l µm	l / w	T °C	S	O_2 mg L^{-1}	DOC mg L^{-1}	POC mg L^{-1}
AVG	23,83	50,79	56,86	6,06	2,15	26,8	35,17	8,00	2,295	0,611
STDEV	2,33	2,20	2,54	1,19	0,25	0,55	0,05	2,45	0,14	0,14
MIN	17,49	41,78	47,58	3,61	1,87	25,7	35,1	2,1	2,1545	0,486
MAX	27,59	54,45	62,52	8,3	2,91	27,3	35,2	9,6	2,4495	0,765

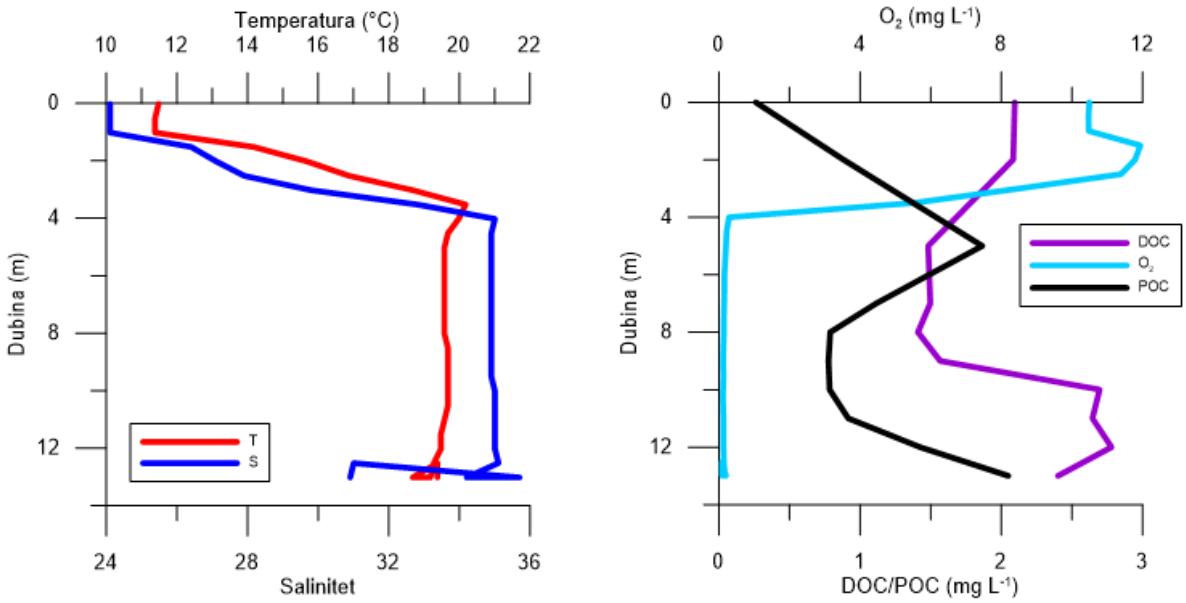


Slika 28. Vertikalni profili vodenog stupca jezera Zmajevo oko na dan 28. srpanj 2020. Koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC).

Vrijednosti temperature i saliniteta jezera na dan 24. ožujka 2021. najniže su na površini te minimumi iznose 11,4 °C i 24,1 ‰ (Tablica 7). U sloju od površine do 4 m dubine njihove vrijednosti naglo rastu te ondje dostižu svoje maksimume 20,0 °C i 35,0 ‰. Navedeni iznosi temperature i saliniteta ostaju konstantni ispod piknokline na 4 m dubine pa sve do dna (Slika 29). Koncentracija otopljenog kisika na dan mjerenja pri površini iznosi 10,47 mg L^{-1} i raste do 1,5 m dubine gdje je maksimalna i iznosi 11,77 mg L^{-1}. Nakon te dubine koncentracija naglo pada te već na 4,5 m dubine nalazimo potpuno anoksične uvjete (0,27 mg L^{-1}). Koncentracija DOC pri površini iznosi 2,095 mg L^{-1} te se njene vrijednosti smanjuju do minimalnih 1,409 mg L^{-1} na 8 m dubine. Nakon toga ponovno raste do maksimuma 2,779 mg L^{-1} na 10 m. Koncentracija POC najniža je pri površini jezera i iznosi 0,259 mg L^{-1}, a maksimalna 1,864 mg L^{-1} na 5 m dubine.

Tablica 7. Morfološki podaci i fizikalno-kemijski parametri na dan 24. ožujka 2021. Minimalna (MIN), maksimalna (MAX), srednja vrijednost (AVG), standardna devijacija (STDEV), širina (w), dužina (l), ukupna dužina (tl) organizma, dužina trna (tl – l), omjer dužina/širina (l / w), temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC)

N = 7	w µm	l µm	tl µm	tl – l µm	l / w	T °C	S ‰	O_2 mg L^{-1}	DOC mg L^{-1}	POC mg L^{-1}
AVG	24,78	58,23	66,03	7,80	2,36	15,0	27,04	10,05	2,09	0,57
STDEV	1,82	1,30	2,32	1,21	0,15	3,46	3,11	2,13	0,01	0,44
MIN	23,08	55,7	61,21	5,51	2,09	11,4	24,1	5,51	2,09	0,26
MAX	28,36	59,37	67,98	9,37	2,52	20,2	32,8	11,92	2,08	0,88

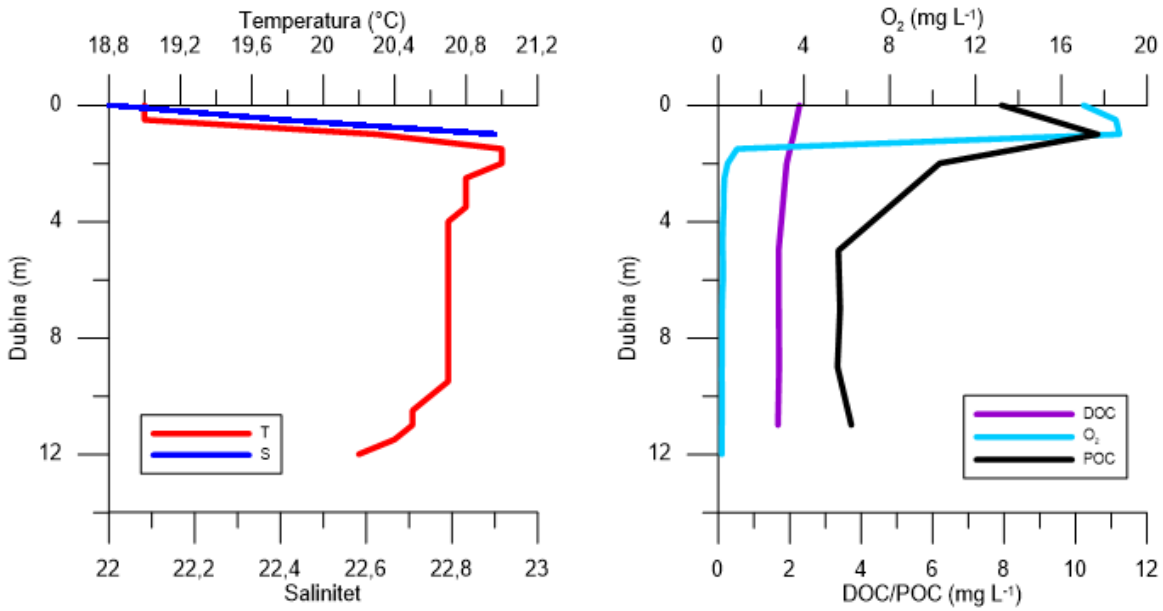


Slika 29. Vertikalni profili vodenog stupca jezera Zmajevo oko na dan 24. ožujka 2021. Koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC).

