

ZÁRÓ SZAKMAI BESZÁMOLÓ

**Az ultraibolya sugárzás szerepe tavak oldott
szervesanyagainak transzformációjában és degradációjában**
(OTKA K 63296, Témavezető: V.-Balogh Katalin)

Bevezetés.....	2
Célkitűzés.....	3
Kutatások.....	3
Színes szervesanyagok, lebegőanyagok és algák szerepe az ultraibolya és látható fény abszorpciójában.....	3
Az oldott szervesszén fotolízise ultraibolya sugárzás hatására.....	10
Az oldott szervesanyagok fiziko-kémiai tulajdonságainak változása UV-sugárzás hatására.....	12
Az UV-sugárzás hatása a DOC biológiai hozzáférhetőségére.....	16
Az oldott szervesszén, a bakterioplankton és a hidrogénperoxid összefüggései.....	19
Irodalom.....	21

Bevezetés

Ismert, hogy a Napból érkező ultraibolya (UV-B) sugárzás károsan hat mind a szárazföldi (CALDWELL *et al.*, 1998), mind a vízi (HÄDER *et al.*, 1998) szervezetekre. Az ultraibolya sugárzás potenciális veszélyének becsléséhez nélkülözhetetlen lehatolási mélységének ismerete a természetes vizek különböző típusaiban. Az UV-B legmélyebbre az óceánok nyílt vizébe képes lehatolni, ahol a fényabszorpciós komponensek, -színes szervesanyagok, lebegőanyagok és algák- koncentrációja általában rendkívül alacsony, ezek koncentrációjának növekedése viszont csökkenti a lehatolási mélységet (SMITH & BAKER, 1979). Magyarországi tavakban a fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) vízalatti fénykioltásáról vannak ismeretek. A fényabszorpciós komponensek szerepét a vízalatti PAR klíma alakításában empirikus modellel leírtuk (V.-BALOGH *et al.*, 2000). Bár a legkorábbi vízalatti ultraibolya sugárzás mérések (Sargasso tenger) 1950-re datálhatók (JERLOV, 1950), magyarországi tavaink közül a Balatonról is csak újabban vannak ilyen adatok (VÖRÖS *et al.*, 2006), mivel intézetünk az MTA BLKI 2003 óta rendelkezik a vízalatti ultraibolya sugárzás mérésére alkalmas, hazánkban mostanáig egyetlen radiométerrel (PUV-2500 Biospherical Instrument).

Az oldott szerveszén (DOC) a vízi ökológiai rendszerek egyik kritikus összetevője, fizikai, kémiai és biológiai folyamatok széles spektrumára van hatással. Kiemelhető, hogy elsődleges szubsztrátumként szolgál a baktériumok számára (WILLIAMSON *et al.*, 1999), a baktériumok mind az allochton mind az autochton szerves szénforrásokat hasznosítják (COLE *et al.*, 1982, TRANVIK, 1992; RECHE *et al.*, 1998). A napsugárzás, elsősorban annak ultraibolya tartománya, szerepet játszik a színes szervesanyagok (humanyagok) szerkezetének, molekulatömegének és optikai tulajdonságainak átalakulásában (SALONE & VÄHÄTALO, 1994; MILLER & ZEPP, 1995). A szervesanyagok ultraibolya (UV) sugárzás hatására bekövetkező fotokémiai bomlása szignifikánsan megnövelheti a biológiailag hozzáférhető szerves vegyületek mennyiségét felszíni vizekben (GELLER, 1986; LINDELL *et al.*, 1995; BERTILSSON & ALLARD, 1996). Ugyanakkor a bakterioplankton és az ultraibolya sugárzás kapcsolata ennél sokkal összetettebb, a felszíni vizekben jelentős lehet az UV sugárzás közvetlen károsító hatása, ráadásul a szerves vegyületek bomlása során kis mennyiségben ugyan, de nagyon erősen toxikus oxigéntartalmú szabadgyökök is képződnek. E folyamatok jelentősen befolyásolhatják a tavi, sőt a globális szén ciklust.

Célkitűzés

Még a Balaton vonatkozásában is hiányosak voltak ismereteink a vízalatti UV-klímáról, az oldott szerves(humin)anyagoknak az UV-klíma alakításában betöltött szerepéről, az oldott szervesanyagok tavon belüli fotolitikus átalakulásáról, biológiai reaktivitásuk dinamikájáról. Ráadásul ilyen vizsgálatokat a Balatonon kívül más magyarországi állóvizünkön eddig senki sem végzett.

Ezért tűztük célul, hogy harminc eltérő szervesszén koncentrációjú magyarországi víztesten végzett vizsgálatokkal megismerjük:

- i. a fényabszorbeáló paraméterek szerepét a vízalatti UV-klíma alakításában a vízalatti UV-sugárzás intenzitásának és a fényabszorbeáló paraméterek (lebegőanyagok, színes szervesanyagok, algák) koncentrációjának felmérésével;
- ii. az UV-sugárzás hatását az oldott szerves(humin)anyagok degradációs folyamatára és fiziko-kémiai tulajdonságaira;
- iii. az UV-sugárzás hatását az oldott szerves(humin)anyagok biológiai hozzáférhetőségére;
- iv. az oldott szervesszén (DOC), a bakterioplankton és a DOC fotolízisének melléktermékeként képződött hidrogénperoxid *in situ* összefüggéseit.

Kutatások

Színes szervesanyagok, lebegőanyagok és algák szerepe az ultraibolya és látható fény abszorpciójában

Módszerek

Vizsgált víztestek

Kavicsbánya tavak: Gyékényesi kavicsbánya-tó Ny, Gyékényesi kavicsbánya-tó K, Hegyeshalmi Stettni-tó, Hegyeshalmi kavicsbánya-tó. *Nagy természetes tavak:* Balaton - Zala-torkolat, Keszthelyi-, Szigligeti-, Szemesi-, Siófoki-medence (Tihany) és Siófoki-medence (Balatonfüzfő); Fertő - Nyíltvíz, Rucás öböl, Fertőrákosi öböl, Püspök-tó, Kisherlakni, Nagyherlakni, Hidegségi-tó; Velencei-tó Ny, Velencei-tó K. *Tározók:* Orfői-tó, Pécsi-tó, Herman Ottó-tó, Kovácsszénájai-tó, Deseda-tározó, Marcali-tározó, Kis-Balaton felső tározó, Kis-Balaton alsó tározó. *Szíkes tavak:* Szelidi-tó, Dunatétlen Kastély-tó, Böddi-szék.

Terepmérések

A terepméréseket és vízmintavételeket 2006-2008 években április és október között végeztük összesen 140 alkalommal. A vízalatti fényintenzitás mélységbeli változását *in situ* mértük PUV-2500 (Biospherical Instrument) radiométerrel. A műszer fedélzeti egységéhez vízalatti szenzor és hordozható számítógép csatlakozik. Ez a műszer a fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR 400-700 nm) mellett az ultraibolya (UV) hullámhossz tartomány mérésére is alkalmas a következő kitüntetett hullámhosszokon: UV-A: 395 nm, 380 nm, 340 nm; UV-B: 320 nm, 313 nm, 305 nm. A szenzor mérete miatt a rendkívül sekély szikes vizekben a víz alá merítés módszerével nem tudtunk mérni, ezért kifejlesztettünk egy „attached-bowl”- szenzorra rögzített tányér módszert, ahol a szenzor fölé cm-enként rétegezhető a víz.

Laboratóriumi mérések

A lebegőanyagok (TSS) koncentrációjának gravimetriás meghatározásához a vízmintákat 0,45 µm pórusméretű cellulóz-acetát filteren szűrtük. A filteren fennmaradt és 105 °C-on szárított lebegőanyagok mennyiségét CHYO YMC SM-200 analitikai mérleggel mértük. Algamentes lebegőanyag (TSS-Alg) mennyiséggel dolgoztunk, ezért az algák mennyiségét a mért értékből levontuk. Az alगतömeget a klorofill-a koncentrációból REYNOLDS (1984) arányszáma alapján számítottuk: 1 : 100 / klorofill-a koncentráció : fitoplankton száraztömeg.

A fitoplankton klorofill-a-ban kifejezett koncentrációjának mérését metanolos extrakcióval Shimadzu UV-160A spektrofotométerrel végeztük (FELFÖLDY, 1980). A szervesszén analízishez Elementar High TOC szervesszén analizátort használtunk. A víz színes oldott szervesanyagok (CDOM) okozta barna színét Pt-egységben (mg Pt l⁻¹) adtuk meg, melyet a Shimadzu UV-160A spektrofotométerrel 440 nm-en mért abszorbancia alapján számítottunk CUTHBERT & del GIORGIO (1992) szerint.

