

Goda Zoltán<sup>1</sup>

## Szerves mikroszennyezők kockázatelemzése a parti szűrésen alapuló ivóvízellátásban

### Risk Assessment of Organic Micropollutants in Riverbank Filtration-Based Drinking Water Supply

A környezetünkben előforduló szerves mikroszennyezők az elmúlt néhány évtizedben kerültek a kutatások fókuszába. A jellemzően antropogén forrásból származó szennyezőanyagok felszíni vizekben történő megjelenése előrevetíti annak lehetőségét, hogy parti szűrésű vízbázisainkon keresztül e vegyületek bekerülnek az ivóvízellátó rendszerekbe, a fogyasztók számára egészségügyi kockázatot jelentve. A közelmúltban zajlott kutatások rámutattak, hogy e szennyezőanyagok a Dunában és a folyóhoz kapcsolódó fővárosi parti szűrésű vízbázisokban is jelen vannak. E kutatások eredményei alapján, illetve a nemzetközi szakirodalomban publikált, ivóvízre vonatkozó egészségügyi indexek felhasználásával kiszámítható az egyes vegyületek kockázati tényezője. Ezzel tulajdonképpen számszerűsíthető a szerves mikroszennyező anyagok fogyasztókra gyakorolt kockázatának mértéke. Ebben a cikkben a szerző a Budapest ivóvízellátását biztosító ivóvízbázisok és a szerves mikroszennyezők kapcsolatát, kockázatait elemzi. A kockázati tényezők ismeretében meghatározható azon szerves szennyezőanyagok csoportja, amely a jövőben nagyobb figyelmet és folyamatos nyomon követést igényel.

**Kulcsszavak:** parti szűrés, szerves mikroszennyezők, ivóvízellátás, ivóvízbázisok, kockázatelemzés

Organic micropollutants present in our environment have come into focus of research over the past few decades. These pollutants are typically of anthropogenic origin. Their appearance in surface waters foresees the possibility that these compounds enter the drinking water supply systems through bank filtration, posing a health risk to consumers. Recent studies have proven that these pollutants are also present in

<sup>1</sup> Nemzeti Községi Egység Víztechnológiai Kar, tudományos segédmunkatárs, e-mail: [goda.zoltan@uni-nke.hu](mailto:goda.zoltan@uni-nke.hu), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4164-473X>

the Danube River as well as in the bank filtered water bodies. Based on these results and by using health indices for drinking water published in the international literature, the risk quotient of each compound can be calculated. In fact, this quantifies the risk of organic micropollutants to consumers. In this article, the author analyzes the relationship and risks of organic micropollutants and the drinking water sources of Budapest. By knowing the risk quotients, it is possible to identify the group of organic micropollutants that will require more attention and continuous monitoring in the future.

**Keywords:** riverbank filtration, organic micropollutants, drinking water supply, water resources, risk assessment

## 1. Bevezetés

Az emberiség számára elérhető édesvízkészletek állapotának naprakész figyelemmel követése mára kiemelt környezetvédelmi feladattá vált. Az édesvízkészletek mennyiségi és minőségi állapota az emberi életminőség egyik indikátora, hiszen azon túlmenően, hogy az egészséges élet egyik alapvető feltétele, a gazdaság gyakorlatilag minden szektorára jelentős hatással van. Ha globális helyzetértékelést teszünk, akkor elmondható, hogy az elérhető vízkészletek mennyiségi és minőségi mutatói egyaránt romló tendenciát mutatnak. A túlnépesedés hatására a vízigény is növekszik, de az egy főre vetített fogyasztás is emelkedő tendenciát mutat, amely szintén növekvő vízigényt jelent. Ebből adódóan a vízigény számított és extrapolált görbéjének meredeksége meghaladja a populáció görbáját, hiszen a vízigény növekedése két tényezőn alapul. Maradva a globális kitekintésnél kijelenthető, hogy az elérhető édesvízkészletek állapota jelentős szélsőségeket mutat, hiszen egy, a túlhasználat és szennyvizek által jelentősen terhelt ázsiai folyó vízminősége nagyságrendekkel rosszabb, mint egy észak-európai vagy egy kanadai folyóé. Az egyik mérőszám, amellyel egy víztest terheltsége jól jellemezhető, a szerves mikroszennyezők koncentrációja, hiszen ezek szinte teljes mértékben antropogén forrásból kerülnek a környezetbe. Amennyiben e szennyezőanyagok környezeti előfordulása jelentős, elérhetik a vízbázisokat, és ezáltal kockázatot jelenthetnek az emberi egészségre, életminőségre. Ebben a munkában a szerves mikroszennyezők parti szűrésű vízbázisokra és az általuk ellátott fogyasztók egészségére gyakorolt kockázatát elemzem. Olyan kockázatbecslő módszert mutatok be, amelyekkel a kockázat mértéke számszerűsíthető, és amelyeket Európában már többfelé sikerrel alkalmaztak. Tekintve, hogy a szerves mikroszennyezők hazai vizekben történő előfordulásával kapcsolatosan ma már hiteles adatsorok állnak rendelkezésre, a kockázatelemzés a hazai vízbázisok és a magyar lakosság esetében is elvégezhető.