Jedini uzorci u kojima *P. arcuatum* nije pronađen su oni od 20. listopada 2020. Tog dana temperatura pri površini jezera iznosi 19,4 °C i raste do maksimalnih 21,0 °C na 1,5 m nakon čega je konstantna sve do dna (Tablica 8). Salinitet je mjeren samo u prvom metru dubine i kreće se od 22,0 do 22,9 ‰. Oksični sloj nalazi se u prvom metru dubine a koncentracija otopljenog kisika iznimno je visoka i iznosi maksimalnih 18,69 mg L^{-1}. Već na 1,5 m njegova koncentracija iznosi 0,86 mg L^{-1} te anoksični uvjeti vladaju sve do dna jezera (Slika 30). Koncentracija DOM maksimalna je pri površini te blago pada prema dnu. Koncentracija POC za ovaj datum maksimalna je među svim mjerenjima i iznosi 10,594 mg L^{-1} na 1 m dubine.

Tablica 8. Fizikalno-kemijski parametri na dan 19. travnja 2018. Minimalna (MIN), maksimalna (MAX), srednja vrijednost (AVG), standardna devijacija (STDEV), širina (w), dužina (l), ukupna dužina (tl) organizma, dužina trna (tl – l), omjer dužina/širina (l / w), temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC)

N = 7	w µm	l µm	tl µm	tl – l µm	l / w	T °C	S ‰	O_2 mg L^{-1}	DOC mg L^{-1}	POC mg L^{-1}
AVG	/	/	/	/	/	19,4	22,43	18,08	2,17	9,25
STDEV	/	/	/	/	/	0,75	0,45	0,92	0,11	1,90
MIN	/	/	/	/	/	19,0	22,0	17,02	2,08	7,91
MAX	/	/	/	/	/	20,3	22,9	18,69	2,25	10,59



Slika 30. Vertikalni profili vodenog stupca jezera Zmajevo oko na dan 20. listopada 2020. Koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC).

Tijekom istraživanog razdoblja nisu primijećena odstupanja u dužinama stanica ali se primjećuje da su stanice za 24. ožujka 2021. veličinski najsličnije. Tog datuma bile su najveće fluktuacije saliniteta i temperature (Tablica 9).

Tablica 9. Morfološki podaci i abudancije *P. arcuatum* te fizikalno-kemijski parametri u jezeru Zmajevo oko za istraživane datume. Srednja vrijednost dužine stanice (l AVG), minimalna (l MIN) i maksimalna (l MAX) dužina stanice, srednja vrijednost širine stanice (w AVG), minimalna (w MIN) i maksimalna (w MAX) širina stanice, dužina trna (tl – l), Srednja vrijednost ukupne dužine (tl AVG), minimalna (Abund. MIN) i maksimalna (Abund. MAX) abundancija, minimalne i maksimalne vrijednosti saliniteta (S min - max) te minimalna (T MIN) i maksimalna (T MAX) temperatura jezera

	26.8.2013.	**19.4.2018.**	**8.6.2020.**	**28.7.2020.**	**24.3.2021.**
N	**42**	**41**	**36**	**42**	**7**
l AVG (µm)	54,1± 2,04	56,1 ± 2,76	49,3 ± 2,61	50,8 ± 2,20	58,2 ± 1,30
l MIN (µm)	48,2	47,51	42,12	41,78	55,7
l MAX (µm)	57,9	60,3	54,0	54,5	59,4
w AVG (µm)	24,5 ± 2,69	25,8 ± 2,22	23,3 ± 2,10	23,8 ± 2,33	24,8 ± 1,82
w MIN (µm)	18,09	20,70	18,06	17,49	23,08
w MAX (µm)	28,38	29,04	26,70	27,59	28,36
tl - l (µm)	5,9 ± 1,39	5,0 ± 1.52	3,8 ± 2,22	6,1 ± 1,19	7,8 ± 1,21
tl AVG (µm)	60,0 ± 2,57	61,1 ± 3,62	53,1 ± 3,00	56,9 ± 2,54	66,0 ± 2,32
Abund. MIN (st. L^{-1})	4170 (8m)	27432 (5m)	2185 (7m)	1890 (0m)	380 (2m)
Abund. MAX (st. L^{-1})	13680 (8m)	27432 (5m)	90530 (8m)	52120 (7m)	380 (8m)
S min - max	32,4 - 35,8	34,3 - 34,8	33,7 - 34,4	34,8 - 35,2	24,1 - 34,1
T MIN (°C)	20 (11m)	18,8 (13m)	22,0 (8m)	21,0 (10m)	11,5 (0m)
T MAX (°C)	29,4 (8m)	26,7 (5m)	22,8 (0m)	27,3 (0m)	19,6 (5m)

Analiza glavnih komponenti (PCA; engl. *Principal Component Analysis*) pokazuje da je pomoću tri osi opisano čak 95% varijabilnosti između uzoraka, pomoću dvije 88,6% dok pomoću samo jedne 50,4% (Tablica 10). PC1 os najviše pozitivno korelira s koncentracijom DOC dok su najveće negativne korelacije s temperaturom i salinitetom. PC2 os najviše pozitivno korelira s koncentracijom otopljenog O_2, a negativno s koncentracijom POC. PC3 os najviše pozitivno korelirana s koncentracijom POC te koncentracijom otopljenog O_2 (Tablica 11).

Tablica 10. Eigenvalues i postotna varijacija i kumulativna varijacija analize glavnih komponenti.

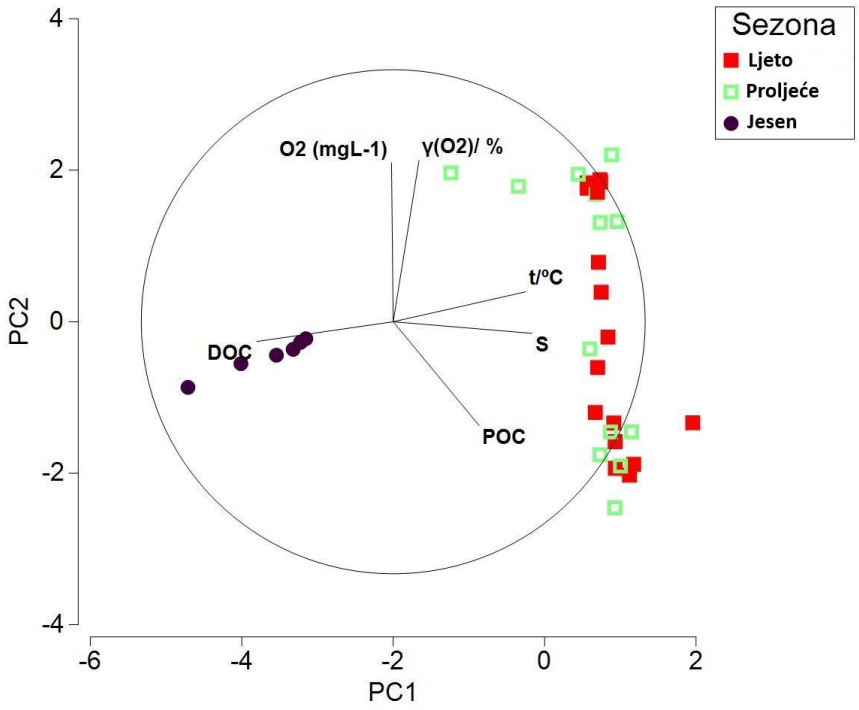
PC	Eigenvalues	%Variation	Cum.%Variation
1	3,03	50,4	50,4
2	2,29	38,2	88,6
3	0,383	6,4	95
4	0,166	2,8	97,8
5	0,106	1,8	99,5