Adatok értékelése

A radiométerhez csatlakoztatott számítógépen tárolt mérési adatokat Excel formátumba konvertáltuk, és a Lambert-Beer törvény alapján kiszámítottuk a vertikális extinkciós koefficiens (K_d) értékeket:

$$K_{d(z)} = \ln I_0 - \ln I_z$$

ahol: K_d = vertikális extinkciós koefficiens, I_0 = beeső fényintenzitás; I_z = fényintenzitás z mélységben; z = vízmélység (méter). A K_d (m⁻¹) értékek ismeretében hullámhosszonként kiszámítottuk a fény 1%-os ($Z_{1\%} = \ln 100/K_d$) lehatolási mélység értékeit.

Annak megállapításához, hogy a fényabszorpciós komponensek (lebegőanyagok, színes szervesanyagok, algák,) milyen mértékben járulnak hozzá a vertikális extinkciós koefficiens (K_d) alakításához, azaz mekkora az egyes komponenseknek tulajdonítható specifikus K_d érték, többváltozós regressziót alkalmaztunk OriginPro 7,5 program felhasználásával.

Eredmények

Eredményeink szerint, mint az a célirányos kiválasztás alapján várható volt, a vizsgált vízterekben a fényabszorpciós komponensek koncentrációja tág intervallumot ölelt fel (1. táblázat). A vizsgált víztestek közül a két végletet a legtisztább kavicsbányatavak és a legzavarosabb szikes tavak jelentették.

1. táblázat. Fényabszorpciós komponensek tavankénti átlagos koncentrációja 30 magyarországi víztestben

Komponens	Tavi minimum	Tavi maximum	Átlag±SD (n=140)
TSS-Alg –Algamentes lebegőanyagok (mg l^{-1})	0,96	189	18,12±33,64
Kl-Klorofill-a (algák) ($\mu\text{g l}^{-1}$)	1,45	153	24,33±33,45
CDOM-Színes szervesanyagok (mg Pt l^{-1})	2,31	475	70,24±109,41
DOC –Oldott szervesszén (mg l^{-1})	1,21	61,45	16,04±14,31

Igen alacsony, $1,2 \text{ g m}^{-3}$ átlagos DOC koncentráció volt a Hegyeshalmi Kavicsbányatóban, míg a DOC intervallum felső határát 61 g m^{-3} értékekkel a Fertő Kisherlakni tava képviselte. A vizsgált időszakban a Kiskunsági Nemzeti Park szikes tavaiban a legnagyobb DOC koncentráció 40 g m^{-3} volt (ami alatta maradt a korábban tapasztaltaknak). Ezekhez képest sokkal kisebb, $10,4 \text{ mg l}^{-1}$ (Keszthelyi-medence) és $8,1 \text{ g m}^{-3}$ (Siófoki-medence) közötti volt a DOC átlagos koncentrációja a Balatonban.

Ami a színes oldott szervesanyagoknak (CDOM) tulajdonítható barna színintenzitást illeti, a Pt-skála alsó értéke (5 g Pt m^{-3}) alatti volt a kavicsbányatavak vizének színértéke. A víz intenzív barnaságával kiemelkedett a Fertő Kisherlakni tava (475 g Pt m^{-3}). A Kis-Balaton alsó tározóból kifolyó víz melegebb időszakban szintén barna, de a színérték csak 100 g Pt m^{-3} körüli. Ez a víz a Balatonban „kifakul”, így a tavat 30 g Pt m^{-3} (Keszthelyi-medence) és 5 g Pt m^{-3} (Siófoki-medence) színértékek jellemezték.

A vizsgált vízterekben az algamentes lebegőanyagok (TSS-Alg) átlagos koncentrációja $0,96 \text{ g m}^{-3}$ és 189 g m^{-3} közötti intervallumot ölelt fel, az alsó érték kavicsbánya (Gyékényesi)

tavat, míg a felső szikes (Böddi-szék) tavat jellemzett. A főleg szélcsendes időben végzett mérések alkalmával a Balatonban az algamentes lebegőanyagok koncentrációja átlagosan 11-21 g m⁻³ közötti volt.

A tavak vizének átlagos klorofill-a (Kl) koncentrációja szintén igen tág intervallumot ölelt fel. Az alsó határt ez esetben is a kavicsbánya tavak jelentették 1 – 2 mg m⁻³ körüli értékekkel. „Legzöldebb” volt a Marcali-tározó (klorofill-a 153 mg m⁻³) vize. A balatoni átlagos klorofill-a értékek 5 és 17 mg m⁻³ közé estek.

2. táblázat. Tavankénti átlagos vertikális extinkciós koefficiens értékek (m⁻¹) 30 magyarországi víztestben

Hullámhossz (nm)	Tavi minimum	Tavi maximum	Átlag±SD (n=140)
UV-B 305	1,26	247,50	51,48±68,40
UV-B 313	1,10	204,40	42,17±54,33
UV-B 320	0,96	187,75	38,23±51,55
UV-A 340	0,70	148,10	29,29±39,44
UV-A 380	0,52	88,25	17,58±22,21
UV-A 395	0,45	73,35	13,69±17,85
PAR 400-700	0,26	22,75	3,38±4,08

Előbbiek alapján a fénymérés adatok közül a szélső állapotokat emeljük ki. A legkisebb K_d értékeket (2. táblázat) minden hullámhosszon a kavicsbányatavakban, a legnagyobbakat pedig szikes tóban találtuk. Az átlagos K_d szélső értékek 0,26 m⁻¹ és 247,50 m⁻¹ közé estek, a K_d értéke a hullámhossz csökkenésével nőtt. A két legextrémebb víztípus vízalatti fényklímájának drasztikus eltéréseit a Z_{1%}-os értékek (3. táblázat) még szemléletesebbé teszik.

3. táblázat. A fény 1%-ának (Z_{1%}) tavankénti átlagos lehatolási mélysége (m) 30 magyarországi víztestben

Hullámhossz (nm)	Tavi minimum	Tavi maximum	Átlag±SD (n=140)
UV-B 305	0,019	3,65	0,47±0,82
UV-B 313	0,023	4,19	0,57±0,99
UV-B 320	0,025	4,80	0,67±1,14
UV-A 340	0,031	6,58	0,88±1,53
UV-A 380	0,050	8,86	1,32±2,26
UV-A 395	0,063	10,18	1,61±2,62
PAR 400-700	0,202	17,69	3,33±4,06

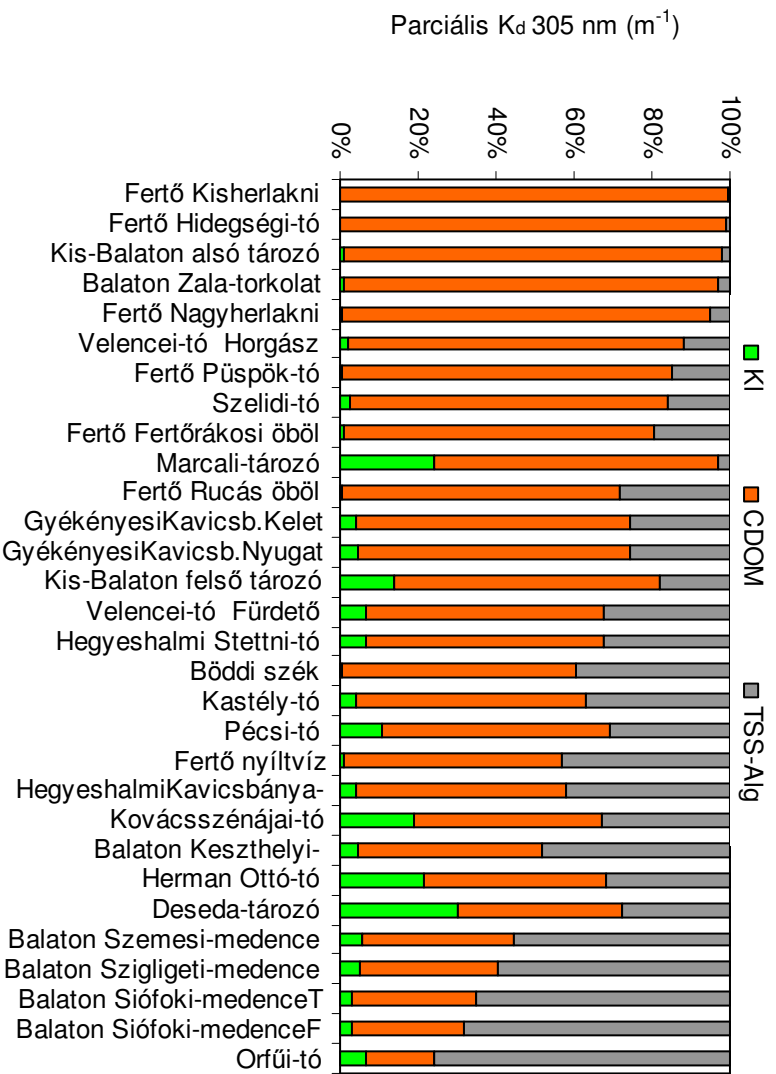
Kavicsbánya-tóban a PAR 1%-a közel 18 méter mélyre képes lehatolni (ez a mélység meghaladhatja a valóságos fizikai mélységet). A hullámhossz csökkenésével az 1 %-os mélység is csökken, de még a legkisebb hullámhosszú (305 nm) UV-B sugárzás 1%-os lehatolása is közel 4 m lehet ezekben a nagyon tiszta vizekben. Ezzel szemben a Böddi-szék szikes vizében a PAR 1%-a is csak 0,20 m, azaz 20 cm mélyre képes lehatolni, míg az alacsony hullámhosszú UV-B sugárzás 1%-os lehatolási mélysége ennél nagyságrenddel kisebb, 2 cm. Ebből az is következik, hogy a tisztább, átlátszóbb vizek kevésbé védettek az ultraibolya sugárzás káros hatásával szemben. A többi vizsgált tóra kapott K_d adatok természetesen a bemutatott szélső értékek közé tehetők.

