

A turbulencia hatása a balatoni zooplankton szerkezetére és funkciójára

A T-049365 nyilvántartási számú OTKA téma részletes szakmai zárójelentése

Készítette Dr. G.-Tóth László vezető kutató, tudományos tanácsadó
MTA Balatoni Limnológiai Kutatóintézet, Tihany
2009. február 28.

Bevezetés és célkitűzés

A felszíni állóvizek turbulenciáját a szélerősség, mint energia beviteli forrás, és az ennek hatására a víztestben ébredő turbulens kinetikai energia disszipálódásának rátája szabja meg. Az utóbbi pedig víz kinematikai viszkozitása mellett elsősorban a rendelkezésre tér nagyságától azaz, a vízmélységtől függ. A mérsékelt turbulencia hasznos a zooplankton számára, mert stimulálja azok úszását, növeli a ragadozó fajok találkozási esélyét a prédával, és frissíti a szűrve-ülepítve táplálkozó fajok egyedeinek közvetlen környezetében a lebegősodródó algák és baktériumok mennyiségét. Kimutatták például, hogy emiatt néhány tengeri Copepoda nauplius lárvájának fejlődési ideje másfél-kétszer rövidebb mérsékelt turbulens, mint pangó vízben (pl. Saiz and Alcaraz 1991, Wisser and Stips 2002, Wisser et al. 2009). Az erősebb turbulencia azonban már zavarja a ragadozó fajok távérzékelését, növeli az üldözési távolságot és csökkenti a préda elkapásának esélyét. A szűrve és ülepítve táplálkozóknál pedig a turbulens örvények interferálnak a végtagok és kerékszerveik által keltett táplálékgyűjtő örvényekkel (Rotschild and Osborn 1988, Alcaraz et al. 1994, Kiørboe and Saiz 1995, Wisser and Stips 2002, Wisser et al. 2009). A turbulencia intenzitás egy kritikusan magas értéke felett pedig, amikor a Kolmogorov-távolság, azaz, a legkisebb turbulens örvények átmérője már megközelíti a plankton szervezetek méretét, a nyíróerők fizikailag is roncsolják az érzékenyebb plankton szervezeteket (Reynolds 1992a,b, O'Brien et al. 2004).

A Balaton nagy felületű, ezért a balatoni szél, amelynek éves átlagos sebessége $3,2 \text{ m sec}^{-1}$, sok energiát ad át a víztömegnek. A kinetikai energia disszipálódásának tere azonban a sekély Balatonban mindössze 2.3 – 4.6 m, ezért a tó víztömege általában erősen turbulens. A vízszint csökkenésekor pedig az energia disszipálódás még intenzívebb turbulenciával jár együtt. 2000 és 2003 években, a tartós aszály miatt a Balaton vízszintje a kívánatos 70 – 110 cm-ről 22 cm-re apadt, és a tó elvesztette víztömegének 28 %-át. Ezzel párhuzamosan számos zooplankton faj sűrűségének nagyfokú csökkenését figyeltük meg, holott táplálék ellátottságuk nem változott. A felkevert üledéktől gyakran zavaros Balatonban a szűrő Daphnia-félék „ballasztevést” már korábban kimutattuk, amikor az állatok automatikusan nagy mennyiségű emészthetetlen ásványi lebegőanyagot kebeleznek be, és ezáltal effektív táplálék felvételük csökken és éheznek (pl. G.-Tóth 1992). Most azonban felmerült, hogy számos faj egyedeinek pusztulását, és populációik gyérülését közvetlenül a vízszint csökkenésekor tovább turbulencia okozta. A Balaton turbulenciájáról, annak általános összefüggéséről a szélesebbességgel és a vízszinttel azonban csak néhány becslés állt rendelkezésre. A több évtizedes balatoni zooplankton adatsorokkal párhuzamba állítható turbulencia adatsorok pedig egyáltalán nem léteztek. Ezért azt a célt tűztük ki, hogy (i) meghatározzuk a turbulencia erősségét különböző időjárási körülmények és vízállások mellett a Balaton számos helyén, és ennek alapján visszamenőleg rekonstruáljuk a tó turbulenciáját a vízszint drámai csökkenésének éveire, (ii) összefüggéseket keresünk a vízszint, a turbulencia, és a zooplankton vertikális szerkezetének és mennyiségének együttes alakulásában, (iii) laboratóriumban, a Balaton turbulencia viszonyait szimulálva, bő táplálék és minimális