Tablica 11. Eigenvectors i koeficijenti korelacije osi s fizikalno-kemijskim parametrima.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
T (°C)	-0,525	0,119	-0,295	0,765	-0,195
S	-0,551	-0,046	-0,12	-0,231	0,746
DOC (mg L^{-1})	0,542	-0,078	0,128	0,582	0,587
POC (mg L^{-1})	-0,341	-0,412	0,814	0,134	-0,043
O_2 (mg L^{-1})	0,007	0,631	0,445	0,047	-0,092
O_2 (%)	-0,102	0,64	0,148	-0,046	0,225

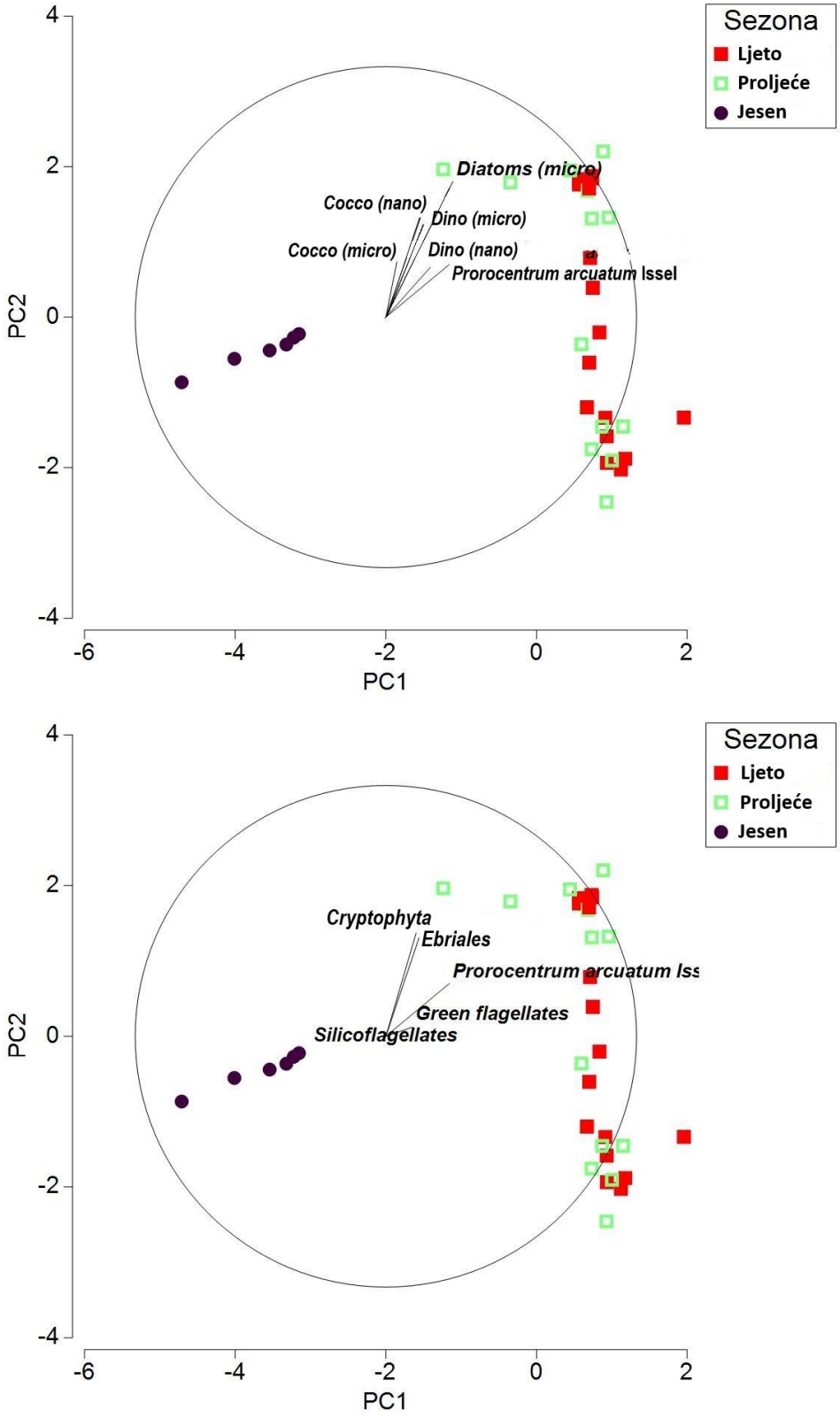
Temperatura, salinitet i koncentracija DOC glavni su čimbenici koji opisuju istraživano područje.

Analiza glavnih komponenti ukazuje na podjelu uzoraka po sezonama gdje se proljeće i ljeto grupiraju zajedno i pozitivno su korelirali s temperaturom dok se jesen zasebno odvaja te pozitivno korelira s koncentracijom DOC (Slika 31). Vrsta *P. arcuatum* kao i ostale skupine fitoplanktona dominirale su u proljeće i ljeto te su pozitivno korelirale s koncentracijom otopljenog kisika.



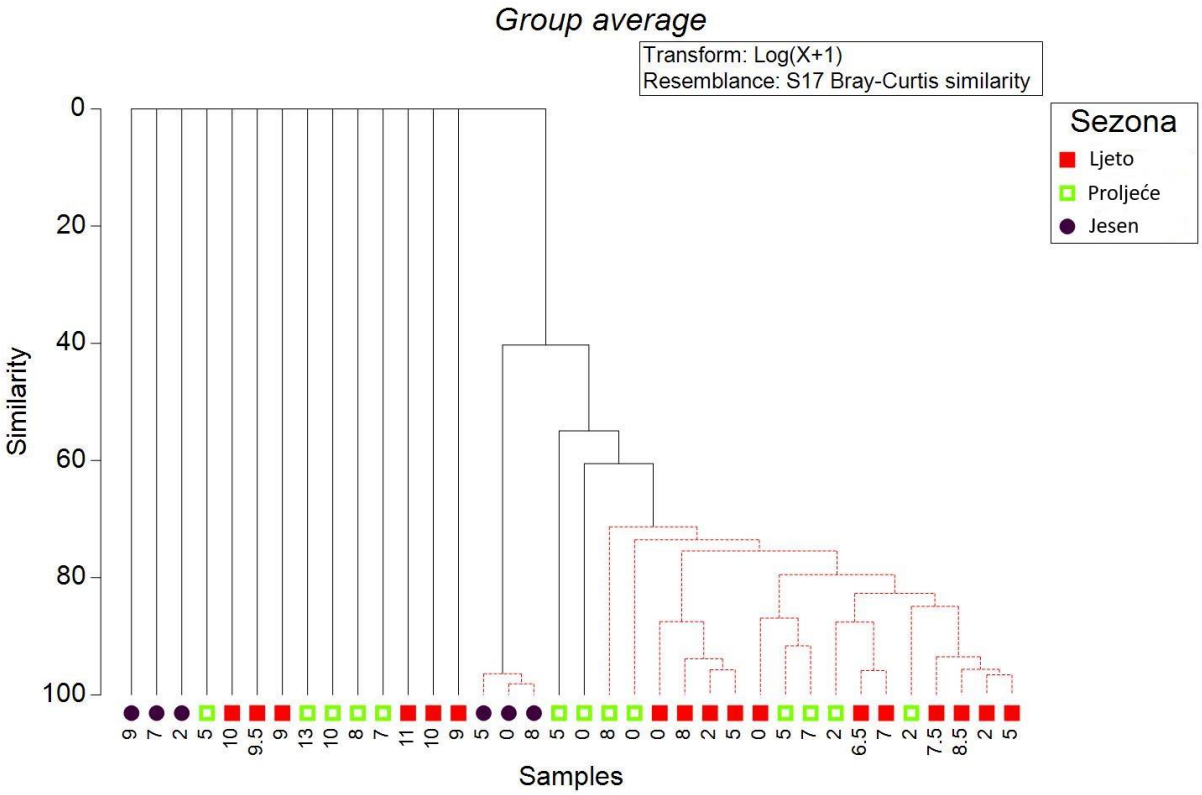
Slika 31. Analiza glavnih komponenti (PCA; engl. *principal component analysis*) na normaliziranim i transformiranim podacima okolišnih varijabli superponirani vrijednostima abundancija *P. arcuatum*. Temperatura (T), salinitet (S), koncentracija otopljenog kisika (O_2), koncentracija otopljenje organske tvari (DOC), koncentracija čestične organske tvari (POC)

Također, analiza glavnih komponenti ukazuje na sličnost *P. arcutum* s ostatkom fitoplanktonske zajednice (Slika 32).