## 2. Szerves mikroszennyezők előfordulása és viselkedése a környezetben

Szerves mikroszennyezőknek azokat a vegyületeket nevezzük, amelyek literenként akár mikrogrammnyi koncentrációban is negatívan befolyásolják a víz felhasználhatóságát,

fogyaszthatóságát, ökológiai paramétereit.<sup>2</sup> Sokukra jellemző, hogy perzisztens, azaz biológiailag nem vagy csak nehezen bontható vegyületek, és a szennyezőforrástól jelentős távolságra képesek eljutni gyakorlatilag változatlan formában. A transzmisszió során koncentrációjuk csökkenhet, ami részben a hígulásnak, részben pedig a különböző degradációs folyamatoknak köszönhető. Fontos azonban látni, hogy a kémiai és biológiai átalakulás szekunder szennyezőanyagok megjelenését jelentheti, amelyeknél akár jelentősebb toxicitás tapasztalható, mint a kiindulási vegyület esetében. A mikroszennyezők alapvetően két csoportba, szerves és szerves mikroszennyezők csoportjába sorolhatók. A szerves mikroszennyezők közé soroljuk többek között a vas- és mangánvegyületeket, nehézfémeket, az arzén szervesetlen módosulatait, amelyek főleg felszín alatti vizek anaerob környezetében fordulnak elő.

A szerves mikroszennyezők köre igen jelentős számú és eltérő tulajdonságú vegyületet foglal magában, ami megnehezíti vizsgálatukat, kutatásukat, eltávolítási lehetőségüket. E szennyezőanyagok jellemzően az alábbi csoportokba sorolhatók:

PPCP-k<sup>3</sup> (gyógyszerek és testápolási termékek),

- peszticidek,
- felületaktív anyagok,
- égésgátlók,
- égési termékek és melléktermékek,
- üzemanyag-adalékanyagok,
- perfluorozott anyagok (PFC),
- élelmiszer-adalékanyagok,
- poliklórozott bifelnilek,
- biszfenolok,
- algatoxinok stb.<sup>4</sup>

A fejlődő analitikai módszereknek és technológiáknak köszönhetően egyre nagyobb számú vegyület kimutatására adódik lehetőség, egyre alacsonyabb (akár néhány ng/l) koncentráció mellett. E jellemzően kis koncentrációban előforduló szerves szennyezőanyagokra a nemzetközi tudományos szaknyelv az emerging pollutants (EP), illetve a contaminants of emerging concern (CEC) kifejezéseket használja, amelyeket „új szennyezők” és „növekvő aggodalomra okot adó szennyezők” kifejezésekkel emelhetünk át a magyar szakkifejezések közé. E meghatározások találóan utalnak e szerves szennyezőanyagokra, hiszen ezek újszerű megjelenésükből vagy pedig korábbi mérhetősségi hiányukból adódóan nem esnek nemzetközi szabályozások alá, nem részei a rutin monitoringprogramok által vizsgált vegyületcsoportoknak, és vonatkozásukban ezidáig sem környezetminőségi, sem pedig ivóvízminőségi határértékeket nem állapítottak meg. Mindezek ellenére e vegyületek mind a környezet minőségére, mind pedig az emberi egészségre gyakorolt feltételezhető hatásuk miatt valóban aggodalomra adhatnak okot.

<sup>2</sup> Goda Zoltán – Knisz Judit – Mátrai Ildikó – Vadkerti Edit: A szerves mikroszennyező csoportok részletes bemutatása. In Knisz Judit (szerk.): *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2020.

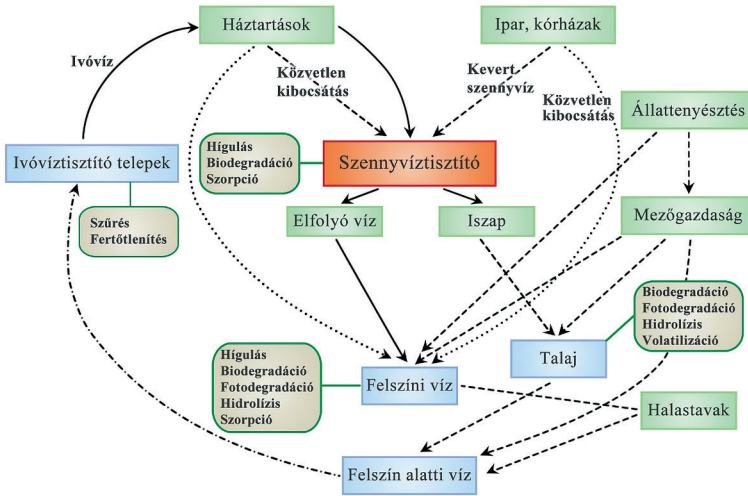
<sup>3</sup> PPCPs: Pharmaceuticals and personal care products.

<sup>4</sup> Knisz Judit – Vadkerti Edit: A szerves mikroszennyezők előfordulása, sorsa és hatása a környezetben. In Knisz Judit (szerk.) *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2020.

