
Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar

Környezettudományi Doktori Iskola

Környezetbiológiai Program

Márton Zsuzsanna

Planktonikus mikroeukaróták és baktériumok időbeli változása a Kárpát-medence szikes tavaiban

-Doktori értekezés tézisei-

Témavezető:

Dr. Felföldi Tamás
egyetemi docens

Külső konzulens:

Dr. Szabó Attila
tudományos munkatárs

Doktori Iskola vezetője:

Dr. Turányi Tamás
egyetemi tanár

Programvezető:

Dr. Tóth Erika
egyetemi docens



ELTE TTK Biológiai Intézet, Mikrobiológiai Tanszék

Budapest

2023

1. Bevezetés

A szikes tavak az athalasszikus sós tavak egy speciális típusát képviselik, melyeket a karbonát (CO_3^{2-}), a hidrogénkarbonát (HCO_3^-), és a nátrium (Na^+) ion dominancia jellemez, emellett stabil lúgos pH-val rendelkeznek (Boros és mtsai., 2014; Felföldi, 2020). Világszerte megtalálhatóak, azonban ritkábbak, mint más természetes sós tavak (Sorokin és mtsai., 2014). Európában elsősorban a Kárpát-medencében (Ausztriában, Magyarországon és Szerbiában) fordulnak elő (Boros és mtsai., 2014). Ezen egyedülálló vízi ökoszisztémák fontos táplálkozó- és költőhelyként szolgálnak vízimadarak számára (Szabó és mtsai., 2022), valamint számos ritka és veszélyeztetett fajnak biztosítanak menedékhelyet (Horváth és mtsai., 2013). Egyediségük és különleges élőviláguk miatt jogi védelem alatt állnak, többségük nemzeti parkokban található (Boros és mtsai., 2017; 2013). Az emberi tevékenységek, mint például a rossz vízgazdálkodás és lecsapolások, számos a Kárpát-medencében található szikes tó, és ezzel együtt a bennük megtalálható fajok (Boros és mtsai., 2013; Felföldi, 2020; Horváth és mtsai., 2019) eltűnéséhez vezettek. Továbbá Boros és munkatársai (2020) utaltak rá, hogy a klímaváltozás erősödő hatásai, mint például a csökkenő csapadék és az emelkedő hőmérséklet miatt elhúzódó kiszáradások veszélyeztetik ezeket a meglehetősen sérülékeny ökoszisztémákat.

Léteznek korábbi tanulmányok, amelyek a kárpát-medencei szikes tavak planktonikus közösségének szezonális változásait vizsgálták, mint például 2013-2014 tavaszán Szabó és munkatársai (2020) szezonális változásokat figyeltek meg a prokarióta közösség összetételében. Pálffy és mtsai. (2014), illetve Somogyi és mtsai. (2009) megfigyelték, hogy nyáron főleg a pikocianobaktériumok uralják a vizet, míg $15\text{ }^\circ\text{C}$ alatt a pikoeukarióta algák képesek tömeges elszaporodásra. Néha zöldalgák és bíbor baktériumok kettős tömegprodukciónak is megfigyelték ezekben a sekély szikes tavakban (Korponai és mtsai., 2019). Azonban még mindig nagyon kevés adat áll rendelkezésünkre a mikroba közösségek szezonális mintázatáról, a környezeti változók szezonális kialakulásban játszott szerepéről, illetve arról, hogy a kiszáradások mennyire befolyásolják a planktonikus közösség összetételét.

Munkánk során célunk volt, hogy az eddigi szakirodalmi ismereteket bővítsük a planktonikus mikrobiális diverzitás különböző környezeti gradiensek mentén történő változását illetően, továbbá, hogy átfogó képet kapjunk a szikes tavak mikroeukarióta és prokarióta közösségeinek szerkezetéről és annak szezonálisáról.