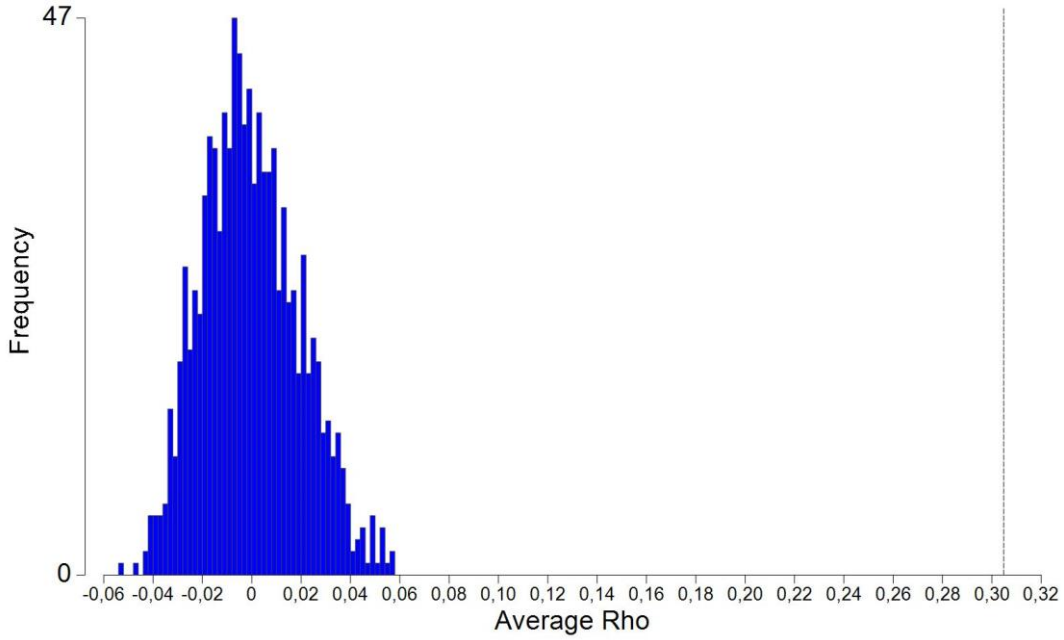
Slika 32. Analiza glavnih komponenti na normaliziranim i transformiranim podacima okolišnih varijabli superponirani vrijednostima abundancija *P. arcuatum* i ostalih grupa fitoplanktona.

Klaster analiza provedena je na temelju Bray-Curtisove matrice sličnosti prema dubini i sezonama uzorkovanja (Slika 33). Rezultati sličnosti pokazuju odjeljivanje uzoraka prema dubini, odnosno uzorci uzorkovani u oksičnom (desno) i anoksičnom (lijevo) stupcu vode ne pokazuju sličnost. Dubina oksično-anoksične granice nije konstantna već sezonski varira. Uočena je velika sličnost prema sezonama uzorkovanja što jasno vidimo njihovim grupiranjem na x-osi.



Slika 33. Multivarijantna statistička analiza – hijerarhijska klaster analiza (HCA; engl. *Hierarchical Cluster Analysis*) klaster analiza prosječne sličnosti uzoraka mikrofitoplanktona s jezera Zmajevo oko po sezonama istraživanja te dubini.

Histogram prikazuje rezultate nasumičnih testova vrijednosti dobivene pod pretpostavkom da nema korelacije između matrica. Naša vrijednost je prikazana isprekidanom linijom i nalazi se izvan histograma iz čega možemo zaključiti postojanje pozitivne korelacije između matrica sličnosti, odnosno korelacija između morfometrije stanica *P. arcuatum* i fizikalno-kemijskih čimbenika (Slika 34). *BEST* test analiza je korištena kako bi se odredili čimbenici koji značajno koreliraju s morfometrijskim značajkama. *Best global* test između Bray-Curtis matrice sličnosti uzoraka prema morfometriji *P. arcuatum* pokazuje temperaturu i salinitet kao najznačajnije čimbenike (Rho= 0,131; statistička razina značajnosti je 3%, broj nasumičnih testova: 99), a zatim slijede DOC i POC (Rho= 0,233, statistička razina značajnosti je 1%, broj nasumičnih testova: 99) i kisik (Rho= 0,188, statistička razina značajnosti je 1%, broj nasumičnih testova: 99)



Slika 34. Test korelacije (Relate) (metoda Spearmanove korelacije) između Bray-Curtis matrice sličnosti uzoraka prema morfometriji *P. acuatum* i *Euclidian distance* matrice sličnosti uzoraka prema fizikalno-kemijskim parametrima. Rezultat statiske je Rho value (0,305 – prikazano linijom), razina statističke značajnosti je 0.1%. Broj nasumičnih testova je 999.

5. Rasprava

Vrsta *Prorocentrum arcuatum* Issel je fotosintetski dinoflagelat specifičan po rijetkoj pojavnosti u okolišu. Poznat kao neritička vrsta u umjerenom i tropskom pojasu zabilježen je u obalnim vodama Atlantskog i Tihog oceana te Mediterana. O njegovoj rijetkoj pojavnosti govori činjenica da je u Jadranskom moru pronađen samo na dvije lokacije, u Zmajevom oku kod Rogoznice (Viličić i sur. 1997), kao povremeno dominanta vrsta, dok je drugi nalaz vrste zabilježen u Medulinskom zaljevu (Skejić i sur. 2017). Nakon Viličić i sur. 1997., *P. arcuatum* u jezeru Zmajevo oko se redovito bilježio (Marasović i Ninčević 1998; Barić i sur 2003; Burić i sur, 2009).

Zmajevo oko je specifično po izrazito niskoj raznolikosti gdje zajednicu fitoplanktona uglavnom čini 10ak vrsta, koje se pojavljuju s visokim abundancijama, te se njihova dominacija mijenja kroz godinu (Kršinić i sur. 2014). Visoka koncentracija organskog detritusa uzrokuje zamućenje ispod dubine od 5m te pod utjecajem takvih fizičkih ograničenja, malobrojne vrste koje mogu preživjeti u Zmajevu oku (Svensen i sur. 2008). Izrazito niska raznolikost, te visoke abundancije govore o velikoj kompeticiji i ekstremnim ekološkim uvjetima jezera. Za usporedbu, u istraživanju Bosak i sur. (2012) provedenom u Boki Kotorskoj zabilježeno je ukupno 104 taksona, dok je u istraživanju sjeveroistočnog Jadrana, provedenog od Marić i sur. (2012) zabilježeno više od 170 taksona. Vrijednosti ukupnog broja jedinki vrsta u jezeru poklapaju se s vrijednostima ukupnog broja jedinki u istraživanjima provedenim u ostalim obalnim regijama istočnog Jadranskog mora (Bosak i sur. 2009; Viličić i sur. 2009; Marić i sur. 2012). Iako pojedinačna mala vodena tijela imaju nižu prosječnu raznolikost od većih vodenih tijela, sadrže znatno više jedinstvenih i rijetkih vrsta od ostalih vodnih tijela te na regionalnoj razini najviše doprinose biološkoj raznolikosti, čineći područja velikog biološkog diverziteta (Williams i sur. 2004). U prilog tome idu populacije dijatomeja *Chaetoceros curvisetus, Thalassionema nitzschioides, Dactyliosolen fragilissimus* s abundancijama većim nego u okolnom moru (Burić i sur. 2009), te stalna pojavnost *Hermesinum adriaticum i P. arcuatum*.