Az új szennyezők tehát nem feltétlenül az utóbbi években jelentek meg a környezetünkben, de a kémiai analitika ezidáig nem volt képes az alacsony vagy nagyon alacsony koncentrációban jelen lévő vegyületeket kimutatni, mennyiségüket meghatározni. Az utóbbi évtizedekben a tudományos közösség fókuszja azonban egyre inkább elmozdult az új szennyezők felé.

### 2.1. Szerves mikroszennyezők előfordulása a környezetben

A szerves mikroszennyezők közös jellemzője, hogy az esetek jelentős többségében antropogén eredetűek, azaz előfordulásuk jelenlegi vagy múltbéli emberi tevékenységhez köthető. Persze ismerünk természetes eredetű szerves mikroszennyező anyagokat is, amelyek szerves anyagok bomlásából vagy éppen vulkanikus folyamatok eredményeképpen kerülnek a környezetbe, de e cikk célját követve az antropogén eredetű vegyületekre fókuszálunk. Ezek leggyakoribb forrásait és jellemző útjait a következő ábra mutatja be.



1. ábra

A szerves mikroszennyezők forrásai és sorsuk a környezetben.

Forrás: Knisz–Vadkert (2020) i. m.

Tekintve, hogy a hazai ivóvíztermelés jelentős része parti szűrésű vízbázisokon alapul, mindenképpen érdemes vizsgálni a szerves mikroszennyezők jelenlétét a hozzájuk kapcsolódó felszíni víztestekben. A felszíni vizeink szennyezőforrásai többek között a kommunális és ipari szennyvízbevezetések, a hulladéklerakókról és mezőgazdasági területekről eredő bemosódások és a haváriaesemények. Szennyvízkezelésünk sokat fejlődött az elmúlt évtizedek során, a korábban kezeletlen vagy csak egy lépcsőben kezelt szennyvizek ma bár biológiai tisztítási fokozatot követően kerülnek a befogadóba. Fontos

azonban kihangsúlyozni, hogy egyes szerves mikroszennyezők, így például a gyógyszer-maradványok esetében a biológiai szennyvíztisztítás sem elégséges, csak bizonyos technológiák, mint a mozgóágyas biofilmreaktor (MBBR)<sup>5</sup> vagy összetett, membránszűréssel kombinált harmadik tisztítási fokozat üzemeltetésével lehetne elérni egyes vegyületek elfogadható mértékű visszatartását.<sup>6</sup> A hazai felszíni vizekben előforduló mikroszennyezőkről ma már hiteles adatsorok állnak rendelkezésünkre, és az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a Dunában – más európai folyókhoz hasonlóan – e vegyületek változó koncentrációban, de jelen vannak, és kimutathatók, mennyiségük pedig jól meghatározható.<sup>7</sup> Figyelembe véve, hogy hazánk legnagyobb folyója mentén számos üzemelő és távlati parti szűrésű vízbázis található, amelyek folyamatos kapcsolatban vannak a felszíni víztesttel, a szerves mikroszennyezők vízbázisainkra gyakorolt kockázata nem elhanyagolható. Ebből adódóan érdemes, sőt szükséges kockázatelemzést készíteni a szerves mikroszennyezők parti szűrésű vízbázisokra gyakorolt kockázatainak meghatározására. Ha ezt az elemzést kibővítjük a kommunális ivóvízfogyasztás és az emberi egészségre gyakorolt hatás mérőszámaival, akkor valós eredményeket kapunk a szerves mikroszennyezők fogyasztókra gyakorolt kockázatáról is.

### 3. Szerves mikroszennyezők és a parti szűrésű vízbázisok kapcsolata

Magyarországon a víztermelés több mint harmada parti szűrésű vízbázisokon alapul, amelyek közös jellemzője, hogy valamely felszíni víztesttel – hazánkban kivétel nélkül folyóval – közvetlen és dinamikus kapcsolatban állnak, és ez a kitermelhető víz minőségére és mennyiségére egyaránt hatással van.<sup>8</sup> Parti szűrésű vízbázisok üzemelnek többek között a Duna, az Ipoly, a Dráva, a Hernád és a Rába folyók mentén. A főváros mintegy 800 kútjait parti szűrésű vízbázisokból termeli a vizet. A hazai vízellátás tehát jelentős mértékben támaszkodik e vízadókra, és ez nem véletlenül alakult így. A parti szűrésű vízbázis kútjait a folyómederhez közel, jó vízvezető képességű alluvialis kavicsteraszon alakítják ki. A parti szűrés folyamata során a felszíni víz ezen a néhányszor tíz, esetleg száz méter vastag kavics, durva szemű homokrétegen átszűrődve jut el a víztermelő kútba. A folyó vizének a mederágyba történő beszivárgása és a kút irányába történő áramlása a természetes mozgások mellett főleg a víztermelés hatására következik be. A szivárgás során olyan mechanikai, fizikai-kémiai és mikrobiológiai folyamatok zajlanak le, amelyek hatására a felszíni víz lebegő- és szervesanyag-tartalma jelentős mértékben csökken, valamint mikrobiológiai paraméterei akár több nagyságrenddel is javulhatnak.<sup>9</sup> A 2. ábra a parti szűrés alapvető folyamatait foglalja össze.