A vízalatti fényklímát a fényabszorpciós komponensek egyidejű hatása alakítja. A közöttük lévő összefüggés hullámhosszonként többváltozós regressziós egyenletekkel írható le (4. táblázat).

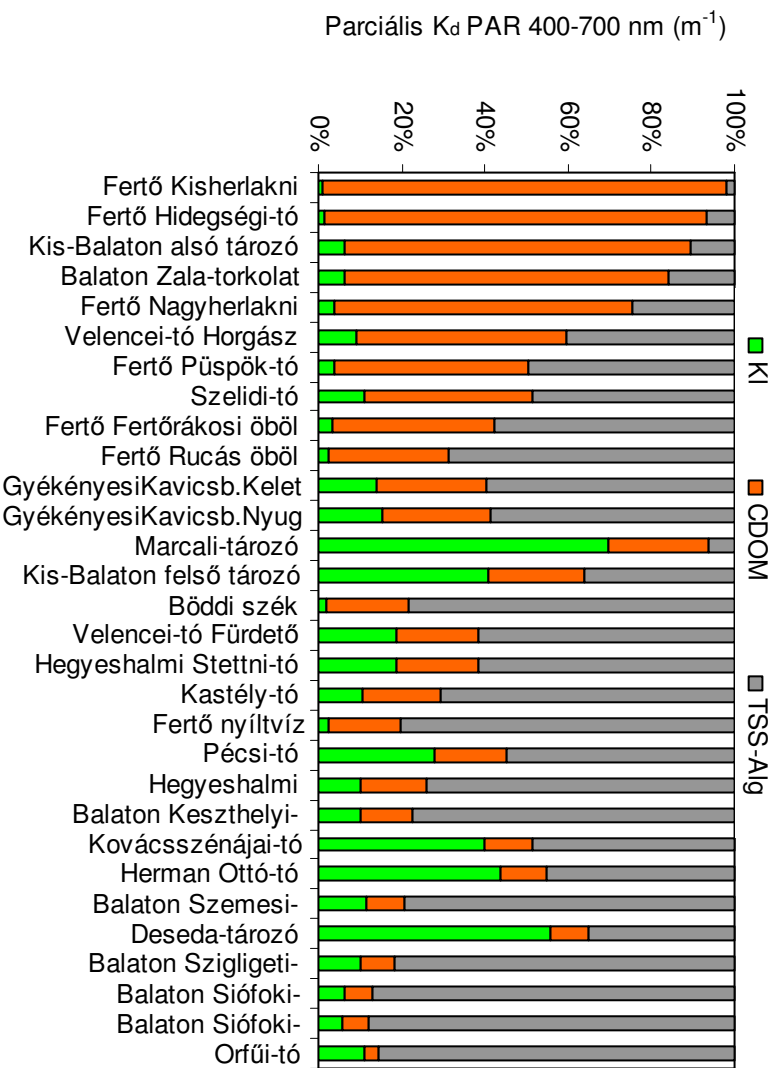
4. táblázat. Többváltozós regressziós egyenletek, összefüggés a vertikális extinkciós koefficiens, az algák, színes szervesanyagok és lebegőanyagok koncentrációja között 30 magyarországi víztest adatai alapján

$K_{d\ 305\ \text{nm}} = -0,9690 \pm 0,9519 + 0,0530 \pm 0,0270 * K_l + 0,5644 \pm 0,0113 * \text{CDOM} + 0,5022 \pm 0,0282 * \text{TSS-Alg}$ ($R^2 = 0,963$; $P < 0,0001$; $n = 140$)
$K_{d\ 313\ \text{nm}} = -0,4770 \pm 0,7586 + 0,0498 \pm 0,0215 * K_l + 0,4545 \pm 0,0090 * \text{CDOM} + 0,4205 \pm 0,0225 * \text{TSS-Alg}$ ($R^2 = 0,965$; $P < 0,0001$; $n = 140$)
$K_{d\ 320\ \text{nm}} = -0,7554 \pm 0,6950 + 0,0320 \pm 0,0197 * K_l + 0,4312 \pm 0,0083 * \text{CDOM} + 0,3577 \pm 0,0206 * \text{TSS-Alg}$ ($R^2 = 0,966$; $P < 0,0001$; $n = 140$)
$K_{d\ 340\ \text{nm}} = -1,5204 \pm 0,4596 + 0,0337 \pm 0,0130 * K_l + 0,3218 \pm 0,0055 * \text{CDOM} + 0,3467 \pm 0,0136 * \text{TSS-Alg}$ ($R^2 = 0,975$; $P < 0,0001$; $n = 140$)
$K_{d\ 380\ \text{nm}} = -0,9743 \pm 0,2270 + 0,0429 \pm 0,0064 * K_l + 0,1815 \pm 0,0027 * \text{CDOM} + 0,2222 \pm 0,0067 * \text{TSS-Alg}$ ($R^2 = 0,982$; $P < 0,0001$; $n = 140$)
$K_{d\ 395\ \text{nm}} = -0,8127 \pm 0,1793 + 0,0197 \pm 0,0051 * K_l + 0,1409 \pm 0,0021 * \text{CDOM} + 0,2006 \pm 0,0053 * \text{TSS-Alg}$ ($R^2 = 0,983$; $P < 0,0001$; $n = 140$)
$K_{d\ \text{PAR}\ \text{nm}} = -0,0255 \pm 0,0583 + 0,0141 \pm 0,0017 * K_l + 0,0172 \pm 0,0007 * \text{CDOM} + 0,0924 \pm 0,0017 * \text{TSS-Alg}$ ($R^2 = 0,972$; $P < 0,0001$; $n = 140$)

Többváltozós regressziós egyenletek: $y = a + b * x_1 + c * x_2 + d * x_3$, ahol, y = vertikális extinkciós koefficiens (K_d) (m^{-1}); b = K_l specifikus K_d ($\text{m}^2 \text{mg}^{-1}$), x_1 = K_l koncentráció (mg m^{-3}) c = CDOM specifikus K_d ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), x_2 = CDOM mint szín (g Pt m^{-3}), d = TSS-Alg specifikus K_d ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$), x_3 = TSS-Alg koncentráció (g m^{-3}).



1. ábra. Az algák (KI), színes szervesanyagok (CDOM) és algamentes lebegőanyagok (TSS-Alg) hozzájárulása az ultrabolyva sugárzás kioltásához 30 magyarországi víztestben



2. ábra. Az algák (KI), színes szervesanyagok (CDOM) és lebegőanyagok (TSS-Alg) hozzájárulása a fotoszintetikusan aktív sugárzás kioltásához 30 magyarországi víztestben

A hullámhosszonkénti többváltozós modellek (4. táblázat) alapján – a specifikus K_d értékek birtokában -kiszámítható, hogy az egyidejűleg ható abszorpciós komponensek közül melyiknek mekkora szerep jut a vízalatti fényabszorpcióban. A kapott eredmények közül a 305 nm-re és PAR-ra kapott eredményeket az 1. ábra és 2. ábra (sorrendben) mutatja be. Kitűnik, hogy a vizsgált víztestek többségében döntően a színes szervesanyagok határozzák meg az vízalatti ultraibolya-fény klímát (1. ábra), az algák szerepe pedig elhanyagolható. A magasabb hullámhosszú (400-700nm) PAR-t (2. ábra) viszont a vizsgált víztestek többségében az algamentes lebegőanyagok nyelik el. Ugyanakkor a barna vizekben (pl. Fertő Kisherlakni) a PAR klímát is szinte kizárólag a színes szervesanyagok határozzák meg, míg a hipertróf vizekben (Marcali-tározó) az algák fényabszorpciója meghaladja a másik két komponensét. Eredményeink bizonyítják, hogy sekély vizeinkben a színes oldott szervesanyagok jelentős abszorberei az UV sugárzásnak.