Prateći literaturu i rezultate ovog rada možemo ustvrditi da je *P. arcuatum* stalni predstavnik fitoplanktona Zmajevog oka, te se može obilježiti kao jedna od dominantnih vrsta (visoka učestalost pojavljivanja 22,4% u istraživanom razdoblju od 1998. do 2021. godine). Njegova učestalost pojavljivanja i abundancija najveće su u toplijem dijelu godine i to u razdobljima od lipnja do rujna, što je potvrđeno i u ovom radu gdje se u multivarijantnoj analizi vidi njegovo preferiranje viših temperatura. Obzirom na specifičnost okoliša Zmajevog oka, stratifikacija koja povremeno nestaje i dolazi do holomiksije, te mijenjanje dubine kemokline i difundiranja

sumpornih spojeva u oksični sloj (Ciglenečki i sur. 2013.), možemo zaključiti da je maksimalno pojavljivanje *P. arcuatum* u sloju iznad kemokline rezultat njegove prilagođenosti na ekstremne uvjete. Možemo pretpostaviti da nije jaki kompetitor već da koristi specifičnu ekološku nišu. Najveća abundancija vrste zabilježena je u lipnju 2018. godine 90530 st. L^{-1}, dok su velike koncentracije izmjerene i u kolovozu 2010. i 2013. godine, travnju 2018. i srpnju 2020 godine, Usporedno, njegova maksimalna abundancija izmjerena u Medulinskom zaljevu u rujnu 2013. godine iznosi 13200 st. L^{-1} (Skejić i sur. 2017).

U istraživanom periodu od 1998. do 2021. godine pojave holomiksije u Zmajevom oku zabilježene su 1998., 1999., 2000., 2003., 2006., 2011., 2013., 2016. (Žiroš, 2020), 2020. te 2021. godine. Sva potpuna mješanja vodenog stupca dogodila su se u hladnijim mjesecima, odnosno krajem svake od navedenih godina (studeni, prosinac). U proljeće sloj vode na površini posljedično se zagrijava radi pojačanog sunčevog zračenja i kontakta s toplijom atmosferom te počinje ponovna stratifikacija jezera i formiranje kemokline. Usporedno s navedenim, pojavnost vrste *P. arcuatum* bilježimo u rano proljeće s povećanjem temperature vodenog stupca i smanjenom kompeticijom jer se fitoplanktonska zajednica tek počinje formirati. Kemoklina se stabilizira te *P. arcuatum* zauzima svoju specifičnu ekološku nišu u sloju iznad nje. Tijekom ljetne stratifikacije njegova je brojnost najveća. Kasnije tijekom godine, hlađenje na površini jezera uklanja zaštitnu toplinsku stratifikaciju te brojnost *P. arcuatum* bilježi pad do potpunog nestanka početkom jeseni.

Ukupno gledano, prosječna dužina stanice iznosi 52,9 ± 3,66 μm, a prosječna širina stanice iznosi je 24,4 ± 2,48 μm. Usporedno, prosječna dužina stanica izmjerenih u Medulinskom zaljevu iznosi 58,1 ± 7,10 μm, a prosječna širina stanica 30,1 ± 3,23 μm. Prema tome, stanice *P. arcuatum* iz Zmajevog oka manje su od onih u Medulinskom zaljevu, ali i onih koje navodi Wood (1963) za australske obalne vode. Veličinski više odgovaraju onim dužinama koje je objavio Dodge (1975) za Mediteran, a nešto veće od onih izmjerenih u sjevernom Arapskom moru (Munir i sur. 2013). Najveća prosječna dužina stanica izmjerena je za 24. ožujak 2020. i iznosi 58,23 ± 1,30 μm te su za taj datum zabilježena najmanja veličinska odstupanja unutar datuma uzorkovanja. Također, to je jedini datum među uzorkovanim koji

predstavlja stanje neposredno nakon holomiksije i početak je ponovnog uspostavljanja zajednice. Prema tome možemo zaključiti da je *P. arcuatum* pionirska vrsta u ponovnom uspostavljanju zajednice kada još uvijek zaostaju hipoksično-anoksični uvjeti u površinskom sloju. Ipak, zaključak treba uzeti s dozom rezerve jer je to datum s najmanjim brojem mjerenja (N=7). Najveća stanica izmjerena je za 19. travnja 2018. i iznosi 60,30 μm. Najmanja prosječna

dužina stanica izmjerena je za 8. lipnja 2020., dok je najmanja dužina stanice izmjerena za 28. srpnja 2020. Omjer dužine i širine stanica sukladan je sa Skejić i sur. 2017. te za sve datume omjer iznosi više od 2. Iako su stanice iz jezera Zmajevo oko nešto manjih dimenzija dužine i širine od onih iz Medulinskog zaljeva to nije jedina i najveća razlika među ovim morfotipovima. Različitost se posebno očituje u torziji stanice koja je znatno izraženija u stanicama iz Medulinskog zaljeva. Obziorm na promjene u morfometriji stanica u Zmajevom oku, gdje se tijekom istraživanog razdoblja također pojavljuju veće torzije stanica (Ljubešić, usmena komunikacija), moguće je da je razlog tome starost populacije. Naime, u jezeru nakon razdoblja holomiksije, kada ugine cijela fitoplanktonska zajednica, nakon ponovnog uspostavljanja stratifikacije dolazi do novog razvoja fitoplanktona. Možemo prtepostaviti da *P. arcuatum* ima sposobnost stvaranja trajnih stadija, te da kad se uspostave dovoljno dobri uvjeti da se razvija potpuno nova populacija. U korist te pretpostavke idu i ovdje prikazani podaci, gdje su stanice u ožujku 2020. (nakon holomiksije) bile izrazito pravilne. Također, očita je i velika razlika u dužini trna. Prosječna dužina trna gotovo je tri puta manja u stanicama iz Zmajevog oka. Čak i najveća vrijednost dužine trna 9,59 μm izmjerena za 19. travanj 2018. mnogo je manja od medulinskog prosjeka.

Best global test pokazuje temperaturu i salinitet kao najznačajnije čimbenike u utjecaju na morfometriju *P. arcuatum* u Zmajevom oku. U prilog tome idu i rezultati analize glavnih komponenti koji ukazuju na podjelu uzoraka po sezonama gdje se proljetni i ljetni uzorci razlikuju od onih jesenskih te se grupiraju zajedno i pozitivno koreliraju s temperaturom, dok oni jesenski pozitivno koreliraju s koncentracijom DOC. Prema Skejić i sur. (2017) ni prosječna dužina stanice ni ukupna dužina stanice nisu bile u značajnoj korelaciji s temperaturom, ali pozitivna korelacija za oba parametra zabilježena je za salinitet. Temperatura vodenog stupca u Zmajevom oku na dan najveće zabilježene brojnosti *P. arcuatum* iznosila je 21,4 °C, te salinitet 34,0 ‰, dok je na vrhuncu proliferacije *P. arcuatum* u Medulinskom zaljevu u rujnu 2013. godine temperatura vodenog stupca iznosila 20,4 °C a salinitet 37,7. Također, u Medulinskom zaljevu tijekom istraživanog razdoblja vodeni stupac je bio dobro oksigeniran, a u Zmajevom oku *P. arcuatum* kao i ostale skupine fitoplanktona pozitivno su korelirale s koncentracijom otopljenog kisika. U jezeru je izrazita vertikalna stratifikacija, te povećane koncentracije kisika ukazuju na pojačan razvoj fitoplanktona, koji je većinom u gornjem sloju vodenog stupca, te je izrazito zanimljivo najveće pojavljivanje *P. arcuatum* u sloju iznad kemokline. Razlog tome mogu biti veće stanice koje tonu, te se zadržavaju u sloju veće gustoće, ali sve ukazuje na njegovu sposobnost razvoja u specifičnim uvjetima s povećanom koncentracijim sulfida. Obzirom na trenutno zabilježen trend pada kisika u oceanima (Schmidko i sur. 2017),

poznavanje biologije vrsta koje su prilagođene na te uvjete je od iznmne važnosti. Prema Skejić i sur. (2017) nije bilo značajne korelacije između brojnosti *P. arcuatum* i koncentracije hranjivih tvari, dok je istraživanje Burić i sur. (2009) u Zmajevom oku pokazalo kako se vrsta *P. arcuatum* uspješno reproducira čak i u uvjetima kada je dostupnost nitrata u vodenom stupcu niska, ako su čimbenici poput temperature i saliniteta optimalni.