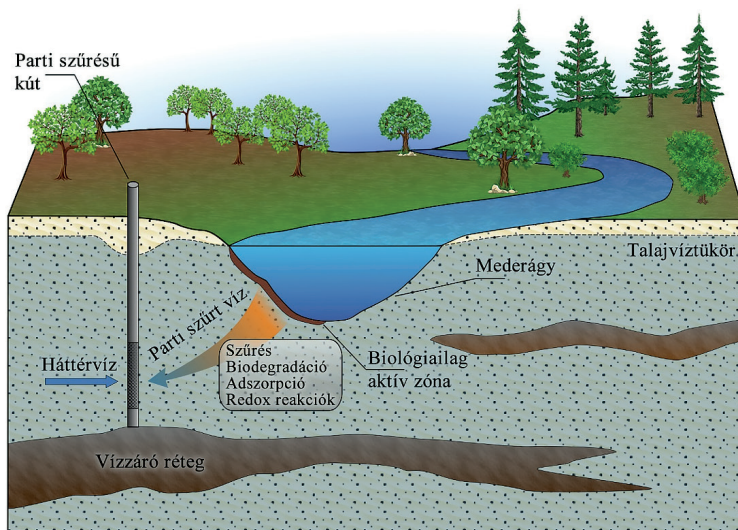
<sup>5</sup> MBBR: moving bed biofilm reactor.

<sup>6</sup> Ben Weiwei et alii: Occurrence, removal and risk of organic micropollutants in wastewater treatment plants across China: Comparison of wastewater treatment processes. *Water Research*, (2018), 130. 38–46.

<sup>7</sup> Zsuzsanna Nagy-Kovács et alii: Behavior of Organic Micropollutants During River Bank Filtration in Budapest, Hungary. *Water Research*, 10. (2018), 12.; Attila Csaba Kondor et alii: Occurrence of pharmaceuticals in the Danube and drinking water wells: Efficiency of riverbank filtration. *Environmental Pollution*, (2020), 265.

<sup>8</sup> Központi Statisztikai Hivatal: *A felszín alóli víztermelés víztípusok szerint (1985–)*. Budapest, 2018.

<sup>9</sup> Kevin. M. Hiscock – Thomas Grischek: Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Journal of Hydrology*, 266. (2002), 3. 139–144.



2. ábra

*A parti szűrés alapvető folyamatai.*

Forrás: Goda Zoltán: Szerves mikroszennyezők előfordulása ivóvízbázisokban. In Knisz Judit (szerk.): *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2020.

Ez a vízminőség-javulás, koncentrációcsökkenés a szerves mikroszennyezők esetében is tapasztalható, azonban a különböző vegyületek esetében jelentős eltérés mutatkozik az eltávolítás határfokában.

### 3.1. Szerves mikroszennyezők előfordulása hazai felszíni vizekben

Egy 2016 és 2019 között zajló nemzetközi projekt során végzett kutatásban a Fővárosi Vízművek kutatói szerves mikroszennyezők jelenlétét vizsgálták a Dunában és a budapesti parti szűrővíz vízbázisokban.<sup>10</sup> A kutatás két üzemelő vízbázist érintett, a Szentendrei-szigeten található északi vízbázis, valamint a Csepel-szigeten Ráckeve és Szigetszentmiklós között elhelyezkedő déli vízbázis kútjaiban történt mintavételezés. A két vízbázis között elhelyezkedésük mellett lényeges különbség a kutak medertől való távolsága, amely a Csepel-szigeti vízbázis esetében nagyobb. A kutatásban 36 szerves mikroszennyezőt vizsgáltak, két felszínvíz-mintavételi ponton és két kútban. Az eredményeket összehasonlítva az egyes mikroszennyezőkre megállapítható volt az eltávolítás határfoka. A vizsgált mikroszennyezők közül tizenkettőt csak a Dunából vett vízmintákban sikerült kimutatni, a parti szűrt vízben nem voltak jelen, vagy csak a kimutathatósági határérték alatti koncentrációban. 12 vegyület kimutatható volt a felszíni és a szűrtvíz-mintákban egyaránt. Ezek koncentrációjának változása a parti

<sup>10</sup> Zsuzsanna Nagy-Kovács et alii (2018) i. m.

szűrés folyamatában tág határok között mozgott. A metazaklór növényvédőszer esetében a szentendrei-szigeti vízbázison 78%-os eltávolítási hatásfokot sikerült kimutatni, míg ezen vegyület koncentrációja a Csepel-szigeti vízbázison csak 12%-kal csökkent. Jelentősebb eltávolítás a benzotriazol esetében volt mérhető (69% és 43%), míg legkisebb arányban a szulfametoxazol nevű antibiotikum-hatóanyag koncentrációja csökkent. A műanyagipar által előszeretettel használt biszfenol-A koncentrációja egyes esetekben a kutakban gyakorlatilag változatlan koncentrációban volt kimutatható a felszíni vízhez képest. A kutatás lefontosabb megállapítása az volt, hogy a Dunában 6-1142 ng/l, a parti szűrésű kutakban pedig LOQ<sup>11</sup>-686 ng/l koncentrációban fordultak elő a vizsgált szennyezők. Legnagyobb koncentrációban a cefepim antibiotikum és a metazaklór növényvédőszer, míg a szulfametoxazol antibiotikum alacsonyabb, a kimutathatósági határhoz közeli koncentrációban volt jelen a felszíni víztestben.