ásványi lebegőanyag tatalom mellett, kísérletesen bizonyítjuk az erős turbulencia közvetlen negatív hatását az egyes zooplankton csoportokra. Munkánkkal a Balatonon kívül más sekély tavakra általánosítható következtetéseket is reméltünk.

Anyag és módszer

A balatoni zooplankton rövid- és hosszú távú monitorozása, vertikális vándorlásának tanulmányozása, a tó turbulenciájának vizsgálata

A tó hossz tengelye menti zooplankton mintavételek a hosszú távú balatoni zooplankton monitoring részeként folytak, 1999 és 2008 között áprilistól novemberig általában kéthetente, a tó öt szektorában, melyek átlagos mélysége 75 cm vízszintnél nyugatról keletre 2,3 (Kesztyel), 2,9 (Szigliget), 3,2 (Zánka), 3,7 (Tihany) és 3,9 m (Siófok) volt. Tihanynál 2006 – 2007 években öt további mintavételi pontot használtunk (Kis-öböl nádas belseje, a Kis-öböl fa kísérleti stég vége, a Kis-öböl beton kikötői móló vége, a Kis-öböl bejáratánál a litorális nádas, és egy nyíltvízi pont a parttól 350 m-re), ahol két éven át hetente vettünk mintákat. A vízmélység ez utóbbi helyeken 0,55 és 3,30 m között változott. 2007 szeptember 18.-19.-én Tihanynál, a Balatoni Limnológiai Kutatóintézet (BLKI) előtt 350 és 800 m-re egy 2,2 és egy 3,3 m mély helyen reggel 10 órától másnap délelőtt 11 óráig 3 óránként is vettünk zooplankton mintákat. A mintavételi napot az időjárási prognózis alapján úgy választottuk meg, hogy az egyes fajok vertikális elhelyezkedésében, és napi vertikális vándorlásában a vihar hatás is megfigyelhető legyen. A vihar este 21 és 22 óra között ki is tört, amikor a korábbi 1,8 m sec⁻¹ átlagos szélesség 11 m sec⁻¹-re nőtt és elhúzódott másnap hajnali 3 óráig.

A zooplankton mintákat minden helyen és minden alkalommal felszíntől a fenéig 0,5 méterenként vetünk 34 literes Schindler-Patalas mintavevővel, amely 60 µm-es gyűjtőhálával volt ellátva. A mintákat 100 cm³ térfogatban tömörítve külön-külön tároló edényekben 3,5 % végkoncentrációjú formalinnal tartósítottuk, s Zeiss-Opton fordított plankton mikroszkóppal egyenként dolgoztuk fel. Megállapítottuk a fajösszetételt, a kor és nemek eloszlását és az egyedszámokat.

2005-től minden mintavételi helyen és minden alkalommal, a felszíntől lefelé 0,5 m rétegenként 3D-Acoustic Doppler Velocimeter-el (SonTek, USA) mértük a víz turbulenciáját, Horiba U-10 hordozható műszerrel a víz hőmérsékletét, pH-ját, vezetőképességét, és oldott oxigén tartalmát is. A velociméterrel kapott 3D sebesség-frekvencia adatokat WinADV szoftverrel dolgoztuk fel, és a turbulenciát a sebesség fluktuációk négyzetes középértékével (RMS-turbulencia, cm sec⁻²) jellemeztük. A turbulens kinetikai energia disszipációs rátát és a Kolmogorov-távolságot különböző szélességek és vízszintek mellett MacKenzie and Leggett (1993) és Thenekes and Lumley (1992) nyomán számoltuk ki. Ehhez a vízszinteket a különböző mélységű tószektorokban vízoszlop magasságban fejeztük ki. A méréseket megelőző 24 órára vonatkozó óras átlagos szélesség értékeket, a víz klorofill-a (Chl-a) tartalmát és a mindennapos vízszint adatokat, beleértve a 2000 és 2003 közötti drámai vízszint csökkenés adatait is, az Országos Meteorológiai Szolgálatól (Siófoki Observatórium) és a Balatoni Fejlesztési Tanács Integrációs Kht. (Siófok)-tól szereztük be. A különböző fajok és fejlődési stádiumok vertikális rétegződésének felbomlását okozó kritikus turbulencia értékek megadásához főkomponens analízist alkalmaztunk. A szélesség, a turbulencia és a zooplankton összefüggéseit különböző (lineáris, exponenciális, logaritmikus) illesztésekkel, Pearson-korreláció számítással közelítettük. A különböző zooplankton csoportok, a vízszint, a vízhőmérséklet és a Chl-a együttes kapcsolatának erőségét a Balatonban Kanonikus Korrespondencia Analízissel vizsgáltuk (Podani 1997).