Kutatási eredmények hasznosíthatósága:

Műszerfejlesztés:

Kifejlesztettük az „attached-bowl” módszert PUV-2500 radiométerrel való fényintenzitás mérésre, amely lehetővé teszi a rendkívül sekély, zavaros vizekben a fénymérést. A módszer lényege, hogy a szenzor víz alá merítése helyett a cm-enkénti vízrétegzés a szenzor fölé történik (V.-Balogh et al.: 2009 Hydrobiologia 632: 91-105).

Empirikus modell:

Gyakori probléma, hogy megfelelő mérőműszer hiányában a vízalatti UV sugárzás intenzitásának mérése, következésképpen a vertikális extinkciós koefficiens kiszámítása nem kivitelezhető. Ultraibolya (UV) és látható (PAR) hullámhossz tartományra kifejlesztett többváltozós regressziós modelljeink felhasználásával vízalatti radiométer hiányában in situ fénymérés nélkül kiszámíthatóak egy víztestre jellemző vertikális extinkciós koefficiens (K_d) értékek. A modellek megadják az algák, algamentes lebegőanyagok és színes szervesanyagok specifikus K_d értékeit, ezek koncentrációinak laboratóriumi mérését kell elvégezni. (V.-Balogh et al.: 2009 Hydrobiologia 632: 91-105).

Az oldott szerveszén fotolízise ultraibolya sugárzás hatására

Módszerek

Vizsgált víztestek

A DOC fotolitikus bomlásának vizsgálatához öt víztestet választottunk ki. A víztestek kiválasztásában szempont volt, hogy DOC koncentrációjuk tág intervallumot öleljen fel, ezek a következők voltak: Hegyeshalmi kavicsbánya-tó, Balaton Siófoki-medence, Balaton Keszthelyi-medence, Kis-Balaton alsó tározó kifolyó vize (Zala torkolat), Böddi-szék. E víztestekből a laboratóriumi kísérletekhez 2007-ben nyáron vettünk vízmintát.

Laboratóriumi kísérletek

A vízmintákat előzetesen 450 °C-on izzított GF-5 üvegszál filteren (nominális pórusméret 0,40 µm) szűrtük, melyekből 280 ml-t -mintavételi helyenként három párhuzamban- kvarc csövekbe (magasság: 35 cm, belső átmérő: 3,5 cm) töltöttünk. A csöveget laboratóriumban Nap szimulátort alkalmazva mesterségesen előállított folyamatos sugárzásnak (UV-A, UV-B ill. VIS fénycsövek) tettük ki négy hétig. A kísérlet kezdetén az oxigéntelítettséget steril levegő buborékolatásával 100%-ra állítottuk be. A Nap szimulátor által kibocsátott fényintenzitások a következők voltak: UV-B: 0,291 mW cm⁻², UV-A: 0,403 mW cm⁻², PAR: 695 µmol m⁻² sec⁻¹. Ezen intenzitásértékek megfelelnek a nyári napsütéses órák (9-től 17-ig) átlagértékeinek. A PAR sugárzás intenzitásának méréséhez LI-COR, az UV sugárzáséhoz VLX 3W típusú radiométereket használtunk. Kontrollként azonos körülményeken sötétben tartott vízminták szolgáltak. Ellenőriztük a baktériumok jelenlétét a kísérlet kezdetén és végén. Ehhez epifluoreszcens mikroszkópi (Nikon Optiphot) technikát alkalmaztunk (HOBBIE et al., 1977). Mintát vettünk a 0., 3., 7., 14., 21. és 28. napon. Mértük a DOC koncentrációt Elementar High TOC szerveszén analizátorral.

Meghatároztuk a fotolitikusan bomló oldott szerveszén (FDOC) koncentrációt: $FDOC = DOC_0 - DOC_t$, ahol: DOC_0 = kiindulási DOC koncentráció; DOC_t = DOC koncentráció t inkubációs idő után. Meghatároztuk az FDOC bomlás sebességét exponenciális egyenlettel: $FDOC_t = FDOC_0 e^{-kt}$, ahol: $FDOC_t$ = FDOC koncentráció t inkubációs idő után; $FDOC_0$ = a kísérlet végén meghatározott összes FDOC koncentráció; k = bomlási koefficiens. t = idő napokban. Meghatároztuk az FDOC bomlásának felezési idejét ($\ln 2 k^{-1}$).

A kísérlet elején és végén izoláltuk a huminanyagokat (fulvosavak és huminsavak) kisnyomású folyadékromatográfiás XAD-módszerrel (STANDARD METHODS, 1995), melyhez Pharmacia oszlopot, XAD-7 gyantatöltetet és Masterflex pumpát alkalmaztunk. A huminsavakat oldékonyságuk alapján ($\text{pH} < 2$) választottuk el. Mértük a huminanyag frakciók DOC koncentrációját Elementar High TOC szervesszén analizátorral.

Eredmények

A kísérlet a két szélsőséges víztest, a kavicsbánya-tó és a szikes-tó esetében nem volt eredményes. Előbbinél az alacsony DOC koncentráció volt az ok, a változás alatta volt a műszeres kimutatási határnak, utóbbinál pedig a nagy lebegőanyag koncentráció okozott nehézséget.

A másik három víztestnél a következő eredményeket kaptuk. A kísérlet kiindulásakor az oldott szervesszén koncentráció $8,7 \text{ mg l}^{-1}$ (Siófoki-medence) és $14,4 \text{ mg l}^{-1}$ (Zala torkolat) között változott (a sötétben tartott kontroll vízmintákban a DOC koncentráció a kísérlet végén a kiindulási értékkel megegyezett). A DOC koncentráció az inkubáció 21. napjáig exponenciálisan csökkent, majd nem változott. A 21 nap alatti DOC csökkenés mértéke, vagyis a fotolitikusan bomló DOC koncentráció helyenként jelentősen eltért, csupán $0,2 \text{ mg l}^{-1}$ volt a Siófoki-medencében, míg nagyságrenddel több, $3,4 \text{ mg l}^{-1}$ a Zala folyó torkolatában. (5. táblázat). Ez a DOC mennyiség 1,5 %-ot tett ki a Siófoki-medencében és 24 %-ot a Zala torkolatban. A felezési idő több mint 17-szer nagyobb volt a Siófoki medencében, mint a befolyó zalavízben. Másként fogalmazva, fény hatására a DOC gyorsabban bomlik a tó nyugati végén, mint a keletin, ahol a perzisztensebb anyagok maradtak meg.

5. táblázat. Nap-szimulátorban folyamatos sugárzásnak kitett fotolitikusan bomló oldott szervesszén mennyisége és a bomlás sebessége

Mintavételi hely	FDOC mennyiség (t=21 nap)		FDOC bomlási sebesség (t=21 nap)	
	DOC csökkenés (mg l^{-1})	Bomlott mennyiség (%)	k (nap^{-1})	Felezési idő (megvilágított nap)
Zala-torkolat	3,40	23,55	0,2027	3,42
Keszthelyi-medence	1,25	8,66	0,1727	3,03
Siófoki-medence	0,22	1,52	0,0135	51,34

A sugárzás hatására az oldott szervesszén kémiai összetétele is megváltozott. A Zala torkolat vízében a huminsavaknak tulajdonítható DOC-koncentráció 58%-kal, a fulvosavaké

31%-kal csökkent, míg a nemhumanyagok részesedése 1,6%-kal nőtt (miközben, mint már bemutattuk, a DOC 24%-a mineralizálódott). A tó keleti területén a DOC fogyással (1,5%) együtt a kémiai átalakulás mértéke is kisebb volt. A huminsavak szervesszene 10,5%-kal, a fulvosavaké 8%-kal csökkent, a nemhumanyagok részesedése 6,5%-kal nőtt.

Az oldott szervesanyagok fiziko-kémiai tulajdonságainak változása UV-sugárzás hatására

A fentebb bemutatott 21 napos fotolízis kísérletek elsősorban a DOC fotolitikus bomlásának tanulmányozására irányultak, de kiterjedtek a DOC kémiai minőségváltozásának vizsgálatára is. Ugyanakkor a fizikai tulajdonságok változását is vizsgáltuk, aminek részletezésére nem tértünk ki. A négy hetes kísérletek eredményei azt mutatták, hogy mérhető változások következtek be az első hetet követően. További kísérleteinkben 208-ban a vizek mesterséges fénykezelését hét napig folytattuk, lehetővé téve a DOC fotolízis melléktermékeként képződő instabil hidogénperoxid koncentráció változásának jobb nyomonkövetését is. Ennek értelmében az így előkezelt vizekkel végeztük a később bemutatandó biológiai hozzáférhetőség változásának vizsgálatára irányuló kísérleteket is.