Hasonló kutatást végzett Kondor és munkatársai<sup>12</sup> a Szentendrei-szigeten és a főváros területén kijelölt mintavételi pontokon. A vizsgált 111 féle gyógyszerhatóanyagból 52 volt jelent a Dunából vett vízmintákban, és 32 a parti szűrésű kutak nyersvizében. A parti szűrés hatékonysága a vizsgált gyógyszermaradványok eltávolításában 25% és 95% között mutatkozott, illetve 20 vegyület nem jelent meg a kutakban, azaz esetükben az eltávolítás hatásfoka közel 100%-nak tekinthető. A Dunában jelentősebb mennyiségben fordult elő koffein, karbamazepin (antidepresszáns), lamortigin (epilepszia-gyógyszer), diklofenák (nonszteroid gyulladáscsökkentő) és paracetamol (fájdalomcsillapító). A vizsgált vegyületek koncentrációja 0,4 és 3400 ng/l értékek között volt mérhető. A parti szűrésű kutak által termelt vízben többek között koffein, kvetiapin (antipszichotikus hatóanyag), tramadol (opioid fájdalomcsillapító) fordult elő 0,1 és 22 ng/l koncentrációértékek között.

A fenti két kutatással párhuzamosan, 2017 és 2018 között a lengyelországi Warta folyóban és Poznan város vízellátását biztosító parti szűrésű kutak által termelt nyersvízben vizsgáltak néhány kiválasztott szerves mikroszennyezőt.<sup>13</sup> A kutatás itt is egyértelmű összefüggést mutatott a mikroszennyezők koncentrációja és a kutak folyótól való távolsága, azaz a szivárgási úthossz között. A jelentősebb koncentrációban előforduló mikroszennyezők a benzotriazol (fagyálló-adalékanyag), a karbamazepin, a koffein és a szukralóz (édesítőszer) voltak. Egyes vegyületek mérhető koncentrációja egyértelműen csökkent a folyómedertől való távolsággal, de bizonyos vegyületek esetében, mint a karbamazepin, a szulfametoxazol vagy a szukralóz, csupán kisebb mértékű változás volt kimutatható. A Warta folyóban mért szerves szennyezőanyag-koncentrációk 15-485 ng/l értékek között változtak, míg a folyóhoz legközelebbi parti szűrésű, horizontális kútban ugyanezen vegyületek koncentrációja LOQ és 184 ng/l között volt mérhető.

A fenti kutatások eredményei egyértelműen kimutatták, hogy a parti szűrés hatékonyan mondható a szerves mikroszennyezők eltávolításában, de egyes vegyületek akár jelentősebb koncentrációban elérhetik a parti szűrésű vízbázisok kútjait. Ebben az esetben viszont bekerülhetnek az ivóvízellátó rendszerbe, és eljuthatnak

<sup>11</sup> LOQ – Limit Of Quantification, kimutathatósági határérték alatti mennyiségű.

<sup>12</sup> Attila Csaba Kondor et alii (2020) i. m.

<sup>13</sup> Kryztof Dragon et alii: Removal of Natural Organic Matter and Organic Micropollutants during Riverbank Filtration in Krajkowo, Poland. *Water*, 10. (2018), 10.

a fogyasztókhoz is. A kérdés tehát az, hogy a szerves mikroszennyezők ebben a koncentrációtartományban mekkora kockázatot jelenthetnek a fogyasztókra. Ehhez szükséges egy jól megalapozott kockázatértékelés elkészítése. Jelen tanulmányban a kockázatértékelés elvégzéséhez a kockázati tényező meghatározásának módszerét alkalmaztam.

#### 4. Kockázati tényező meghatározása

A kockázati tényező meghatározását elsősorban környezeti kockázatbecslések esetén szokták alkalmazni. A kockázati tényező számítása ebben az esetben viszonylag egyszerű, tulajdonképpen két jól meghatározható érték hányadosából számítható.