A turbulencia hatásának vizsgálata a zooplanktonra kísérleti körülmények között

A nyugodt, legfeljebb a konvekciós áramlások által zavart víztömeg zooplanktonjának napszakos vertikális vándorlását 2004 és 2005 augusztusban három db., a tó

átlagmélységének megfelelő 3,2 m magas és 30 cm átmérőjű átlátszó plexi plankton toronyban tanulmányoztuk a BLKI mólóján, szabadban. A plankton tornyokat tóvízzel töltöttük fel, majd hálózott tavi zooplanktonot pipettáztuk azokba a tavi sűrűség két-háromszorosának megfelelő mennyiségben. A tornyokban a felső 1 m-en egy-, a középső 1 m-es szakaszon két-, az alsó 1 m-es szakaszon pedig 3 rétegben alkalmazott fehér vászon lepedővel biztosítottunk víz alattihoz hasonló fényklímát, amelyet LI-COR Radiometer-el ellenőriztünk, illetve kísérleteztünk ki. A lepedő burkolaton a plankton tornyok két szemben levő oldalán félméteres távolságokban lefelé 10 x 5 cm kémlelő nyílásokat vágtunk ki, amelyekre tépőzárral lehetett a textilt visszahelyezni. A plankton tornyokban egy-egy feltöltés után 2-3 héten keresztül harmonikus planktonközösség élt mesterséges etetés nélkül is. Összesen négy ismétlésben vizsgáltuk 2-3 naponta különböző napszakokban a zooplankton vertikális elhelyezkedését a tornyokban a kémlelőnyílásokon keresztül 3 héten át, kézi nagyítóval, nappal a plankton torony kémlelőnyílásai mögé tartott fekete háttérrel a torony szemben levő oldalán, és éjszaka zseblámpa fény mellett. Vizuálisan „megbecsültük” a planktonszervezetek számát, a kémlelőnyílásuk vetületében, amely „nauplius” és „Copepodit + felnőtt Calanoida” „Copepodit és felnőtt Cyclopoida” és „Cladocera” kategóriánként volt lehetséges.