Módszerek

Laboratóriumi kísérletek

A fénykezelés kísérleteket a következő öt víztest vizével végeztük: Balaton: Siófoki-medence, Keszthelyi-medence; Kis-Balaton alsó tározó; Fertő: Fertőrákosi-öböl, Kisherlakni. A Nap szimulátoros kísérleteket a fentebb már leírt módon végeztük, azzal a különbséggel, hogy a besugárzás 7 napig tartott, és mintavételi helyenként nagyobb víztérfogatot használtunk. Négy liter sterilre szűrt vízből indultunk ki, melynek felét használtuk a fénykezeléshez, így a korábbi három párhuzam helyett helyenként 7 db (280 ml) kvarccsövet sugároztunk be hét napig, amely víztérfogat a laboratóriumi meghatározásokhoz és az alább bemutatandó fényelőkezelt vizekkel végzett biológiai hozzáférhetőség vizsgálatokhoz is elegendő volt.

Laboratóriumi mérések

Mértük a kísérletek kiindulásakor és a hét napos fénykezelést követően a DOC koncentrációt Elementár High TOC szerveszén analizátorral, mértük a színintenzitást

(CUTHBERT & del GIORGIO, 1992) és felvettük az oldott szervesanyagok abszorpciós spektrumait (Shimadzu UV-160 A spektrofotométer) és a fluoreszcens gerjesztési (Ex) spektrumokat 425 nm emissziós hullámhossznál (Hitachi F-4500 fluoreszcens spektrofotométer). COBLE (1996) szerint a $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$: 260nm/435nm-en kapott csúcs „fulvosav” típusú, a 310 nm/415 nm-en kapott csúcs „huminsav típus”-t jelent.

Az eredeti vízben a korábban leírtak szerint izoláltuk a huminanyagokat és mértük DOC koncentrációjukat. A vízmintavételekkor, valamint a fénykezelés végén mértük az oldott szervesanyagok fotolízisének melléktermékeként képződő hidrogénperoxid koncentrációt tormaperoxidáz módszerrel (ANDREAE, 1955; KIEBER & HELZ, 1986; COOPER *et al.*, 1989) Hitachi F-4500 fluoreszcens spektrofotométerrel.

Eredmények

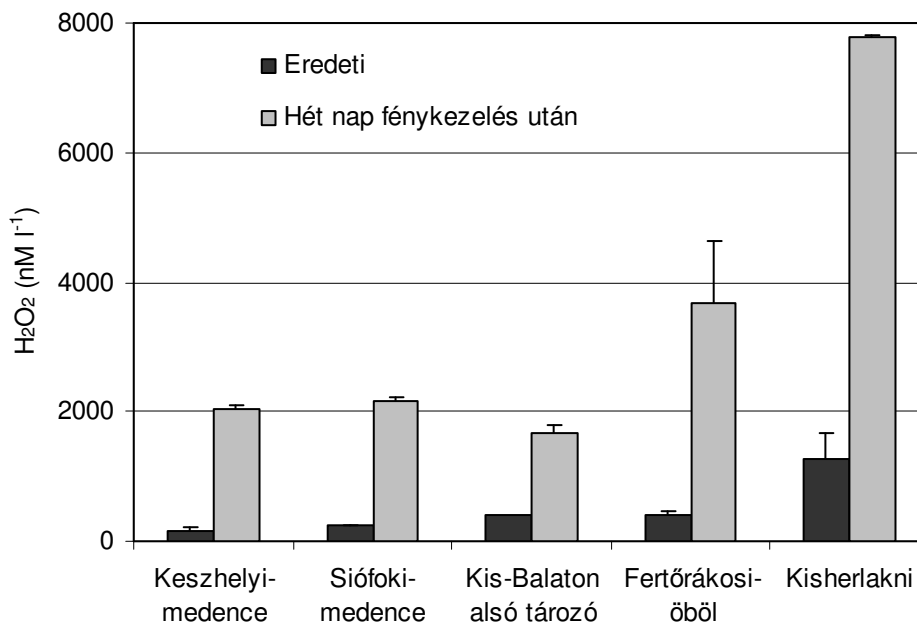
A hét napos fénykezelést követően egyedül a Siófoki-medence vizében nem tudtuk a fotolízis során bekövetkező DOC csökkenést (6. táblázat) kimérni, ez nem meglepő, mivel itt, mint láttuk, a 21 napos fénykezelés következtében is csupán 0,2 mg l⁻¹ volt a DOC fogyás. A többi vizsgált vízben a hét napos folyamatos fénykezelés alatt a DOC 8-12%-a bomlott le. Ez a DOC-veszteség a Keszthelyi-medence vizében 0,73 mg l⁻¹, míg a Kisherlakni vizében 5,47 mg l⁻¹ DOC koncentráció csökkenést jelent. Egyébként a kiindulási vízben a DOC 50-60%-át a huminanyagok adták, döntően fulvosavak, a huminanyagokból a huminsavak részesedése csupán 1-2% volt, kivétel ez alól a Kisherlakni, ahol megközelítette a 9%-ot.

6. táblázat. Oldott szervesszén koncentráció eredeti és Nap-szimulátorban hét napig folyamatos sugárzásnak kitett vízben

Mintavételi hely	DOC (mg l ⁻¹)		DOC csökkenés	
	Eredeti víz	7 napig Fénykezelt víz	(mg l ⁻¹)	(%)
Siófoki-medence	8,86	8,86	0,00	0,00
Keszthelyi-medence	9,51	8,78	0,73	7,68
Kis-Balaton alsó t.	13,84	12,31	1,53	11,05
Fertőrákosi-öböl	22,41	20,64	1,77	7,90
Kisherlakni	47,06	41,59	5,47	11,62

A DOC veszteség mellett az oldott szervesanyagok fény, elsősorban ultraibolya sugárzás hatására történő bomlásának másik bizonyítéka a melléktermékként képződő hidrogénperoxid koncentráció (3. ábra) növekedése, amely 4-12-szeres volt. Az eredeti vízben, a Balatonban

200 nM l⁻¹ körüli, míg a Kisherlakni vizében közel 1300 nM l⁻¹ volt a H₂O₂ koncentráció, előbbi 2000, utóbbi közel 8000 nM l⁻¹-re nőtt.



3. ábra A hidrogénperoxid koncentráció változása hét napos Nap szimulátorban történő besugárzást követően

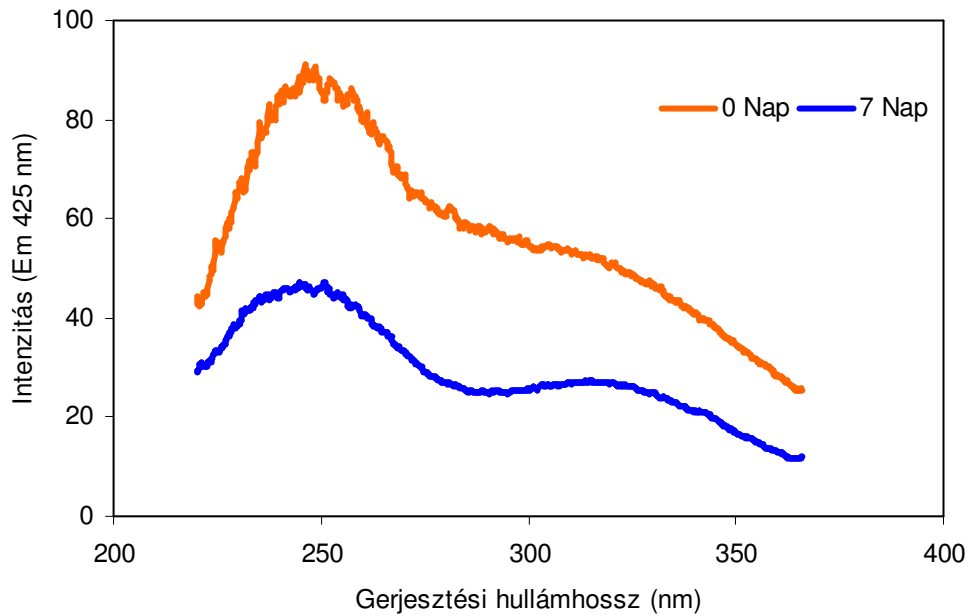
A hét napos fénykezelés alatt a víz színintenzitása (7. táblázat) a balatoni vizekben drasztikusan csökkent, míg a fertő-tavi vizekben alig változott. Hasonló eredményt hozott az abszorpciós spektrumok változása más hullámhosszokon is.