2. Célkitűzések

Ezidáig egyetlen olyan átfogó tanulmány sem készült, amely a sekély szikes tavak planktonikus mikroeukarióta és prokarióta közösségére fókuszált volna, taxonómiai összetétel, mag mikrobiom (minden helyszínen jelenlévő taxonok), diverzitás változása környezeti gradiensek mentén és az ökológiai kölcsönhatásokat nézve. A szikes tavak azonban kiváló modell-rendszerként szolgálhatnak bonyolultabb vízi ökoszisztémák folyamatainak megértéséhez, hiszen a bennük élő közösségek gyorsan reagálnak a környezeti paraméterekben bekövetkező hirtelen változásokra.

Tanulmányunkban a planktonikus mikrobiális közösségeket vizsgáltuk időben (tavasszal, nyáron és ősszel kétheti mintavétellel) és térben (huszonhat szikes tavat két egymást követő tavaszi évszakban egy-egy mintavétellel).

Ennek megfelelően a doktori értekezésem fő kérdései a következők voltak a két projektben:

A. Mikroeuکاریóta és bakteriális közösségek szezonális változása

I.) Mennyire hasonlóak a planktonikus mikroeuکاریóta és prokarióta közösségek szezonális változásai egymáshoz térben közel elhelyezkedő szikes tavakban?

II.) Hogyan járulnak hozzá a mag és nem-mag mikrobiális taxonok a mikrobiális közösségek alkalmazkodásához, és hogyan különbözik ez a mikroeuکاریóta és a bakteriális közösségek esetében?

B. Mikrobiális diverzitás időbeli változása környezeti gradiensek mentén

III.) Változik-e a fő közösség-alakító környezeti tényezők identitása és erőssége két egymást követő évben?

3. Anyag és módszer

3.1. Mikroeuکاریóta és bakteriális közösségek szezonális változása

- Öt kiskunsági szikes tó mintavételezése április 12. és november 14. között két heti rendszerességgel, három évszakon át: tavasz (1-4 mintavétel), nyár (5-10 mintavétel) és ősz (11-14 mintavétel).
- Környezeti változók meghatározása (vízhőmérséklet, pH, fajlagos elektromos vezetőképesség, oldott oxigén, összes nitrogén, összes foszfor, összes szuszpendált szilárd anyag, klorofill-a, oldott szerves szén) helyszínen és laboratóriumi mérésekkel.
- Domináns zooplankton fajok meghatározása mikroszkópos eljárásokkal.
- Bakteriális sejtszám meghatározása fluoreszcens mikroszkóppal.
- Vízminták szűrése, DNS izolálás, 18S és 16S rRNS gén felszaporítása PCR alkalmazásával.
- A mikroeuکاریóta és baktérium közösségek meghatározása Illumina amplicon szekvenálással.
- A szekvenciák bioinformatikai elemzése mothur programmal.
- Adatok statisztikai elemzése R program segítségével.
- Kapcsolati hálózatok létrehozása a „kiterjesztett lokális hasonlóság analízis” (extended local similarity analysis, eLSA) eszköz segítségével.
- Kapcsolati hálózatok vizualizálása a Cytoscape programmal.
- Kulcs OTU-k azonosítása a súlyozott topológiai fontosságuk alapján (WI index).

3.2. Mikrobiális diverzitás időbeli változása környezeti gradiensek mentén

- A Seewinkel régió huszonhat szikes tavának mintavételezése két jelentősen eltérő tavaszi évszakban, 2017 (száraz), 2018 (nedves).

- Környezeti változók meghatározása (vízmélység, Secchi mélység, pH, fajlagos elektromos vezetőképesség, összes nitrogén, összes foszfor, összes szuszpendált szilárd anyag) helyszínen és laboratóriumi mérésekkel.
- Vízminták szűrése, DNS izolálás, 18S és 16S rRNS gén felszaporítása PCR-rel.
- A mikroeukarióta és baktérium közösségek meghatározása Illumina amplitikon szekvenálással.
- A szekvenciák bioinformatikai elemzése mothur programmal.
- Hat nagy csoport létrehozása: csillósok, gombák, eukarióta fitoplankton, heterotróf flagelláták és nanoflagelláták, cianobaktériumok és baktériumok (nem cianobaktériumok).
- Adatok statisztikai elemzése R program segítségével.