##### 4.1. Kockázati tényező meghatározása környezeti kockázatbecslés esetén

Szerves mikroszennyezők esetében a környezetre jelentett kockázat mértékét a kockázati tényezővel ( $RQ/HQ$ )<sup>14</sup> számszerűsíthetjük. Ezzel egy olyan dimenzió nélküli számot kapunk, amely magában foglalja egy szennyezőanyag becsült vagy mért környezeti koncentrációját és azt a számított koncentrációt, amelynél negatív hatás még nem alakul ki. Egy adott vegyület környezeti kockázatának mértékét az alábbi képlettel számíthatjuk:

$$RQ = \frac{PEC}{PNEC}$$

A kockázati tényező tehát a becsült környezeti szennyezőanyag-koncentráció ( $PEC$ )<sup>15</sup> és az ökoszisztémára még nem ható becsült koncentráció ( $PNEC$ )<sup>16</sup> hányadosa. Egyes esetekben a  $PEC$  helyettesíthető a  $MEC$ ,<sup>17</sup> azaz a mért környezeti koncentráció értékével, amennyiben ezek az adatok rendelkezésre állnak. Minél nagyobb az  $RQ$  értéke, annál nagyobb a kockázat, amit a környezetbe került szerves mikroszennyező jelent. Ha az  $RQ$  értéke kisebb, mint 1, akkor nincs szükség beavatkozásra, hiszen a koncentráció kisebb a káros hatást kifejtő mennyiségnél, ám ha ez az érték nagyobb, mint 1, akkor további lépések, kockázatcsökkentő intézkedések lehetnek szükségesek.<sup>18</sup> Az  $RQ$  meghatározásának folyamata a 3. ábrán látható.

<sup>14</sup>  $RQ$  – Risk Quotient,  $HQ$  – Hazard Quotient.

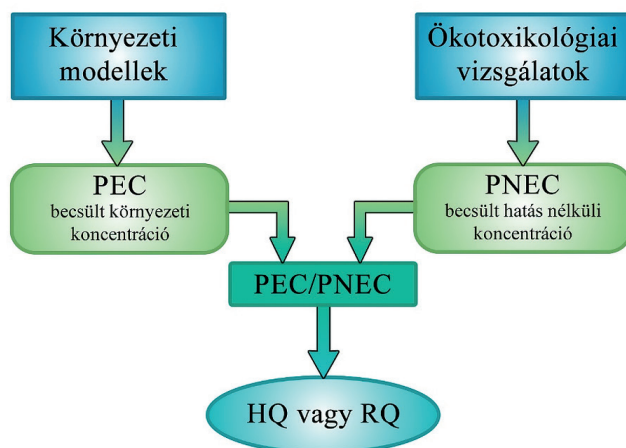
<sup>15</sup>  $PEC$  – Predicted Environmental Concentration.

<sup>16</sup>  $PNEC$  – Predicted No Effect Concentration.

<sup>17</sup>  $MEC$  – Measured Environmental Concentration.

<sup>18</sup> Ivy Chai Ching Hsia et alii: *Using CHARM Modelling to Decide the use and Discharge of Surfactant at an Offshore EOR Project*. 2018. november.





3. ábra

*A PEC/PNEC és a HQ/RQ összefüggései.*

Forrás: Ivy Chai Ching Hsia et alii (2018) i. m. alapján saját szerkesztés

A kockázati tényező tehát jól alkalmazható egy szennyezőanyag környezeti kockázatának meghatározására. Némi átalakítással ez a módszer az ivóvízellátásra, azaz a fogyasztók egészségére jelentett kockázat mértékének meghatározására is alkalmas.

#### 4.2. Kockázati tényező meghatározása az ivóvízellátásban

A szerves mikroszennyezők tehát a környezetből az ivóvízbázisokon keresztül bejuthatnak az ivóvízkezelő és -elosztó rendszerekbe, így az ivóvízzel eljuthatnak a fogyasztókhoz is. Éppen ezért kiemelten fontos e vegyületek és az ivóvízellátás lehetséges kapcsolatainak és kockázatainak vizsgálata. Ebből a szempontból a különböző típusú vízbázisok eltérő kockázatot jelentenek. Felszíni vízbázisok esetén az ivóvízkezelő technológiára kerülő nyersvízben mérhető szennyezőanyag-koncentráció megegyezik a felszíni víztestben mérhetővel, hiszen itt nem játszanak szerepet a koncentráció csökkenésére irányuló természetes folyamatok. Parti szűrés esetében a mederfalban lezajló fizikai, biológiai és kémiai folyamatok változó mértékű redukciónak jelentenek a szerves mikroszennyezők esetében.<sup>19</sup>

Jóllehet számos tanulmány létezik a szerves mikroszennyezők jelentős csoportját alkotó gyógyszermaradványok ivóvízben való jelenlétével kapcsolatban, az ivóvízellátó rendszerek szisztematikus monitorozási programját ezidáig nem hajtották végre. Ezenkívül viszonylag kevés tudományos kockázatértékelési tanulmány készült az ivóvízben alacsony koncentrációban észlelt gyógyszerek expozíciójáról. Az Egészségügyi Világszervezet (WHO) *Gyógyszerkészítmények az ivóvízben* című jelentésében az ivóvízben lévő gyógyszermaradványok emberi egészségre gyakorolt

<sup>19</sup> Zsuzsanna Nagy-Kovács et alii (2018) i. m.; Kryztof Dragon et alii (2018) i. m.

kockázatainak áttekintésére összpontosított. Az Egyesült Királyságban, Ausztráliában és az Amerikai Egyesült Államokban három, az emberi egészségre vonatkozó kockázatelemzést végeztek, és az eredmények alapján a WHO arra a következtetésre jutott, hogy az ivóvízben alacsony koncentrációban található gyógyszerek emberi egészségre gyakorolt negatív hatása nem jelentős, illetve bármilyen káros hatás valószínűsége nagyon alacsony.<sup>20</sup>