A turbulencia hatásának kísérletes vizsgálatára a zooplanktonra O'Brien et al (2004) turbulencia generátorát használtuk, amelyet az eredeti publikáció nyomán a Pannon Egyetem Alkalmazott Géptan Tanszéke készített el. 2007-2008 években kilenc, egyenként 21-24 nap hosszú kísérletben vizsgáltuk a generátorral a különböző zooplankton fajok, fajsoportok és fejlődési stádiumok túlélését bő táplálék és minimális ásványi lebegőanyag tartalom mellett 16 – 17 °C-on. A turbulencia generátor alapja egy 64x64x96 centiméteres üvegtank volt 80 cm magasságig feltöltve előzőleg 24 órán át ülepített, és a kiülepedett ásványi lebegőanyag rétegről óvatosan leszívott balatonvízzel. A ennek felső rétegében, közvetlenül a vízfelszín alatt mozgott fel és le a turbulenciát generáló rács 1,033 sec⁻¹ frekvenciával és 10 cm amplitúdóval, amelyet egy elektromotor hajtott (Giovanni, Milano, Italy). A rács 1 cm x 1 cm-es nagy szilárdságú szögletes műanyag rudakból készült, a rácsszemek lyukbőssége 5,87 x 5,87 cm volt. A kísérleteket megelőzően 3D Acoustic Doppler Velociméterrel mért RMS-turbulencia értékek alapján állítottuk be rácsmozgás amplitúdóját és frekvenciáját úgy, hogy a kádban a tóra jellemző turbulencia viszonyok alakuljanak ki. Ennek eredményeként a tank összes víztérfogata mintegy egyharmadában az RMS-turbulencia, az energia disszipációs ráta és a Kolmogorov-távolság a viharos, máshol a közepesen erős vízmozgású Balatonénak felelt meg. A tankba Schindler-Patalas mintavevővel gyűjtött és 100 l-es műanyag hordóban 24-48 órán át a laboratórium 16-17 °C-os hőmérsékletéhez adaptált balatoni zooplanktonot telepítettünk a tavi sűrűség két-háromszorosának megfelelő mennyiségben. A táplálékot kétnaponta frissítettük laboratóriumban tenyésztett *Selenastrum capricornutum* és *Chlamydomonas reinhardi* zöldalgával (alga biomassza: 3 mg l⁻¹). A turbulens tank mellett kontrollként egy hasonló, kontroll üvegtankot is alkalmaztunk, amelybe ugyanúgy zooplanktonot telepítettünk arányosan hasonló mennyiségben, mint a kísérletibe, és hasonlóan etettünk. A turbulens és a kontroll tankban a Horiba U-10 műszerrel mért oldott oxigén telítettség 75-95, illetve 50-84 % volt. A tankokból kétnaponta vettünk 3 – 3 párhuzamos zooplankton mintát a Schindler_Patalas mintavevő gyűjtőhálójával, azt vertikális hálóként alkalmazva. Azokból is almintákat vettünk, amelyeket 70%-os alkohollal tartósítottunk, a maradékot pedig óvatosan visszaengedtük a tankokba. A szervezeteket Zeiss-Opron fordított plankton mikroszkóppal számláltuk. A kezelt és a kontroll populációk időről időre megfigyelt egyedsűrűségének különbségét a 9 kísérlet összes adatát együtt kezelve teszteltük kétmintás F-próbával kombinált t-próbával. A turbulencia hatást $S = (C2-C1)/C2$ képlettel fejeztük ki, ahol C1 a kontroll, és C2 a turbulens kádban tapasztalt egyedszám, és ha S értéke negatív volt, akkor a kezelt, ha pozitív, akkor a kontroll kád populációja mortalitása volt a nagyobb.

Eredmények

A szélesség és turbulencia összefüggése a Balatonban

A tavi mérési adatok szerint az RMS-turbulencia a szél- és hullámmozgás mentes tóban $1,1 - 1,5 \text{ cm sec}^{-1}$ körüli volt és $1-2 \text{ m sec}^{-1}$ szélesség és enyhe hullámmozgás mellett $1,5 - 3 \text{ cm sec}^{-1}$ -re emelkedett. $4 - 6 \text{ m sec}^{-1}$ szélesség, és az ehhez tartozó felszíni hullámmozgás mellett már $1 - 13 \text{ m sec}^{-1}$ RMS-turbulenciákat mértünk (max. $18,87 \text{ cm sec}^{-1}$). A leggyakrabban, az esetek több mint 50 százalékában, az RMS-turbulencia értéke 1 és $3,5 \text{ cm sec}^{-1}$ közé esett. 46 százalékban a turbulencia $3,5-4 \text{ cm sec}^{-1}$ felett volt, és 4 százalékban haladta meg értéke a 10 cm sec^{-1} -t. A turbulencia intenzitását sosem nem a pillanatnyi, hanem leginkább a mérést megelőző 3. óra szelereje szabta meg. Vizsgálati eredményeink jól mutatták, hogy hasonló szélviszonyok mellett a sekélyebb tóterületeken (szektorokban) RMS-turbulencia és az energia disszipációs ráta jóval nagyobb, valamint a Kolmogorov-távolság kisebb, mint a mélyebb tóterületeken. Egy adott mérési helyen az RMS-turbulencia, természetes módon a felszíntől lefelé is csökkent. A tóban a becsült turbulens kinetikai energia disszipációs ráta a mélységtől és a szélességtől függően $1,64 \cdot 10^{-7}$ és $8,61 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-3}$ között, a Kolmogorov-távolság $0,06$ és $1,69 \text{ mm}$ között változott. A $3,2 \text{ m sec}^{-1}$ éves átlagos tó fölötti szélesség mellett az energia disszipációs ráta a különböző mélységű szektorokban $4,31 \cdot 10^{-5}$ és $8,61 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-3}$ és a Kolmogorov távolság $0,35 - 0,4 \text{ mm}$ közötti volt.