Najčešće vrste s kojima se *P. arcuatum* pojavljuje u zajednici jezera su *Ceratium furca*, *Cyclotella choctawhatcheeana*, *Cylindrothaeca closterium*, *Chaetoceros affinis, Chaetoceros curvisetus*, *Chaetoceros* spp., *Hermesinum adriaticum*, *Pseudo-nitzschia* spp., *Thalassionema nitzschioides* te u manjoj brojnosti *Diplopsalis* "complex" i *Goniaulax* sp. U Medulinskom zaljevu proliferacija *P. arcuatum* popraćena je velikom brojnošću vrsta *Cyclotella* sp. *Pseudo-nitzschia* spp. i *Thalassionema nitzschioides* ali i niskom brojnošću *Prorocentrum scutellum*, *Tripos* spp. i *Hermesinum adriaticum.*

Prema svemu navedenom, rijetke vrste mogu biti izrazito važan dio zajednice radi svoje uske ekološke valencije koja im omogućuje razvoj u specifičnim uvjetima, a idealan je primjer vrsta *P. arcuatum* u Zmajevu oku. Podaci obrađeni u ovom radu daju novi uvid u morfologiju, ekologiju i dinamiku pojavnosti vrste te naglašavaju potrebu za nastavkom kontinuiranog monitoringa rijetkih vrsta s krajnjim ciljem boljeg razumijevanja uloge rijetkih vrsta u funkcioniranju ekosustava.

6. Zaključak

1. Ukupan broj taksona zabilježen od 1998. – 2021. godine u jezeru Zmajevo oko je 47, a dominantne vrste u fitoplanktonskoj zajednici su *Chaetoceros curvisetus, Hermesinum adriaticum, Thalassionema nitzschioides, Dactyliosolen fragilissimus, Cyclotella choctawhatcheeana* i *Chaetoceros* spp.

2. Učestalost pojavljivanja vrste *Prorocentrum arcuatum* za analizirano razdoblje od 1998. do 2021. godine iznosi 22,4%. Njegova pojavnost i abundancija najveće su u toplijem dijelu godine i to u periodima od lipnja do rujna. Najčešće se pojavljuje na dubinama između 5 i 9 m, s maksimalnim abundancijama u zoni između 7 i 8 m dubine. Najveća abundancija vrste zabilježena je u lipnju 2018. godine.

3. Prosječna dužina izmjerenih stanica *P. arceuatum* iznosi 52,89 ± 3,66 μm, a vrijednost medijana iznosi 52,73 μm. Najduže izmjerene stanice su uzorkovane 24. ožujak 2021.

4. Najčešće vrste s kojima se *P. arcuatum* pojavljuje u zajednici jezera su *Ceratium furca, Cyclotella choctawhatcheeana, Cylindrothaeca closterium, Chaetoceros affinis, Chaetoceros curvisetus, Chaetoceros* spp., *Hermesinum adriaticum, Pseudonitzschia* spp., *Thalassionema nitzschioides* te u manjoj brojnosti *Diplopsalis* "complex" i *Goniaulax* sp.

5. Proljetni i ljetni uzorci pozitivno koreliraju s temperaturom, dok oni jesenski pozitivno koreliraju s koncentracijom DOC. Vrsta *P. arcuatum*, kao i ostale svojte fitoplanktona, dominirale su u proljeće i ljeto te su pozitivno korelirale s koncentracijom otopljenog kisika.

7. Literatura

Adl S.M., Simpson A.G., Lane C.E., Lukeš J., Basse D., Bowser S.S., Brown M., Burki F., Dunthorn, M., Hampl V., Heiss A., Hoppenrath M., Lara E., leGall L., Lynn D.H., McManus H., Mitchell E.A.D., Mozley-Stanridge S.E., Parfrey L.W., Pawlowski J., Rueckert S., Shadwick L., Schoch, C., Smirnov, A., Spiegel F.W. (2012): The revised classification of eukaryotes. Journal of eukaryotic microbiology **59**: 429–493.

An-Cheng Y., Xinghua W., Yajian Z., Hongwu L. (2018): A brief taxonomy of the genus Prorocentrum in the coastal areas along Sanya Bay, Hainan Island. Science Asia **44**: 241-246.

Andrei A.S., Robeson M.S., Baricz A., Coman C., Muntean V., Ionescu A. (2015): Contrasting taxonomic stratification of microbial communities in two hypersaline meromictic lakes. The ISME Journal **9**: 2642-2656.

Barić A., Grbec B, Kušpilić G., Marasović I., Ninčević Ž., Grubelić I. (2003): Mass mortality event in a small saline lake (Lake Rogoznica) caused by unusual holomictic conditions. Scientia Marina **67**: 129–141.

Basset A., Carrada G. C., Fedele M., Sabetta L. (2008): Equilibrium concept in phytoplankton communities. U: Fath. B.D. (ur.) Systems Ecology. Encyclopedia of Ecology. Elsevier, Oxford.

Baatar B., Chiang P.W., Rogozin D.Y., Wu Y.T., Tseng C.H., Yang C.Y. (2016.): Bacterial Communities of Three Saline Meromictic Lakes in Central Asia. PLoS ONE 11(3): e0150847.

Boehrer B., Schultze M. (2008): Stratification of lakes. Reviews of Geophysics **46**(2).

Bosak S., Šilović T., Ljubešić Z., Kušpilić G., Pestorić B., Krivokapić S., Viličić, D. (2012): Phytoplankton size structure and species composition as an indicator of trophic status in transitional ecosystems: the case study of a Mediterranean fjord-like karstic bay. Oceanologia **54**: 255-286.

Buljan M. (1956): Prvi nalazi sumporovodika (H_2S) u vodi Jadrana. Mornarički glasnik, (Split) **2**: 207–214.

Bura-Nakić E., Marguš M., Orlić S. (2012): Zmajevo oko-a unique example of anchialine system in the Adriatic coast (Croatia) during spring-summer stratification and autumn mixing period. Natura Croatica **21**: 17–20.

Burić Z., Caput Mihalić K., Cetinić I., Ciglenečki I., Carić M., Viličić D., Ćosović B. (2009): Occurrence of the rare microflagellates *Prorocentrum arcuatum* Issel and *Hermesinum adriaticum* Zacharias in the marine Lake Rogoznica (eastern Adriatic coast). Acta Adriatica **50**: 31–41.

Casamayor E.O., Schafer H., Baneras L., Pedros-Alio C., Muyzer, G. (2000): Identification of and spatio-temporal differences between microbial assemblages from two neighboring sulfurous lakes: Comparison by microscopy and denaturing gradient gel electrophoresis. Applied Environmental Microbiology **66**: 499-508.