Egy portugál kutatásban 31 féle, különböző terápiás osztályba tartozó gyógyszert analizáltak, a vizsgált vegyületek kiválasztása a fogyasztási adatok, a környezeti előfordulás, a toxicitás, valamint a perzisztencia alapján történt.<sup>21</sup> A kockázatelemzés során itt is a kockázati tényező (RQ) számítása történt, az egyenlet azonban a környezeti kockázatelemzésnél használt változattól eltérően épült fel.

$$RQ = \frac{C_s}{DWEL}$$

A  $C_s$  értéke a mintákban mért koncentrációval egyezik meg, a nevező DWEL<sup>22</sup> értéke pedig az úgynevezett ivóvíz-egyenérték, amely több komponensből számítható, és a feltételezhető egészségügyi hatást hivatott reprezentálni. Az egészségügyi hatás korcsoportonként eltérő, ezért a DWEL meghatározása az EPA,<sup>23</sup> azaz az Amerikai Környezetvédelmi Ügynökség által publikált útmutató alapján történt.<sup>24</sup> A DWEL olyan tényezőket vesz figyelembe, mint az elfogadható napi bevitel, az adott életkorra jellemző testtömeg, a felszívódás mértéke, valamint a feltételezett egészségügyi hatás.<sup>25</sup> A DWEL egyik számítási módszere az ADI, azaz az elfogadható napi bevitel értékével számol az alábbi képlet szerint.

$$DWEL = \frac{ADI \times 70kg}{2,4 L}$$

Ezzel adott testsúlyra és az elfogyasztott ivóvíz mennyiségére vonatkozóan meghatározható az a koncentráció, amely hosszú távon sem okoz egészségügyi problémát a fogyasztónál.

Az említett portugál kutatásban vizsgált két felszíni vízben (Tagus és Zêzere folyók), valamint a felszín alatti vízrétegekben a gyógyszermaradványok koncentrációja 0,03 ng/L és 46 ng/L között változott. Legmagasabb koncentrációban a koffein volt kimutatható, de hasonló értékeket az indometacin nevű nem szteroid gyulladáscsökkentő, az eritromicin nevű makrolid antibiotikum, valamint az acetaminofen, más

<sup>20</sup> World Health Organization: *Guidelines for Drinking Water Quality*. Geneva, Svájc, 2011.

<sup>21</sup> Vanessa de Jesus Gaffney et alii: Occurrence of pharmaceuticals in a water supply system and related human health risk assessment. *Water Research*, (2015), 72. 199–208. 2015.

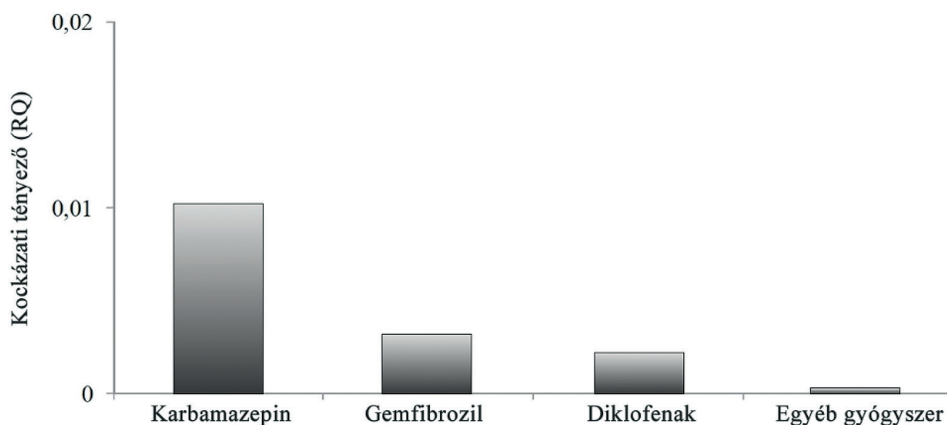
<sup>22</sup> Drinking Water Equivalent Level.

<sup>23</sup> United States Environmental Protection Agency.

<sup>24</sup> EPA: *Guidance on Selecting Age Groups for Monitoring and Assessing Childhood Exposures to Environmental Contaminants*. Risk Assessment Forum, EPA/630/P-03/003F., U.S. Environmental Protection Agency, Washington, 2005.

<sup>25</sup> EPA: *2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington. 2018.

néven paracetamol gyógyszerek esetében mértek. Az ivóvízből származó mintákban a 31 féle gyógyszerből csupán 7 volt jelen, többek között a koffein, karbamazepin (antidepresszáns), gemfibrozil (koleszterincsökkentő) vagy a diklofenak (gyulladás-csökkentő) gyógyszerek. A fenti képletet alkalmazva megállapítható volt, hogy az RQ értéke az egyes detektált gyógyszerek esetében 0,0001 és 0,01 között változott, azaz nagyságrendekkel a kritikus 1,0 érték alatt maradt (4. ábra).