Zooplankton vertikális szerkezetének kapcsolata a turbulenciával

A nagyszámú terepi megfigyelés szerint a különböző vízrétegek zooplanktonjának fajösszetételére, és az egyes fajok vertikális dinamikájára erősen hatott a tó pillanatnyi turbulenciája. Nappal, kis RMS-turbulencia ($< 3,5 - 4 \text{ cm s}^{-1}$) esetén a *M. leuckarti*, a *D. polymorpha* veligera lárva, és a nauplius-ok általában a felszín közeli vízrétegben, míg a *D. brachyurum* és az *Eudiaptomus gracilis* és a Cyclopoida-k copepodid és kifejlett alakjai a mélyebb rétegekben, a fenék közelében tartózkodtak. Éjjel eme vertikális eloszlás megfordult. Ezeket a tapasztalatokat nagymértékben megerősítették a planktontornyokban kapott egészen hasonló eredmények. A zooplankton eme struktúráját a tóban a $3.5 - 4 \text{ cm sec}^{-1}$ -nél nagyobb turbulencia szétzilálta, a társulásokat homogenizálta, és a szervezetek napi vertikális vándorlási ritmusát elnyomta. A növekvő turbulencia esetén a Cladocera félék voltak képesek a legkevésbé, és a Cyclopoida-k a legtávolabbi tartani vertikális pozíciójukat a vízoszlopban. A nagyszámú balatoni megfigyelés 50 %-ában lépte túl a tó turbulenciája azt a határt amelynél a zooplankton, vagy egyes alcsoportjai még rétegződhetnek.

A zooplankton sűrűségének összefüggése a vízhőmérséklettel, a Chl-a tartalommal, a vízszinttel és a turbulenciával a Balatonban

A 9 éves tavi adatsorok (beleértve a 2000-2003 közötti drámai vízszint csökkenés időszakának adatait is), a kanonikus korrespondencia analízise szerint a három háttérváltozó közül (vízhőmérséklet, Chl-a, vízszint /mindig vízoszlop mélységre átszámolva az adott helyen/) a vízszint volt a determináns. A vízszint ingadozása állt a legerősebb kölcsönösségben a veligera-k, számos Cladocera (*Daphnia cucullata*, *Daphnia galeata*, *Bosmina coregoni*), sok Rotatoria (elsősorban a *Keratella quadrata*, *Keratella cochlearis*) és a Calanoida *Eudiaptomus gracilis* copepodit és felnőtt populációinak alakulásával. Alacsonyabb vízállások, illetve az ezekhez társult erősebb tavi turbulenciák periódusaiban a populációk szignifikánsan, némelyikük 70-80% mértékben gyérültek. Azt kaptuk, hogy kb. 75 cm az a kritikus balatoni vízszint, amely alatt a fenti zooplankton csoportok populációi

látványosan gyérülnek. És ez az a kritikus vízszint, amelyhez már minden tavi szektorban $<10^{-5} \text{ m}^2 \text{ sec}^{-3}$, tehát nagyon erős energia disszipációs ráta és $< 0,3 \text{ mm}$, tehát a szervezetek méreténél már általában jóval kisebb turbulens örvényátmérő társul a mélyben. A nauplius-ok és a ragadozó Cyclopoida-k (*Cyclops vicinus*, *Mesocyclops leuckart*) azonban nem mutattak ilyen érzékenységet a vízszint csökkenésével és a turbulencia növekedésével szemben. Ezért az alacsony vízállások periódusaiban a zooplankton struktúrája általában a Cyclopoida-k dominanciája felé tolódott el.