4. Eredmények és értékelésük

4.1. Mikroeukarióta és bakteriális közösségek szezonális változása

A szezonális minden tó esetében jelentős hatást gyakorolt a mikroeukarióta és baktérium közösségekre egyaránt. Számos megegyező szezonális dinamikát figyeltünk meg a mikrobiális szukcesszióban, többek között a tavaszi és őszi közösségek hasonlóságát. A mintavételi időszakban alkalmanként kiszáradások fordultak elő, a Kelemen-szék esetében öt mintavételi alkalommal, ami összesen három különálló kiszáradási időszakot jelentett, míg a Zab-széken két különálló kiszáradási esemény történt. Kutatásunk során minden kiszáradás feltöltődéssel zárult. A kiszáradás és a feltöltődés az élőhely víz-, só- és tápanyagtartalmának drasztikus változásai következtében jelentős mértékű fizikai és kémiai stresszt gyakorol a mikroorganizmusokra (Schimel, 2018). Eredményeink alapján a mikroeukarióta közösség érzékenyebb volt ezen változásokra, szemben a baktérium közösséggel, amely stabilabb maradt.

A közösség összetételének Bray-Curtis távolsága a mintavételi időpontok között átlagosan nagyobb volt a mikroeukarióták esetében. Ez alapján feltételezhetjük, hogy a szikes tavak baktérium közössége képes ellenállni a környezeti feltételek hirtelen változásainak. A „magközösségek” (core communities) nagyobb szezonális variációt magyaráztak, mint a „nem magközösségek” (noncore communities), ami alátámasztotta a hipotézisünket, miszerint a szezonális alkalmazkodás elsősorban a magközösségből származó fajok toborzásán keresztül történik.

Az öt általunk vizsgált szikes tó a tavaszi időszakban hasonló környezeti változókkal volt jellemezhető, noha a közösség szerkezete és a kölcsönhatások alapján ez az időszak különbözött a legjobban a nyártól és őszől. A tavaszt a pozitív kulcs OTU-k (főleg pozitív asszociációk kötik össze másokkal) jellemezték. Az ebben az évszakban abundáns pozitív kulcs OTU-k a flagellátákhoz, mint pl. a Colpodellida (Mylnikov, 2009) vagy parazita taxonokhoz, mint pl. a Cryptomycotina (Letcher és mtsai., 2017) és a Perkinsozoa tartoztak (Mangot és mtsai., 2011). A pozitív aktinobakteriális kulcs OTU-k olyan leszármazási vonalokhoz tartoztak, mint a

Luna1-A és az acIV-C, amelyeket különböző vízi élőhelyeken, többek között a szikes tavakból is azonosítottak (Ghai és mtsai., 2012; Newton és mtsai., 2011; Szabó és mtsai., 2020).

A tavaszi hasonló tulajdonságokat követően a mikrobiális közösségek „fajkicserélődése” (turnover) még a turbid szikes tavakban is emelkedni kezdett, amit a nyári felmelegedő hőmérséklet és az élőhely méretének zsugorodása okozott. Ez összhangban volt korábbi kutatásokkal, amelyek szerint az élőhely méretének csökkenése módosítja a közösségek összetételét és csökkenti azok stabilitását (Bier és mtsai., 2022). A kiszáradási időszakokat helyi stresszornak tekintettük, mivel bár a kiszáradás gyakori jelenség a régió szikes tavaiban, nem minden szikes tó szárad ki éves rendszerességgel, illetve más-más szikes tavak száradnak ki a különböző években. A mikroeukarióta közösségek fajkicserélődésének mértéke meglehetősen egyenletesen nőtt a turbid tavakban, illetve minden egyes kiszáradási és feltöltődési ciklusban nagymértékben emelkedett, ami a helyi stresszorokkal szembeni korlátozott ellenállóképességre utalt. Ez megmutatkozott a „nem-mag4” (non-core4) megnövekedett relatív abundanciájában is a kiszáradási események után, ami alátámasztja azt a hipotézist, hogy a nem-mag OTU-k a hirtelen környezeti eseményekre adott válaszban játszanak jelentősebb szerepet.