7. táblázat. A víz barna színintenzitása eredeti és Nap-szimulátorban hét napig folyamatos sugárzásnak kitett vízben

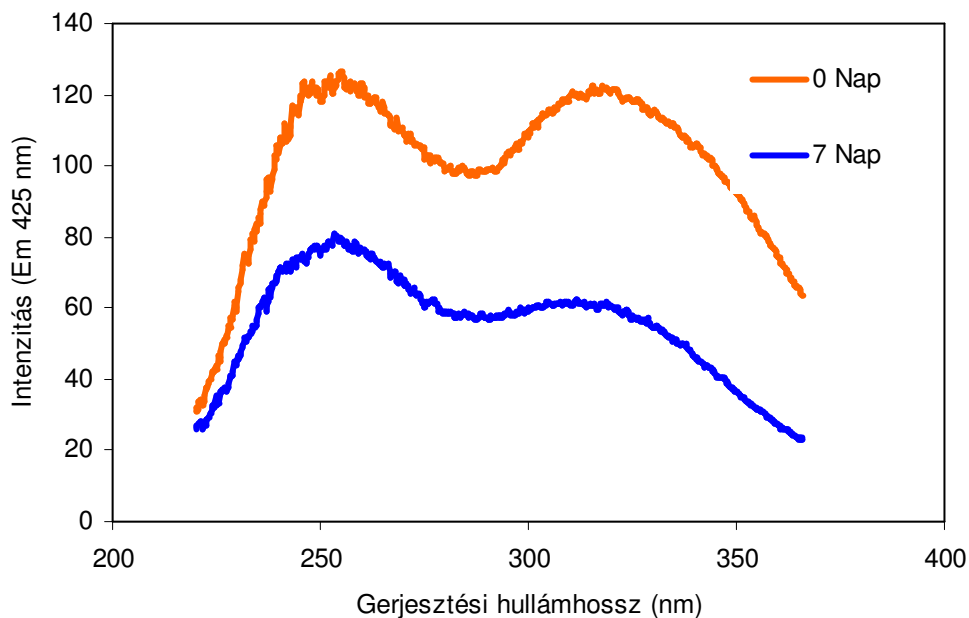
Mintavételi hely	Szín (mg Pt l ⁻¹)		Szín csökkenés %
	Eredeti víz	7 napig Fénykezelt víz	
Siófoki-medence	5,66	1,47	74,03
Keszthelyi-medence	11,54	3,17	72,50
Kis-Balaton alsó t.	89,57	33,35	62,77
Fertőrákosi-öböl	77,82	71,95	7,54
Kisherlakni	376,52	366,45	2,67

A huminanyagoknak tulajdonítható csúcsokat értékelve megállapítható, hogy az oldott szervesanyagok relatív fluoreszcencia intenzitása a fénykezelés hatására minden vizsgált víztest esetében általában 50%-kal csökkent (pl. 4. ábra, 5. ábra). Kivétel ez alól a Kisherlakni

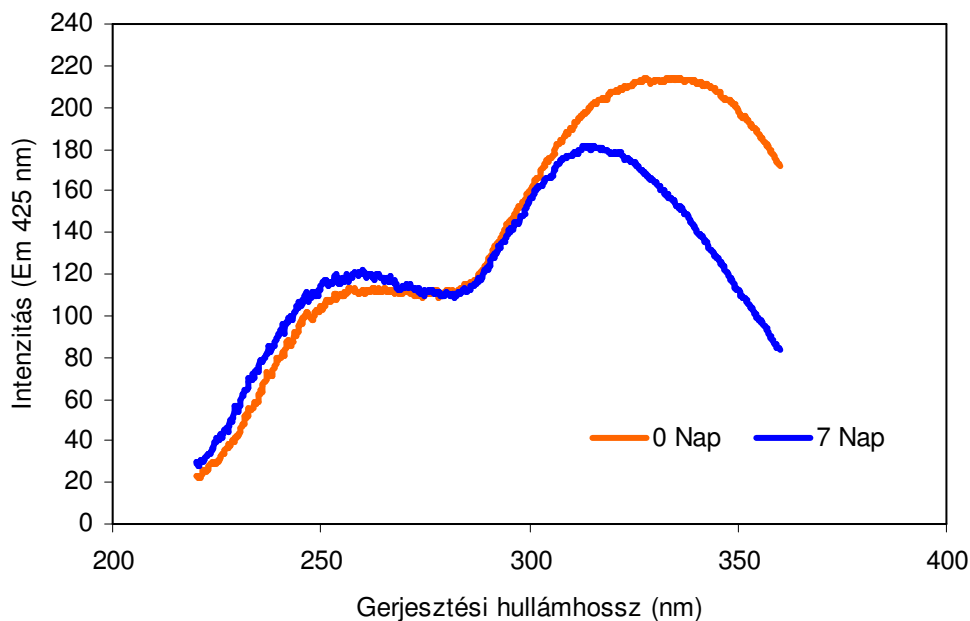
(6. ábra) vize, ahol a fulvosav csúcs intenzitása nem változott, míg a huminsav csúcs intenzitásának csökkenése nem érte el a 10%-ot sem.



4. ábra A relatív fluoreszcencia intenzitás spektrum változása hét napos Nap szimulátorban történő besugárzást követően a Keszthelyi-medence vizében



5. ábra A relatív fluoreszcencia intenzitás spektrum változása hét napos Nap szimulátorban történő besugárzást követően a Fertőrákosi-öböl vizében



6. ábra A relatív fluoreszcencia intenzitás spektrum változása hét napos Nap szimulátorban történő besugárzást követően a Kisherlakni vizében

Eredményeink azt mutatták, hogy a vizsgált vizek közül a Fertő sötétbarna vízű Kisherlakni tavában a szervesanyagokat a napfény képes bontani, miközben azok fizikai (optikai, fluoreszcens) tulajdonságai alig módosulnak. Ezzel szemben a többi vizsgált víznél a fotólízis folyamán az oldott szervesanyagok fizikai tulajdonságai jelentősen módosultak.

Az UV-sugárzás hatása DOC biológiai hozzáférhetőségére

Módszerek

Laboratóriumi kísérletek

Az UV-sugárzás DOC biológiai hozzáférhetőség módosító szerepét vizsgáló kísérleteket az előzőekkel megegyező öt víztest (Balaton: Siófoki-medence, Keszthelyi-medence; Kis-Balaton alsó tározó; Fertő: Fertőrákosi-öböl, Kisherlakni) eredeti és hét napig a fentebb leírt módon Nap-szimulátorban fénykezelt vizével végeztük 2008 nyarán. Előbbi kísérletet B-vel, utóbbit NB-vel jelöltük. A kísérletekhez 4 liter vizet sterilre szűrtünk (GF-5 üvegszálás filteren előszűrés, 0,2 µm pórusméretű membránon szűrés), ennek felét először a mesterséges napfény előkezeléshez, másik felét a biológiai hozzáférhetőség kísérletek eredeti vízzel történő végzéséhez használtuk fel.

A szervesanyagok biológiai hozzáférhetőségének laboratóriumi vizsgálatakor SERVAIS *et al.* (1989) és WAISER & ROBERTS (2000) módszerét követtük. A sterilre szűrt vízmintákat saját bakterioplankton populációjukkal inokuláltuk (GF/C szűrlet) olyan hígítási arányban, hogy a kiindulási baktérium abundancia közelítően $0,25 - 0,5 \cdot 10^6$ sejt ml^{-1} legyen (KALBITZ *et al.*, 2003). Ehhez meghatároztuk az eredeti víz bakterioplankton abundanciáját. Ehhez epifluoreszcens mikroszkópi (Nikon Optiphot) technikát alkalmaztunk. A napfénykezelt mintákat frissen vett bakterioplanktonnal inokuláltuk. A hígítás mértéke leggyakrabban 10-szeres volt. Az inorganikus tápelemlimitáció elkerülése érdekében a kísérlet kezdetén szükség szerint tápelemeket, $\text{PO}_4\text{-P-t}$ (KH_2PO_4 formájában) és $\text{NO}_3\text{-N-t}$ (NaNO_3 formájában) adtunk a vizekhez, törekedve a közel hasonló kiindulási tápelem koncentráció ($\text{SRP} = 100 \mu\text{g l}^{-1}$, $\text{NO}_3\text{-N} = 1000 \mu\text{g l}^{-1}$) eléréséhez. Ehhez meghatároztuk a vízmintavételkor az eredeti tápelemkoncentrációkat. Az így előkészített kísérleti vizekből 3 párhuzamban előzőleg sterilizált 1 literes Erlenmeyer lombikokba 650 ml-t töltöttünk, melyeket sötétben rázógépen 26°C -on 28 napig inkubáltuk.

A kísérleti edényekből mintát vettünk a kísérlet kezdetén, majd a 3., 7., 14., 21., és 28. napon. A mintavételek idejére a lombikokat lamináris boksza helyezettük és a mintavételeket steril környezetben hajtottuk végre. Minden mintavételkor mértük a DOC koncentrációt és meghatároztuk a bakterioplankton mennyiségét.