A turbulencia generátorban kapott eredmények

A turbulencia generátorban kapott eredmények nagymértékben megerősítették a terepi megfigyelésekből levont következtetéseket. A kilenc, egyenként 21-24 napos kísérletben a *Daphnia galeata*, a *Daphnia cucullata*, a *Bosmina coregoni*, a *Keratella* fajok populációinak sűrűsége már a második, negyedik napra szignifikánsan csökkent a turbulens kádban a kontrollhoz képest. Némelyik kísérletben a *Daphnia*-félék a második-negyedik napra ki is pusztultak a turbulens kádból. Továbbá, a hatodik-nyolcadik napra általában jelentős különbség alakult ki a Balaton domináns zooplankton szervezete, az *Eudiaptomus gracilis* kezelt és kezeletlen populációinak sűrűségében is. A nauplius-ok és a Cyclopoida Copepoda-k (*Cyclops vicinus*, *Mesocyclops leuckarti*) viszont jól tolerálták a turbulenciát, sőt „S” értékük nőtt.

Diszkusszió és összefoglalás

A nagykiterjedésű sekély Balaton RMS-turbulenciájának műszeres vizsgálatai, és a becsült turbulens kinetikai energia disszipációs ráták alapján, a Balaton más tavakkal és tengerekkel összehasonlítva (pl. Reynolds 1992) a Világ egyik legkinetikusabb felszíni állóvize. Bebizonyosodott az is, hogy a tó vízszintjének csökkenése a turbulencia további növekedéséhez vezet annak minden következményével együtt a zooplanktonra. Azaz, az intenzív turbulencia nagymértékben zavarhatja a nagyobb testűek, a szűrve, az ülepítve táplálkozók és általában a növényevők orientációját, táplálékgyűjtését, találkozási rátáját, a turbulens vízben való úszását. A tó különböző mélységeire is kiterjesztett részletes hosszú távú zooplankton vizsgálataink feltárták, hogy a tó átlagosan is erős turbulenciája az esetek 50 %-ában nem engedi a zooplankton vertikális rétegződésének és napszakos vertikális ritmusának kialakulását. Az erre, tehát a genetikailag is determinál vertikális vándorlásra való törekvés a turbulens vízben bizonyára a zooplankton hatalmas energia kiadásával is jár, amely kondícióját ronthatja. A hosszú távú zooplankton adatsorok egyértelműen azt mutatták, hogy 2000 és 2003 között, amikor a vízszint drámaian csökkent és a turbulencia nőtt, egyes fajpopulációk sűrűsége 50-70%-al is visszaesett, annak ellenére, hogy a táplálékkínálat nem változott (sőt, a víz Chl-a tartalma nőtt), és a populációk csak a vízszint visszaállása után regenerálódtak. Felmerülhet, hogy a víz betöményedése és a fokozott turbulenciával együtt járó további üledék felkeveredések is közrejátszottak a gyérülésben. De más kísérleteink szerint az ionkoncentráció negatív hatása sokkal magasabb elektromos vezetőképességnél ($> 1200 \mu\text{S cm}^{-1}$) kezd jelentkezni annál, mint amely a Balatonban kialakulhat (G.-Tóth 2008). A turbulens kádban pedig minimális volt az ásványi lebegőanyag tartalom is, a táplálék pedig bőséges, mégis ugyanazok a fajok pusztultak, mint amelyek a turbulens Balatonban. A számítások szerint a Balatonban a Kolmogorov-távolság kisebb, mint a legtöbb zooplankton egyed testhossza, ami azt jelenti, hogy a kis örvények nyíróereje szaggatja, tépi e szervezeteket, s bizonyára ez is nagymértékben közrejátszhatott az érzékenyebb Cladocera-k, főleg azok zsenge frissen vedlett alakjainak mortalitásában, amely viszont kevésbé érintette a Copepoda-k kis nauplius-ait és az erősebb testalkatú Cyclopoida-kat.