Mindegyik kapcsolati hálózat több pozitív asszociációval rendelkezett, mint negatívval, ami a pozitív interakciók dominanciájára utalt a közösségben. Korábbi kutatások alapján a pozitív korrelációk gyakoribbak a magasabb abiotikus stresszellel rendelkező élőhelyeken. A mutualista kölcsönhatások nagyobb számából kifolyólag feltételezhető, hogy a taxonok zordabb környezetben is képesek túlélni (Hernandez és mtsai., 2021; Travis és mtsai., 2005). Azonban a pozitív társulások (mutualizmusok) dominanciája csökkenti a kapcsolati hálózatok stabilitását, különösen az alacsony modularitású hálózatok esetében (Hernandez és mtsai., 2021). A hálózati topológia alapján egyértelmű különbségeket figyeltünk meg a színes Sós-ér, a két időnként kiszáradó zavaros tó (Kelemen-szék és Zab-szék), valamint a két nem kiszáradó zavaros tó (Böddi-szék és Pan no. 60) között. A szikes tavak kapcsolati hálózata tükrözte az alacsony közösségi stabilitást, amelyet a hirtelen környezeti változások (kiszáradás) és a cianobaktérium tömegtermelések tovább súlyosbítottak.

Összefoglalva, eredményeink alapján, a vizsgált szikes tavakat a drasztikus környezeti változások és az ezt követő közösség összetételbeli eltolódások ellenére főként egy közös mag mikrobiom népesíti be. Az azonos éghajlati és meteorológiai viszonyok miatt hasonló szezonális dinamikát figyeltünk meg a közösségekben. Noha a közös mag mikrobiom taxonszegényebb a különböző élőhely altípusokba (színes vagy zavaros) tartozó szikes tavak között. A közös szezonális tendenciákat helyi stresszorok, például a kiszáradás és feltöltődés módosították. Az egységes szezonális változásokhoz való alkalmazkodás a magközösségből történő faj toborzásból történik, míg a mikroeukarióták esetében a mikrobiom nem-mag tagjai vettek részt a hirtelen környezeti változásokra adott válaszban. A baktériumközösségek azonban ellenálltak a sztochasztikus eseményeknek, a helyi stresszorokhoz a magközösségből történő fajválogatással és kompetitív kizárással alkalmazkodtak.