A DOC koncentráció mérések alapján meghatároztuk a kétféle kísérleti variánsban (B és NB) kapott biológiailag hozzáférhető oldott szervesszén (BDOC) koncentrációt: $BDOC = DOC_0 - DOC_t$, ahol: DOC_0 = kiindulási DOC koncentráció; DOC_t = DOC koncentráció t inkubációs idő után. Meghatároztuk a BDOC bomlás sebességét exponenciális egyenlettel: $BDOC_t = BDOC_0 e^{-k}$, ahol: $BDOC_t$ = BDOC koncentráció t inkubációs idő után; $BDOC_0$ = a kísérlet végén meghatározott összes BDOC koncentráció; k = bomlási koefficiens, t = idő napokban. Meghatároztuk a BDOC bomlásának felezési idejét ($\ln 2 k^{-1}$). FBDOC jelölést használtunk a fénykezelt variánsoknál.

Eredmények

Az eredeti vízhez képest a hét napig fénykezelt vizekben csökkent a DOC-koncentráció (6. táblázat), ezért a kétféle kísérleti variáns kiindulási DOC koncentrációja eltért. E kiindulási értékekhez képest, míg a BDOC mennyisége (8. táblázat) 2-6%-ot tett ki, addig az FBDOC (9. táblázat) akár 10-20 %-ot is elért, ami azt jelenti, hogy a biológiailag hozzáférhető DOC mennyiség a vizsgált vizekben 2-5-szörösére nőtt. Ezzel arányosan nőtt a bomlási sebesség

illetve csökkent a felezési idő. Szoros szignifikáns összefüggést ($y=0,0169x+0,9258$; $r^2=0,9965$; $P< 0,001$) kaptunk az eredeti víz színkoncentrációja és az FBDOC koncentráció között, vagyis azokban a vizekben, ahol eredendően nagyobb a színes szervesanyagok koncentrációja, UV-sugárzás hatására több szervesanyag válhat hozzáférhetővé.

8. táblázat. A biológiailag hozzáférhető oldott szervesszén mennyisége és bomlásának sebessége eredeti vízzel végzett kísérletben

Mintavételi hely	BDOC mennyiség (t=21 nap)		BDOC bomlási sebesség (t=21 nap)	
	Koncentráció (mg l ⁻¹)	Részesedés (%)	k (nap ⁻¹)	Felezési idő (nap)
Siófoki-medence	0,26	2,93	0,1095	6,33
Keszthelyi-medence	0,53	5,57	0,1522	4,55
Kis-Balaton alsó t.	0,58	4,17	0,1078	6,43
Fertőrákosi-öböl	0,42	1,87	0,0800	8,66
Kisherlakni	2,72	5,77	0,1363	5,09

9. táblázat. A biológiailag hozzáférhető oldott szervesszén mennyisége és bomlásnak sebessége hét napig Nap-szimulátorban fényel előkezelt vízzel végzett kísérletben

Mintavételi hely	FBDOC mennyiség (t=21 nap)		FBDOC bomlási sebesség (t=21 nap)	
	Koncentráció (mg l ⁻¹)	Részesedés (%)	k (nap ⁻¹)	Felezési idő (nap)
Siófoki-medence	0,82	9,26	0,1703	4,07
Keszthelyi-medence	1,08	12,30	0,2076	3,34
Kis-Balaton alsó t.	2,61	21,20	0,1459	4,75
Fertőrákosi-öböl	2,38	11,53	0,2223	3,12
Kisherlakni	7,23	17,38	0,2104	3,29

Eredményeink igazolták, hogy felszíni vizekben a Nap ultraibolya sugárzása által indukált szervesanyag fotolízis és transzformáció eredményeként többszörösére nőhet a baktériumok számára hozzáférhető oldott szervesszén mennyisége.

Az oldott szervesszén, a bakterioplankton és az UV-indukálta hidrogénperoxid összefüggései

Módszerek

Vizsgált víztestek

A korábban kiválasztottak közül 17 víztestet (Gyékényesi kavicsbánya-tó Ny, Gyékényesi kavicsbánya-tó K, Balaton: Zala-torkolat, Keszthelyi-, Siófoki-medence (Tihany térsége); Fertő: Nyíltvíz, Kisherlakni, Nagyherlakni, Velencei-tó Ny, Velencei-tó K, Pécsi-tó, Kovácsszénájai-tó, Deseda-tározó, Marcali-tározó, Kis-Balaton felső tározó, Kis-Balaton alsó tározó, Szelidi-tó) vizsgáltunk.

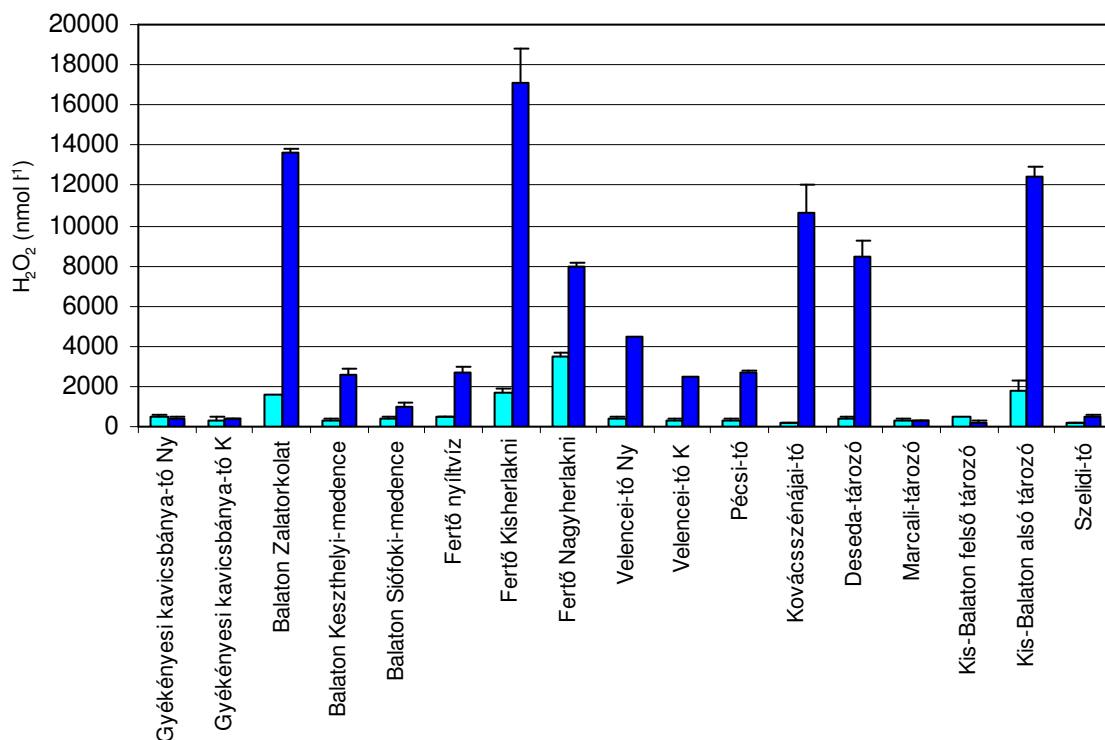
Terep és laboratóriumi mérések

2009 nyarán *in situ* mértük a vízalatti sugárzás intenzitását. Vízmintát vettünk, és laboratóriumban a következő komponensek meghatározását végeztük: TOC, DOC, POC, Pt-szín, lebegőanyagok, a-klorofill, fitoplankton, bakterioplankton. A H₂O₂ koncentráció mérését eredeti és 3 órán át besugárzott szűretlen vízből is elvégeztük. Az analízisekhez és meghatározásokhoz a fentebb leírtakkal megegyező módszereket használtuk.

Eredmények

Az összes szervesszén koncentráció értékek nagyságrendi eltérést mutattak, a legkisebb TOC érték 4,38 mg l⁻¹ (Gyékényesi kavicsbánya-tó), a legnagyobb 42,84 mg l⁻¹ (Kisherlakni) volt. A DOC koncentráció intervallum előbbtől alig különbözött (4,29 mg l⁻¹ - 42,36 mg l⁻¹). A DOC részesedése a vizek többségében domináns volt, van ahol akár 99%-ot tett ki. Kivételek a fitoplanktonban gazdag vizek (Kis-Balaton felső tározó - 300 µg l⁻¹, Marcali-tározó - 248 µg l⁻¹) ahol a DOC 52-53%-ban részesedett, és a POC döntő hányada algaeredetű volt. Ennek értelmében szignifikáns pozitív összefüggést ($y=0,0474 x + 0,7016$; $r^2=0,8625$; $P < 0,0001$) kaptunk a klorofill-a koncentráció és a POC koncentráció értékek között. Azokban a vizekben volt nagyobb a bakterioplankton biomassza, ahol a klorofill-a koncentráció, jelzi ezt a két változó közötti szignifikáns pozitív lineáris összefüggés ($y=0,1313 x + 0,7539$; $r^2=0,8339$; $P < 0,0001$) is.