Összefoglalva az eredményeket, a sekély Balatonban – és bizonyára más sekély tavakban is - az intenzív turbulencia fundamentális hatással van a zooplankton struktúrájára, és közvetlenül is szelektív tényezőként játszik szerepet az egyes fajok, és életforma csoportok uralomra jutásában, vagy háttérbe szorulásában. Tanulságos a Balaton planktonikus Cladocera faunájának általános gyérsége, a legnagyobb testű fajok (pl. a *Daphnia magna*) hiánya, és ebben a magas ásványi lebegőanyag tartalom által okozott permanens táplálék limitáció mellett (G.-Tóth 1992) a turbulencia lehet a másik meghatározó tényező, amely a vízszint csökkenésekor tovább fokozódik. Erre utalnak Korponai (2008) legújabb paleozoológiai eredményei is, miszerint sokkal kevesebb Cladocera maradvány mutatható ki az ősbalaton alacsony vízállású periódusainak üledékeiből, mint a magas vízállásúakéból. Továbbá, hogy a mai Balatonban is a legsekélyebb, Keszthelyi-medencében a legnagyobb a turbulenciával szemben ellenállóan bizonyult Cyclopoida-k aránya, mint a mélyebb tóterületeken (pl. Párpala et al. 2003). Eredményeinkkel arra is fel szeretnénk hívni a figyelmet, hogy váratlan vízszint csökkenések gyakoriságának növekedése, amelyet az összes klímaváltozás modell prognosztizál, a turbulencia növekedése és egyéb fizikokémiai változásokkal együtt nagy hatással lesz a plankton társulások funkciójára is, amelyet a tó menedzsmentnek figyelembe kell vennie. További tudományos feladatként pedig egyrészt a rendkívül változatos zooplankton társulásokat alkotó fajok és fajokon belül, az életmód tekintetében is nagyon eltérő lárva alakok toleranciáját kellene vizsgálni a turbulenciával szemben, és a társulások általános funkciójának alternatíváit tovább keresni a Balaton és más sekély tavi szisztémák esetén. Ezen a vizsgálódások további eredményeinek aut-, a dem-, és szünökológiai jelentősége mellett rendkívül fontos gyakorlati tanulságai lehetnek a sekély tavi ökoszisztémák szolgálatának hasznosításában is.

Irodalomjegyzék

Alcarat, M., E. Saiz and A. Calbet (1994): Small-scale turbulence and zooplankton metabolism: Effects of turbulence on heartbeat rates of planktonic crustaceans. – *Limnol. Oceanogr.* 39(6): 1465 – 1470.

G.-Tóth, L. (1992): Limiting effect of abioseston on food ingestion, postembryonic development time and fecundity of daphnids in Lake Balaton (Hungary). – *J. Plankton Res.* 14: 435 – 446.

G.-Tóth, L. (2008): A hullámverés, a betöményedés, a kiszáradás és a páratartalom hatásának vizsgálata a rögzült és planktonikus balatoni gerinctelen állatokra. Impacts of the wave actions, the ionic concentration, the desiccation and the humidity on the planktonic and sessile invertebrates in Lake Balaton. Progress report, 3B022-04 NKFP-BALÖKO Project, Tihany-Budapest: 1-7. (in Hungarian)

Kjørboe, T. and E. Saiz (1995): Planktivorous feeding in calm and turbulent environments, with emphasis of copepods. – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 122: 135 – 145.

Korponai, J., I. Gyulai, M. Braun, L. Forró, J. Nédli and I. Papp (2008): Cladocera maradványok a Balaton és a Zalavári víz üledékében. Cladocera remains in the sediment of Lake Balaton and Zalavári Pond. – *Hidrológiai Közlemények* 49: 98 – 101 (in Hungarian with English summary).

MacKenzie B.R. and W.C. Leggett (1993): Wind based models for estimating the dissipation rates of turbulent energy in aquatic environments: empirical comparisons. – Marine Ecology Progress Series, Vol. 94: 207 – 216.