Ciglenečki I., Carić M., Kršinić F. (2005): The extinction by sulphide-turnover and recovery of a naturally eutrophic, meromictic seawater lake. Journal of Marine Systems **56**(1): 29–44.

Ciglenečki I., Janeković I., Marguš M., Bura-Nakić E., Carić M., Ljubešić Z., Batistić M., Hrustić E., Dupčić I., Garić R. (2015): Impacts of extreme weather events on highly eutrophic marine ecosystem (Rogoznica Lake, Adriatic coast). Continental shelf research **108**: 144-155.

Ciglenečki I., Ljubešić Z., Janeković I., Batistić M. (2017): Rogoznica Lake, a Euxinic Marine Lake on the Adriatic Coast (Croatia) that Fluctuates Between Anoxic Holomictic and Meromictic Conditions. U: Ecology of Meromictic Lakes. Cham, Springer International Publishing, str. 125-154.

Ciglenečki I., Pichler S., Prohić E. (2006): Distribution of redox-sensitive elements in bottom waters, porewaters and sediments of Rogoznica Lake (Croatia) in both oxic and anoxic condition. Water Air Soil Pollution **6**: 537–545.

Cushman-Roisin B., Poulain P.M., Kourafalou V.H. (2001): Northern Adriatic Sea. U: Cushman-Roisin B., Gačić M., Poulain P.M., Artegiani A. (ur.) Physical Oceanography of the Adriatic Sea. Springer, Dordrecht, str. 143-165.

Ćosović B., Ciglenečki I., Viličić D., Ahel M. (2000): Distribution and Seasonal Variability of Organic Matter in a Small Eutrophicated Salt Lake. Estuarine Coastal and Shelf Science **51**(6): 705-715.

Čanković M. (2018): Molekularna karakterizacija prokariotskih zajednica u euksinom okolišu Rogozničkoga jezera. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu: Prirodno-matematički fakultet, Zagreb.

Čanković M., Petrić I., Ciglenečki I. (2015): Rogoznica Lake - An Extreme Environment Hostingspecific Sulfate-Reducing Bacterial Community. U: Rene E.R., Bhattarai S., Nancharaiah Y.V., Lens P.N.L. (ur.) Proceedings Of The 4th International Conference On Research Frontiers Inchalcogen Cycle Science & Technology. Delft, The Netherlands, str. 115-124.

Čanković M., Žučko J., Radić,I. D., Janeković I., Petrić I., Ciglenečki I., Collins G. (2019): Microbial diversity and long-term geochemical trends in the euxinic zone of a marine, meromictic lake. Systematic and applied microbiology **42**(6): 126016.

Dautović, J. (2019): Svojstva i dinamika promjena organske tvari u Jadranu. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu: Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb.

Dodge J.D. (1975): The Prorocentrales (Dinophyceae). II Revision of the taxonomy within the genus *Prorocentrum*. Botanical Journal of the Linnean Society **71**: 103-125.

Eppley R.W., Peterson B.J. (1979): Particular organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. Nature **282**: 677-680.

Fahey D.W., Doherty S.J., Hibbard K.A., Romanou A., Taylor P.C. (2017): Physical drivers of climate change. U: Ed: Wuebbles D.J, Fahey D.W., Hibbard K.A., Dokken D.J., Stewart B.C., Maycock T.K. (ur.) Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I., Washington DC, SAD, str. 73-113.

Felder D.L., Camp D.K. (2009): Gulf of Mexico origin, waters, and biota. Volume 1, Biodiversity. American Reference Books Annual, 1186.

Field C.B., Behrenfeld M.J., Randerson J.T., Falkowski P. (1998): Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. Science **281**: 237–240.

Gil-Rodríguez M.C., Haroun R., Ojeda Rodríguez A., Berecibar Zugasti E., Domínguez Santana P., Herrera Morán B. (2003): Proctoctista. U: Moro L., Martín J.L., Garrido M.J., Izquierdo I. (ur.) Lista de especies marinas de Canarias (algas, hongos, plantas y animales). Las Palmas, Consejería de Política Territorial y Medio Ambiente del Gobierno de Canarias, str. 5-30.

Gomez-Saez G. V., Dittmar T., Holtappels M., Pohlabeln A. M., Lichtschlag A. (2021): Sulfurization of dissolved organic matter in the anoxic water column of the Black Sea. Science Advances **7**(25): eabf6199.

Guiry M.D., Guiry G.M. (2013): AlgaeBase. World-wide electronic publication *Prorocentrum arcuatum* Issel,1928. National University of Ireland, Galway.

Gulati R.D., Zadereev E.S., Degermendzhi A.G. (2017): Ecology of Meromictic Lakes. Springer International Publishing, Switzerland.

Hansell D.A., Carlson C.A. (2015): DOM Sources, Sink, Reactivity and Budgets. U: Hansell, D.A., Carlson C.A (ur.) Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter (2. izdanje). Elsevier, London, str. 65-126.

Hasle G. R., Syvertsen E. E., Steidinger K. A., Tangen K., Tomas C.R. (1996): Identifying marine diatoms and dinoflagellates. Academic Press, San Diego.

Helz G.R., Bura-Nakić E., Mikac N. (2011): New model for molybdenum behavior in euxinicbasins. Chemical Geology **284**: 323–333.

Hernàndez-Becerril D.U., Cortés Altami-Rano R., Alonso R.R. (2000): The dinoflagellate genus Prorocentrum along the coasts of the Mexican Pacific. Hydrobiologia **418**: 11-121.

Ignatiades L., Gotsis-Sketes O. (2010): A Review of Toxic and Harmful Algae in Greek Coastal Waters (E. Mediterranean Sea). Toxins **2**: 1019–1037.

Issel, R. (1928): Addesanmento di microplancton atipico nelle aque del Dodescaneso. Archives de zoologie expérimentale et générale **12**: 273-292.

Izdar E., Murray J.W. (1991): Black Sea oceanography. NATO Advanced Science Institute Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 351. Kluwer, Dordrecht.

Kamyshny A., Zerkle Z.L., Mansaray Z.F. (2011): Biogeochemical Sulfur Cycling In The Watercolumn Of A Shallow Stratified Sea-Water Lake: Speciation And Quadruple Sulfur Isotope Composition. Marine Chemistry **127**: 144–154.

Kawasaki N., Benner R. (2006): Bacterial release of dissolved organic matter during cell growth and decline: molecular origin and composition. Limnology and oceanography **51**: 2170-2180.

Kirchman D.L., Meon B., Cottrell M.T., Hutchins D.A., Weeks D., Bruland K.W. (2000): Carbon versus iron limitation of bacterial growth in the California upwelling regime. Limnology and oceanography **45:** 1681-1688.

Krstulović N., Šolić M. (2001): Distribution of phototrophic sulfur bacteria throughout the time scale of the anoxic water renewal in the Rogoznicva Lake. Fresenius Environmental Bulletin **10**: 586-589.

Kršinić F., Carić M., Viličić D. (2000): The calanoid copepod *Acartia italica* Steuer, phenomenon in the small saline Lake Rogoznica (Eastern Adriatic coast). Journal of Plankton Reseach, **22**: 1441–1464.

Kršinić F., Ciglenečki I., Ljubešić Z., Viličić D. (2013): Population dynamics of the calanoid copepod *Acartia italica* Steurer in a small saline lake. Acta Adriatica **54**: 3-12.

Lakkis S. (2011): Le phytoplancton marin du Liban (Méditerranée orientale) biologie, biodiversité, biogéographie. Aracne, Roma.

Lee C. (1992): Controls on organic carbon preservarion: The use of stratified water bodies to compare intrinsic rates of decomosition in oxic and anoxic systems. Geochimica et Cosmochimica Acta **56**(8): 3323-3335.