4.2. Mikrobiális diverzitás időbeli változása környezeti gradiensek mentén

A 2017-es száraz tavasz a nyári referencia adatokhoz hasonlóbb környezeti változókkal rendelkezett, míg a 2018-as nedves tavasz inkább az egy évtizeddel ezelőtti referencia tavaszhoz volt hasonlóbb, ami a vízi környezetekben történő szezonális eltolódását jelezte. Eredményeink alapján a vezetőképesség volt a mikrobiális diverzitást leginkább befolyásoló környezeti változó. Noha az általunk vizsgált tavakban a sótartalom gradiens viszonylag szűk volt (0,6 – 11 mS/cm vezetőképesség, ami 0,4-8,8 g/L sótartalomnak felel meg a konverziós faktor alapján (Boros és mtsai., 2014)). Korábbi kutatások utaltak rá, hogy a sós tavak közösségeiben jelentős változások következnek be alacsonyabb sótartalom mellett, különösen a 3-10 g/L tartományban (Hammer, 1990; Schallenberg és mtsai., 2003; William, 1987). Egy korábbi összefoglaló cikk mikroszkópos adatok alapján azt találta, hogy az eukarióta fitoplankton fajszáma ritkán haladja meg a 10-et szikes tavakban (Padisák és Naselli-Flores, 2021). Ezzel szemben, tanulmányunk során a fitoplankton OTU-gazdagsága átlagosan 47 volt 2017-ben és 49 2018-ban, és 16 (Runde Lacke, 2017) és 105 (Obere Höllacke, 2017) közötti tartományban mozgott. Tehát ezeken az élőhelyeken a korábban feltételezettnél sokkal nagyobb a fitoplankton diverzitás, ami összhangban van a magyarországi és ausztriai szikes tavak pikocianobaktérium diverzitásáról szóló molekuláris eredményekkel (Felföldi és mtsai., 2009; Somogyi és mtsai., 2022). Kizárólag 2018-ban a fitoplankton esetében figyeltünk meg U-alakú mintázatot a filogenetikai diverzitásban a sótartalom gradiens mentén. A legalacsonyabb diverzitást közepes sótartalomnál (2,9 g/L) figyeltük meg, amelyen felől a diverzitás ismét nőtt. Hasonló U-alakú mintázatot a fitoplankton fajgazdagság és a sótartalom gradiens között már figyeltek meg korábban is, brakk víztől egészen a tengerig (Olli és mtsai., 2019; 2022). A szikes tavak esetében a filogenetikai diverzitás növekedését nem kísérte az OTU-gazdagság párhuzamos emelkedése, vagyis a mintázat valószínűleg a közeli rokonságban lévő taxonok eltűnésének, mintsem a sótoleráns fajok megjelenésének köszönhető.

Tanulmányunk során a HF-HNF fajszáma és filogenetikai diverzitása exponenciálisan nőtt a sótartalommal, amely mintázatot korábban más sós élőhelyekről nem írták le. Korábbi kutatások eredményei alapján, a heterotróf flagelláták diverzitását elsősorban a sótartalom és a hőmérséklet befolyásolja (Azovsky és mtsai., 2016; Je Lee és mtsai., 1998), illetve diverzitásuk a „kritikus sótartalom szabályát” követi, tehát a fajgazdagság minimuma brakk vizekben található (~5-8 g/L sótartalom (Tikhonenkov és mtsai., 2006)).

Összefoglalva, a környezeti változók erősebb hatást gyakoroltak a közösség összetételére a száraz tavaszi időszakban. A vezetőképesség, TSS és a TP voltak a legfontosabb környezeti változók, amelyek befolyásolták mind a hat nagy mikroba csoport diverzitását és közösség összetételét. A prokarióták (baktériumok és cianobaktériumok) környezeti gradiensekre adott válasza különbözött a mikroeukarióta csoportokétól.

5. Az értekezés tézisei

I.) Mennyire hasonlóak a planktonikus mikroeukarióta és prokarióta közösségek szezonális változásai egymáshoz közeli szikes tavakban?

A planktonikus mikrobiális közösségek tavasztól őszi tartó hasonlóságait helyi hatások (mint például az időnkénti kiszáradások) megváltoztatják, ami a taxonok dominanciájának és kapcsolatainak eltolódása révén befolyásolja a közösség összetételét és szerkezetét. Az év elején (tavasszal) a közösségek hasonlóak, majd a helyi hatások egyre meghatározóbb szerepe miatt kifejezetten különbözővé válnak (nyáron és ősszel).

II.) Hogyan járulnak hozzá a mag és nem-mag mikrobiális taxonok a mikrobiális közösségek alkalmazkodásához, és hogyan különbözik ez a hozzájárulás a mikroeukarióta és a bakteriális közösségek esetében?