A színintenzitás intervalluma $1,47 \text{ mg Pt l}^{-1}$ és 278 mg Pt l^{-1} értékek közötti volt, a szélső értékek helye megegyezett a DOC-éval, következésképpen nem meglepő, hogy a DOC és Pt-szín értékek között is szignifikáns pozitív összefüggést ($y=5,7462x - 36,352$; $r^2=0,6628$; $P < 0,0001$) találtunk. A kapott egyenlet azt is mutatja, hogy a nagyobb ($> 5,7 \text{ mg l}^{-1}$) DOC koncentrációjú vizek a színesek. Azokban a vizekben, ahol a színes szervesanyagok (CDOM) koncentrációja nagyobb volt, a fotolízis során több hidrogénperoxid képződött, a pozitív kapcsolat a két változó között szintén szignifikáns ($y=9,1542x + 254,4$; $r^2= 0,6208$; $P < 0,001$).



7. ábra Hidrogénperoxid koncentráció az eredeti vízben (világoskék) és három órás Nap-szimulátorban történő besugárzást (sötétkék) követően.

A hidrogénperoxid koncentráció (7. ábra) az eredeti vizekben 174 nM l^{-1} és 3444 nM l^{-1} között változott, a legnagyobb értéket a Nagyherlakniban találtuk. A természetben a H_2O_2 képződésében az ultraibolya sugárzás szerepét igazolja, hogy szoros lineáris kapcsolatot találtunk mind az UV-B (305nm) mind az UV-A (340nm) tartományba tartozó K_d értékek és a víz H_2O_2 koncentrációja között (sorrendben: $y=16,52x + 81,924$; $r^2= 0,5536$; $y=28,948x + 87,348$; $r^2= 0,5407$). PAR esetében ezt az összefüggést nem tudtuk kimutatni. Az ultraibolya sugárzás indukálta H_2O_2 képződésnek további szemléletes bizonyítéka, hogy már három órás besugárzást követően a legtöbb vízben nőtt (2 – 50 –szeres növekedés) a H_2O_2 koncentráció

(7. ábra). Kivételt e megállapítás alól kétféle víztípusnál találtunk, amelyekben nem nőtt a H_2O_2 koncentráció. Az egyik a kavicsbányatavak, amelyek oldott szervesanyagokban a legszegényebbek, a másik az algákban gazdag vizek (Kis-Balaton felső tározó, Marcali-tározó). Érdekes eredmény, hogy amennyiben úgy sugároztuk be ezeket a vizeket, hogy először algamentesre szűrtük, a H_2O_2 koncentráció növekedés 26 -39-szeres lett. Mivel korábbi eredményeink szerint az ultraibolya sugárzás elnyelésében a fitoplankton szerepe elenyésző, arra lehet következtetni, hogy a képződött H_2O_2 az algasejtek (és baktériumsejtek) oxidációjával eliminálódik. Természetes viszonyok között még azt is ki lehetett mutatni, hogy a víz H_2O_2 koncentrációjának növekedésével a bakterioplankton biomassza a vizsgált tavakban csökkent.

Eredményeink igazolják, hogy a napsugárzás (UV-sugárzás) hatása a bakterioplanktonra kettős, direkt gátló és indirekt gátló és serkentő hatás egyaránt érvényesülhet. A mikrobiális élőlényegyüttesek működésének megértése a CDOM fotolízisének ismerete nélkül nem lehetséges.

Irodalom

- ANDREAE, W. A. (1955) A sensitive method for the estimation of hydrogen peroxide in biological materials. *Nature* 175: 859-860.
- BERTILSSON, S., & B. ALLARD (1996) Sequential photochemical and microbial degradation of refractory dissolved organic matter in a humic freshwater system. *Arch. Hydrobiol. /Adv. Limnol.* 48: 133-141.
- CALDWELL, M. M., L. O. BJÖRN, J F. BORNMAN, S. D. FLINT, G. KULANDAIVELU, A. H. TERAMURA & M. TEVINI (1998) Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial ecosystems. *J. Photochem. Photobiol. B. Biology* 46: 40-52.
- COBLE, P. G., 1996. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation –emission spectroscopy. *Mar. Chem.* 51: 325-346.
- COLE, J. J., G. E. LIKENS & D. L. STRAYER (1982) Photosynthetically produced dissolved organic carbon: an important carbon source for planktonic bacteria. *Limnol. Oceanogr.* 27: 1080-1090.
- COOPER, W. J., D. R. S LEAN & J. H. CAREY (1989) Spatial and temporal patterns of hydrogen peroxide in lake waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 46: 1227-1231.

- CUTHBERT, I. D. & P. del GIORGIO (1992) Toward a standard method of measuring color in freshwater. *Limnol. Oceanogr.* 37: 1319-1326.
- FELFÖLDY L. (1980) A biológiai vízminőség. Vízügyi Hidrobiológia 9. VIZDOK, Budapest, 264 pp.
- GELLER, A. (1986) Comparison of mechanisms enhancing biodegradability of refractory lake eater constituents. *Limnol. Oceanogr.* 31: 755-764.
- HÄDER, D.-P., H. D. KUMAR, R. C. SMITH & R. C. WORREST (1998) Effects on aquatic ecosystems. *J. Photochem. Photobiol. B. Biology* 46: 53-68.
- HOBBIE, J. E., J. DALEY & S. JASPER (1977) Use of Nuclepore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.* 33: 1225-1228.
- JERLOV, N. G. (1950) Ultra-violet Radiation in the Sea. *Nature*, 166: 111-112.
- KALBITZ, K., J. SCHMERWITZ, D. SCHWESIG, E. MATZNER (2003) Biodegradation of solid-derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma*, 113: 273-291.
- KIEBER, R. J. & G. H. HELZ (1986) Two-method verification of hydrogen peroxide determinations in natural waters. *Anal. Chem.* 58: 2312-2315.
- LINDELL, M. J., W. GRANÉLI & L. J. TRANVIK (1995) Enhanced bacterial growth in response to photochemical transformation of dissolved organic matter. *Limnol. Oceanogr.* 40: 195-199
- MILLER, W. L. & G. ZEPP (1995) Photochemical production of dissolved inorganic carbon from terrestrial organic matter: Significance to the oceanic organic carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.* 22: 417-420.
- RECHE, I., M. L. PACE & J. J. COLE (1998) Interactions of photobleaching and inorganic nutrients in determining bacterial growth on colored dissolved organic carbon. *Microb. Ecol.* 36: 270-280.
- REYNOLDS, C. S. (1984) The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge University Press pp. 400.
- SALONEN, K. & A. VÄHÄTALO (1994) Photochemical mineralization of dissolved organic matter in lake Skjervatjern. *Environ. Int.* 20: 307-312.
- SERVAIS, P., A. ANZIL & C. VENTRESQUE (1989) Simple method for determination of biodegradable dissolved organic carbon in water. *Appl. Environ. Microbiol.* 55: 2732-2734.
- SMITH, R. C. & K. S. BAKER (1979) Penetration of UV-B and biologically effective dose-rates in natural waters. *Photochem. Photobiol.* 29: 311-323.

- STANDARD METHODS, 1995. Eaton, A. D., L. S. Clesceri & A. E. Greenberg (Eds.) 19th Edition American Public Health Association, Washington.
- TRANVIK, L. J. (1992) Allochthonous dissolved organic matter as an energy source for pelagic bacteria and the concept of the microbial loop. *Hydrobiologia* 229: 107-114.
- V.-BALOGH, K., E. KONCZ & L. VÖRÖS (2000) An empirical model describing the contribution of colour, algae and particles to the light climate of shallow lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **27**. 2678-2681.
- V.-BALOGH, K., B. NÉMETH. & L. VÖRÖS (2009) Specific attenuation coefficients of optically active substances and their contribution to the underwater ultraviolet and visible light climate in shallow lakes and ponds. *Hydrobiologia* **632**: 91- 105
- VÖRÖS, L., K. V.-BALOGH & N. TÓTH (2006) The attenuation of solar ultraviolet radiation in shallow waters – the role of chromophoric organic substances. (Eds: Frimmel, F. H. & G. Abbt-Braun) Proceedings of the 13th Meeting of the International Humic Substances Society. **45 – II**: 673-676.
- WAISER, M. J. & R. D. ROBERTS (2000) Changes in composition and reactivity of allochthonous DOM in a prairie saline lake. *Limnol. Oceanogr.* 45:763-774.
- WILLIAMSON, C. E., D. P. MORRIS, M. L. PACE & O. G. OLSEN (1999) Dissolved organic carbon and nutrients as regulators of lake ecosystems: Resurrection of a more integrated paradigm. *Limnol. Oceanogr.* 44: 795-803.