O'Brien, K. R., D. L. Meyer, A. M. Waite, G. N. Ivey and D. P. Hamilton (2004): Disaggregation of *Microcystis aeruginosa* colonies under turbulent mixing: laboratory experiments in a grid-stirred tank. – Hydrobiologia 519: 143 – 152.

Parpala, L., L.G.-Tóth, V. Zieveci, K. Szalontai and P. Németh (2003): The summer zooplankton structure and productivity in Lake Balaton. - Shallow Lakes 2002., Hydrobiologia 506 – 509: 347 - 351.

Podani, J. (1997): Bevezetés a többváltozós biológiai adatfeltárás rejtelméibe (Introduction in the enigma of multivariate analyses) - Scientia Kiadó, Budapest: 1-412. (in Hungarian)

Reynolds, C. S. (1992a): Fluid motion and Phytoplankton.– In: Aquatic Ecology, Scale, Pattern and Process (Eds.: P. S. Giller, A. G. Hildrew and D. G. Raffaelli), The 34th Symposium of The British Ecol. Soc. Uni. Coll. Cork 1992, Blackwell Sci. Publ. Oxford, London, Edinburgh, Boston, Melbourne, Paris, Berlin, Vienna: 146 – 187.

Reynolds, C. S. (1992b): Turbulent Intensity and dissipation rate. – In: Giller, P.S., Hildrew, A.G. and Raffaelli, D.G. (Eds): Aquatic ecology, scale, pattern and process. The 34th Symposium of the British Ecol. Soc. Univ. Coll. Cork. – Blackwell Sci. Publ. Oxford, London, Edinburgh, Boston, Melbourne, Paris, Berlin, Vienna.

Saiz, E and M. Alcaraz (1991): Effects of small-scale turbulence on development time and growth of *Acartia grani* (Copepoda: Calanoida). – J. Plankton Res. 13/4: 873 – 883.

Rotschild, B. J. and T. R. Osborn (1988): Small-scale turbulence and plankton contact rates. – J. Plankton Res. 10: 465 – 474.

Tennekes and Lumley (1972): A first course in turbulence. – The MIT press, Cambridge, Massachusetts: 1 – 300.

Wisser, A. W. and A. Stips (2002): Turbulence and zooplankton production: insights from PROVESS. – J. of Sea Research 47: 317 -329.

Wisser, A. V., P. Mariani and S. Pigolotti (2009): Swimming in turbulence: zooplankton fitness in terms of foraging efficiency and predation risk. Journal of Plankton Res. J. Plankton Res. 2009 31: 121-133.

Tisztelt Bíráló Bizottság!

A project keretében készült alábbi két kézirat egyikét 2009 januárban, a másodikat közvetlenül e zárójelentés megírása előtt, ez év februárban küldtük el publikálás céljából a *Limnetica* (Impakt faktor: 0,722) és a *Limnology and Oceanography* (Impakt Faktor: 3,29) folyóiratoknak. A két kézirat tehát jelenleg még elbírálás alatt áll, de bízunk benne, hogy az első, vagy második körben valamely nívós nemzetközi szakfolyóirat közli majd ezeket is. Tisztelettel kérem a tisztelt Bíráló Bizottságot, hogy négyéves kutatómunkánk eredményességének végső megítélésében ezt a körülményt szíveskedjen figyelembe venni.

Tisztelettel:

G.-Tóth László DSc.
a zárójelentés készítője, vezető kutató

1., Eszter Baranyai, László G.-Tóth, Ágnes Vári, and Zalán Gábor Homonnay: The effect of turbulence on the vertical distribution of zooplankton assemblages in the shallow, large and turbulent Lake Balaton (Hungary) (**Limnologica, elbírálás alatt**)

2., László G.-Tóth, Laura Parpala and Eszter Baranyai: Field and experimental evidences of the negative effect of the enhanced turbulence on the zooplankton coupled with water level decrease in Lake Balaton, the largest shallow lake in Central Europe (**Limnology and Oceanography, elbírálás alatt**)