A mikroeukarióta és a baktérium közösség szezonális változásokhoz történő adaptációja különbözött. A mikroeukarióta közösségek esetében a mikrobiom nem-mag tagjai vettek részt a hirtelen környezeti eseményekre adott válaszban. Ezzel szemben a baktériumközösségek a mag közösségből történő fajválogatással alkalmazkodtak a szélsőséges körülményekhez.

III.) Változik-e a fő környezeti tényezők identitása és erőssége két egymást követő évben?

A környezeti változók erősebb hatást gyakoroltak a száraz tavasz mikrobiális közösségére, mint a nedves tavaszéra. A fő környezeti változók azonosak maradtak a két év tavaszán, és a vezetőképesség volt a legmeghatározóbb mind a két év során.

6. Irodalomjegyzék

- Azovsky, A.I., Tikhonenkov, D.V., Mazei, Y.A., 2016. An Estimation of the Global Diversity and Distribution of the Smallest Eukaryotes: Biogeography of Marine Benthic Heterotrophic Flagellates. *Protist* 167, 411–424. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2016.07.001>
- Bier, R.L., Vass, M., Székely, A.J., Langenheder, S., 2022. Ecosystem size-induced environmental fluctuations affect the temporal dynamics of community assembly mechanisms. *ISME J.* 16, 2635–2643. <https://doi.org/10.1038/s41396-022-01286-9>
- Boros, E., Ecsedi, Z., Oláh, J., Szegedi, R., Dunn, J., 2013. Ecology and management of soda pans in the Carpathian Basin [WWW Document]. Hortobágy Environ. Assoc. URL <https://mmebolt.hu/ecology-and-management-of-soda-pans-in-the-carpathian-basin-8207> (accessed 11.30.22).
- Boros, E., Horváth, Z., Wolfram, G., Vörös, L., 2014. Salinity and ionic composition of the shallow astatic soda pans in the Carpathian Basin. *Ann. Limnol.* 50, 59–69. <https://doi.org/10.1051/limn/2013068>

- Boros, E., V.-Balogh, K., Vörös, L., Horváth, Z., 2017. Multiple extreme environmental conditions of intermittent soda pans in the Carpathian Basin (Central Europe). *Limnologica* 62, 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.10.003>
- Felföldi, T., 2020. Microbial communities of soda lakes and pans in the Carpathian Basin: a review. *Biol. Futura* 71, 393–404. <https://doi.org/10.1007/s42977-020-00034-4>
- Felföldi, T., Somogyi, B., Márialigeti, K., Vörös, L., 2009. Characterization of photoautotrophic picoplankton assemblages in turbid, alkaline lakes of the Carpathian Basin (Central Europe). *J. Limnol.* 68, 385. <https://doi.org/10.4081/jlimnol.2009.385>
- Ghai, R., Hernandez, C.M., Picazo, A., Mizuno, C.M., Ininbergs, K., Díez, B., Valas, R., Dupont, C.L., McMahon, K.D., Camacho, A., Rodriguez-Valera, F., 2012. Metagenomes of mediterranean coastal lagoons. *Sci. Rep.* 2. <https://doi.org/10.1038/srep00490>
- Hammer, U.T., 1990. The effects of climate change on the salinity, water levels and biota of Canadian prairie saline lakes. *SIL Proc.* 1922-2010 24, 321–326. <https://doi.org/10.1080/03680770.1989.11898751>
- Hernandez, D.J., David, A.S., Menges, E.S., Searcy, C.A., Afkhami, M.E., 2021. Environmental stress destabilizes microbial networks. *ISME J.* 15, 1722–1734. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00882-x>
- Horváth, Z., Ptacnik, R., Vad, C.F., Chase, J.M., 2019. Habitat loss over six decades accelerates regional and local biodiversity loss via changing landscape connectance. *Ecol. Lett.* 22, 1019–1027. <https://doi.org/10.1111/ele.13260>
- Je Lee, W., Patterson, D.J., 1998. Diversity and Geographic Distribution of Free-Living Heterotrophic Flagellates – Analysis by PRIMER. *Protist* 149, 229–244. [https://doi.org/10.1016/S1434-4610\(98\)70031-8](https://doi.org/10.1016/S1434-4610(98)70031-8)
- Letcher, Peter M, Longcore, J.E., James, T.Y., Leite, D.S., Simmons, D.R., Powell, M.J., Letcher, P M, 2017. Morphology, Ultrastructure, and Molecular Phylogeny of *Rozella* multimorpha, a New Species in Cryptomycota. <https://doi.org/10.1111/jeu.12452-4996>
- Mangot, J.F., Debroas, D., Domaizon, I., 2011. Perkinsozoa, a well-known marine protozoan flagellate parasite group, newly identified in lacustrine systems: A review. *Hydrobiologia* 659, 37–48. <https://doi.org/10.1007/s10750-010-0268-x>
- Mylnikov, A.P., 2009. Ultrastructure and phylogeny of colpodellids (Colpodellida, Alveolata). *Biol. Bull.* 36, 582–590. <https://doi.org/10.1134/S1062359009060065>
- Newton, R.J., Jones, S.E., Eiler, A., McMahon, K.D., Bertilsson, S., 2011. A Guide to the Natural History of Freshwater Lake Bacteria. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* <https://doi.org/10.1128/membr.00028-10>
- Olli, K., Ptacnik, R., Klais, R., Tamminen, T., 2019. Phytoplankton Species Richness along Coastal and Estuarine Salinity Continua. *Am. Nat.* 194, E41–E51. <https://doi.org/10.1086/703657>
- Olli, K., Tamminen, T., Ptacnik, R., 2022. Predictable shifts in diversity and ecosystem function in phytoplankton communities along coastal salinity continua. *Limnol. Oceanogr. Lett.* 10.10242. <https://doi.org/10.1002/lo2.10242>