Marasović I., Ninčević Ž. (1998): Subsurface bloom of the *Prorocentrum arcuatum* in the saline lake Rogoznica (Adriatic Sea). U: M. Smelror (ur.) Abstracts from the 6th International Conference on Modern and Fossil Dinoflagellates (Dino 6). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Marić Pfannkuchen D. (2012): Potencijalno toksične dijatomeje roda *Pseudo-nitzschia* u sjevernom Jadranu: ekološke, taksonomske i molekularne značajke. Doktorski rad. Sveučilište u Zagrebu: Prirodno-matematički fakultet, Zagreb.

Marguš M., Morales-Reyes I., Bura-Nakić E., Batina N., Ciglenečki I. (2015): The anoxic stress conditions explored at the nanoscale by atomic force microscopy in highly eutrophic and sulfidic marine lake. Continental Shelf Research **109**: 24-34.

Mihelčić G., Šurija B., Juračić M. (1996): History of the accumulation of trace metals insediments of the saline Rogoznica Lake (Croatia). Science of the Total Environment **182**: 105–115.

Mousing E.A., Jensen L. Ø., Richardson K. (2017): Using species distribution modelling to predict future distributions of phytoplankton: Case study using species important for the biological pump. Marine ecology **38**(3): e12427.

Munir S., Buhran Z., Naz T., Siddiqui P.J.A., Morton S.L. (2013): Morphotaxonomy and seasonal distribution of planktonic and benthic Prorocentrales in Karachi waters, Pakistan Northern Arabian Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology **31**: 267–281.

Odebrecht C. (2010): Dinophyceae. U: Forzza R.C. (ur.) Catálogo de plantas e fungos do Brasil, Rio de Janeiro, str. 366–383.

Pjevac P., Korlević M., Berg J.S., Bura-Nakić E., Ciglenečki I., Amann R., Orlić S. (2015): Community shift from phototrophic to chemotrophic sulfide oxidation following anoxic holomixis in a stratified seawater lake. Applied and Environmental Microbiology **81**: 298–308.

Raymond P.A., Spencer R.G.M. (2015): Riverine DOM. U: Hansell, D.A. i Carlson, C.A (ur.) Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter. Amsterdam, Elsevier, str. 509-533.

Repeta D.J. (2015): Chemical Characterization and Cycling of Dissolved Organic Matter. U: Hansell, D.A., Carlson, C.A. (ur.) Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter, 2. izdanje. London, Elsevier, str. 21-63.

Romero J.R., Melack J.M. (1996): Sensitivity of vertical mixing in a large saline lake to variations in runoff. Limnology and oceanography **41**: 955–965.

Sahraoui I., Bouchouicha D., Mabrouk H.H., Hlaili A.S. (2013): Driving factors of the potentially toxic and harmful species of Prorocentrum Ehrenberg in a semi-enclosed Mediterranean lagoon (Tunisia, SW Medi-terranean). Mediterranean Marine Science **14**: 353–362.

Schmidko S., Stramma L., Visbeck M. (2017): Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. Nature **542**: 335–339.

Sieburth J.M., Smetacek V., Lenz J. (1978): Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. Limnology and oceanography **23**: 1256-163.

Skejić S., Car A., Marasović I., Jozić S., Bužančić M., Arapov J., Ninčević Gladan Ž., Bakrač A., Kušpilić G., Vidjak O., Larsen J. (2017): Morphology and ecology of the poorly known dinoflagellate *Prorocentrum arcuatum* (Dinophyceae) from the Medulin Bay (eastern Adriatic Sea). Acta Adriatica **58**: 41-50.

Sournia A. (1986): Atlas du Phytoptancton Mann, Vol. I. Introduction, Cyanophycees, Dictyophycees, Dinophycees et Raphidophycees. Editions CNRS, Paris.

Spatharis S., Dolapsakis N.P., Economou Amilli A., Tsirtsis G., Danielidis D.B. (2009): Dynamics of potentially harmful microalgae in a confined Mediterranean Gulf-Assessing the risk of bloom formation. Harmful Algae **8**: 736–743.

Steidinger K.A., Tangen K. (1996): Dinoflagellates. U: Tomas C.R. (ur.) Identifying Marine Phytoplankton. San Diego, Academic Press, str. 387–584.

Stipaničev V., Branica M. (2006): The distributions of iodate and iodide in Rogoznica Lake (East Adriatic coast). Estuarine, Coastal and Shelf Science **66**: 55–66.

Tranvik L.J., Downing J.A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dillon P., Finlay K., Fortino K., Knoll L.B., Kortelainen P.L., Kutser T., Larsen S., Laurion I., Leech D.M., McCallister S.L., McKnight D.M., Melack J.M., Overholt E., Porter J.A., Prairie Y., Renwick W.H., Roland F., Sherman B.S., Schindler D.W., Sobek S., Tremblay A., Vanni M.J., Verschoor A.M., von Wachenfeldt E., Weyhenmeyer G.A. (2009): Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. Limnology and oceanography **54:** 2298-2314.

URL1: Slika 2. Građa dinoflagelata:
https://www.ucl.ac.uk/GeolSci/micropal/dinoflagellate.html (Datum pristupa: 2.9.2022.).
URL2: Tablica 1. Taksonomija vrste *Prorocentrum arcuatum*:
https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=110292#sources (Datum pristupa: 14.9.2022.).
URL3: https://www.algaebase.org/ (Datum pristupa: 14.9.2022.).

Viličić D. (2002): Fitoplankton Jadranskoga mora: biologija i taksonomija. Školska knjiga, Zagreb.

Viličić D., Marasović I., Kušpilić G. (1997): The heterotrophic ebridian microflagellate *Hermesinum adriaticum* Zach. in the Adriatic sea. Archiv für Protistenkunde **147**: 373-379.

Viličić D., Đakovac T., Ljubešić Z., Bosak S. (2009): Composition and annual cycle of phytoplankton assemblages in the northeastern Adriatic Sea. Botanica Marina **52**(4): 291-305.

Wada S., Aoki M.N., Tsuchiya Y., Sato T., Shinagawa H., Hama T. (2007): Quantitative and qualitative analyses of dissolved organic matter released from Ecklonia cava Kjellman, in Oura Bay,Shimoda, Izu Peninsula, Japan. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology **349**: 344-358.

Williams P., Whitfield M., Biggs J., Bray S., Fox G., Nicolet P., Sear D. (2004): Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England. Biological Conservation **115**: 329-341.

Wood E.J.F. (1963): Dinoflagellates in the Australian Region. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Technical Paper, No 14. Division of Fisheries and Oceanography, Australia, Melbourne, str. 509–516.

Žic V., Carić M, Ciglenečki I. (2013): The impact of natural water column mixing on inorganic iodine and nutrient speciation in a eutrophic anchialine pond (Rogoznica Lake, Croatia). Estuarine, Coastal and Shelf Science **133**: 260–272.

Žiroš A. (2020): Dinamika pojavljivanja rijetkih vrsta fitoplanktona u euksiničnom jezeru Zmajevo oko. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu: Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb.

8. Životopis

Rođen sam 6.4.1992. godine u Berlinu. Osnovnoškolsko obrazovanje stekao sam u II. O.Š. Bjelovar, a srednju školu u Općoj gimnaziji Čazma. 2015. godine upisujem Znanost o moru na Fakultetu prirodnih znanosti u Puli. Navedeni studij završavam 2019. s temom: „Analiza alometrije prirodnih populacija dagnje u Jadranu“ pod vodstvom dr. sc. Maje Fafanđel. Nakon završenog preddiplomskog studija upisujem diplomski studij Ekologije i zaštite prirode na Prirodoslovno – matematičkom fakultetu u Zagrebu. Tijekom studija sudjelovao sam na raznim edukativnim projektima poput Festivala znanosti i 1. međunarodne Green konferencije s temom: „Utjecaj kofeina na morske ekosustave.“