- Padisák, J., Naselli-Flores, L., 2021. Phytoplankton in extreme environments: importance and consequences of habitat permanency. *Hydrobiologia* 848, 157–176. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04353-4>
- Pálffy, K., Felföldi, T., Mentés, A., Horváth, H., Márialigeti, K., Boros, E., Vörös, L., Somogyi, B., 2014. Unique picoeukaryotic algal community under multiple environmental stress conditions in a shallow, alkaline pan. *Extremophiles* 18, 111–119. <https://doi.org/10.1007/s00792-013-0602-0>
- Schallenberg, M., Hall, C., Burns, C., 2003. Consequences of climate-induced salinity increases on zooplankton abundance and diversity in coastal lakes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 251, 181–189. <https://doi.org/10.3354/meps251181>
- Schimel, J.P., 2018. Life in Dry Soils: Effects of Drought on Soil Microbial Communities and Processes. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* Annu Rev Ecol Evol Syst 12, 409–432. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617>
- Somogyi, B., Felföldi, T., Boros, E., Szabó, A., Vörös, L., 2022. Where the Little Ones Play the Main Role—Picophytoplankton Predominance in the Soda and Hypersaline Lakes of the Carpathian Basin. *Microorganisms* 10, 818. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040818>
- Somogyi, B., Felföldi, T., Vanyovszki, J., Ágyi, Á., Márialigeti, K., Vörös, L., 2009. Winter bloom of picoeukaryotes in Hungarian shallow turbid soda pans and the role of light and temperature. *Aquat. Ecol.* 43, 735–744. <https://doi.org/10.1007/s10452-009-9269-0>
- Sorokin, D.Y., Berben, T., Melton, E.D., Overmars, L., Vavourakis, C.D., Muyzer, G., 2014. Microbial diversity and biogeochemical cycling in soda lakes. *Extremophiles* 18, 791–809. <https://doi.org/10.1007/s00792-014-0670-9>
- Szabó, A., Korponai, K., Somogyi, B., Vajna, B., Vörös, L., Horváth, Z., Boros, E., Szabó-Tugyi, N., Márialigeti, K., Felföldi, T., 2020. Grazing pressure-induced shift in planktonic bacterial communities with the dominance of acIII-A1 actinobacterial lineage in soda pans. *Sci. Rep.* 10, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76822-8>
- Szabó, B., Szabó, A., Vad, C.F., Boros, E., Lukić, D., Ptacnik, R., Márton, Z., Horváth, Z., 2022. Microbial stowaways: Waterbirds as dispersal vectors of aquatic pro- and microeukaryotic communities. *J. Biogeogr.* 49, 1286–1298. <https://doi.org/10.1111/jbi.14381>
- Tikhonenkov, D.V., Mazei, Y.A., Mylnikov, A.P., 2006. Species diversity of heterotrophic flagellates in White Sea littoral sites. *Eur. J. Protistol.* 42, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2006.05.001>
- Travis, J.M.J., Brooker, R.W., Dytham, C., 2005. The interplay of positive and negative species interactions across an environmental gradient: Insights from an individual-based simulation model. *Biol. Lett.* 1, 5–8. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2004.0236>
- Williams, D.D., 1987. *The Ecology of Temporary Waters*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6084-1>

7. A doktori értekezés témájában megjelent publikációk

Zsuzsanna Márton, Bianka Csitári, Tamás Felföldi, Ferenc Jordán, András Hidas, Attila Szabó, Anna J Székely. (2023) Contrasting Response of Micoeukaryotic and Bacterial Communities to the Interplay of Seasonality and Stochastic Events in Shallow Soda Lakes. - FEMS Microbiology Ecology, Közlésre elfogadva

Zsuzsanna Márton, Beáta Szabó, Csaba F. Vad, Károly Pálffy, Zsófia Horváth. (2023) Environmental changes associated with drying climate are expected to affect functional groups of pro- and microueukaryotes differently in temporary saline waters. - Scientific Reports, 13:3243, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30385-6>

Beáta Szabó, Attila Szabó, Csaba F Vad, Emil Boros, Dunja Lukić, Robert Ptacnik, **Zsuzsanna Márton**, Zsófia Horváth. (2022) Microbial stowaways: Waterbirds as dispersal vectors of aquatic pro-and microeukaryotic communities. - Journal of Biogeography, 49:1286-1298, <https://doi.org/10.1111/jbi.14381>

8. Egyéb publikációk

Kristóf Korponai, Sára Szuróczki, **Zsuzsanna Márton**, Attila Szabó, Paula V. Morais, Diogo Neves Proença, Erika Tóth, Emil Boros, Károly Márialigeti, Tamas Felfoldi. (2023) Habitat distribution of the *Belliella* genus in continental waters and the description of *Belliella alkalica* sp. nov., *Belliella calami* sp. nov. and *Belliella filtrata* sp. nov. - International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 73., <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005928>

Barna Putnoky-Csicsó, Szende Tonk, Attila Szabó, **Zsuzsanna Márton**, Franciska Tóthné Bogdányi, Ferenc Tóth, Éva Abod, János Bálint, Adalbert Balog. (2020) Effectiveness of the Entomopathogenic Fungal Species *Metarhizium anisopliae* Strain NCAIM 362 Treatments against Soil Inhabiting *Melolontha melolontha* Larvae in Sweet Potato (*Ipomoea batatas* L.) - Journal of Fungi, 6:116, <https://doi.org/10.3390/jof6030116>.

Tamás Felföldi, **Zsuzsanna Márton**, Attila Szabó, Anikó Mentés, Károly Bóka, Károly Márialigeti, István Máthé, Mihály Koncz, Peter Schumann, Erika Tóth. (2019) *Siculibacillus lacustris* gen. nov., sp. nov., a new rosette-forming bacterium isolated from a freshwater crater lake (Lake St. Ana, Romania). - International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 69: 1731-1736, <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.003385>