4. ábra

*Kockázati tényezők egyes gyógyszerek esetében.*

Forrás: Vanessa de Jesus Gaffney et alii (2015) i. m.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a vizsgált gyógyszermaradványok közül bár több is detektálható és mérhető volt az ivóvízben, ezek emberi egészségre gyakorolt kockázata nagyon alacsony. Fontos azonban rámutatni, hogy e vegyületek bomlás-termékeiről, illetve szinergikus, esetleg additív hatásairól még mindig meglehetősen hiányos a tudásunk, és kevés tudományos eredmény áll rendelkezésünkre.

#### 4.3. Kockázati tényező meghatározása hazai adatsorok alapján

Az előző fejezetben bemutatott képletet alkalmazva, a Budapest vízbázisaiban mért koncentrációértékekből kiszámítható az RQ, azaz a kockázati tényező értéke. A kockázatelemzésnél jellemző az úgynevezett „worst case scenario”, azaz a legrosszabb forgatókönyv alkalmazása. Ez alapján a két hazai kutatás eredményeit felhasználva a legmagasabb mért koncentrációértékekkel dolgoztam, még abban az esetben is, ha a mintaátlag ennél jóval, akár egy-két nagyságrenddel alacsonyabbnak bizonyult. A következő táblázat az általam vizsgált vegyületek DWEL-értékeit foglalja össze.

1. táblázat

*Ivóvíz-egyenértékek (DWEL) egyes szerves mikroszennyezők esetében különböző korcsoportokra vonatkozóan.*

Forrás: S Snyder, S. A. et alii: *State of Knowledge of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals in Drinking Water*. Denver, Awwa Research Foundation, 2008.; Robert C. Benson et. al.: Human health screening and public health significance of contaminants of emerging concern detected in public water supplies. *The Science of the total environment*, (2017), 579. 1643–1648.

Szerves mikroszennyező	DWEL-érték					
	0–3 hónap	6–12 hónap	3–6 év	11–16 év	16–18 év	Felnőtt
Karbamazepin	1,52	2,48	5,12	9,19	10,08	9,19
Diklofenák	6,7	13	27	49	54	49
Szulfametoxazol	542	1075	2220	3983	4368	3983
Riszperidon	0,08	0,16	0,32	0,49	0,61	0,49
Koffein	625	1240	2561	4596	5040	4596
Diazepam	5,83	11,66	23,32	35,0	41,0	35,0
Metoprolol	37	73	144	223	243	223
Metolaklór-ESA	54	102	201	323	343	323
Biszfenol-A	305	605	1150	1800	1890	1800

A fenti táblázatból jól látható, hogy a gyógyszermaradványok – és általában a szerves mikroszennyezők — ivóvízzel történő fogyasztására a 0–3 hónapos korosztály a legérzékenyebb. E korcsoport érzékenysége mintegy hatszorosa a felnőtt korosztálynak. A korábbi fejezetekben részletezett két kutatás eredményeit felhasználva, a mért maximális koncentrációértékekből kiszámítható a kockázati tényező (RQ) (2. táblázat).

2. táblázat

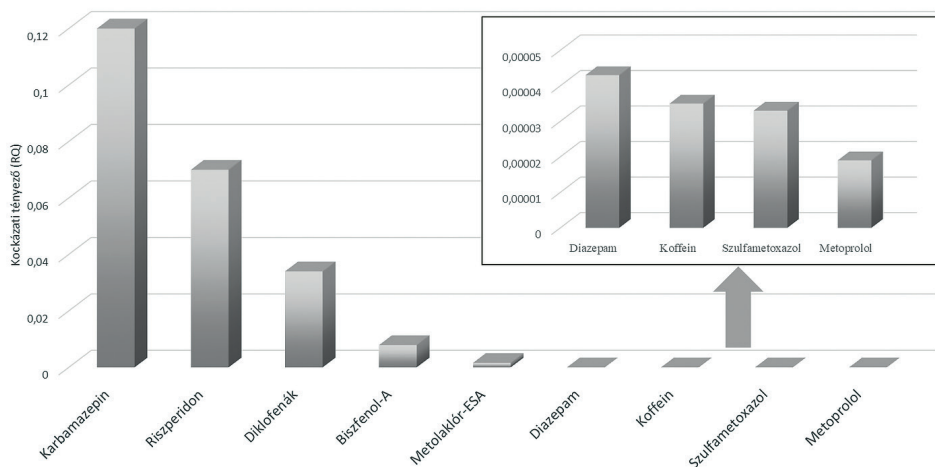
*A budapesti ivóvízbázis kútjaiban mért maximális koncentrációértékek és számított kockázati tényezők egyes szerves mikroszennyezők esetében.*

Forrás: a szerző szerkesztése

Szerves mikroszennyező	Mért maximális koncentráció <sup>26</sup> ng/L	Kockázati tényező (RQ) 0–3 hónapos csecsemőkre	Kockázati tényező (RQ) felnőttekre
Karbamazepin	176	0,12	0,019
Diklofenák	231	0,034	0,0047
Szulfametoxazol	18	0,000033	0,0000045
Riszperidon	5,55	0,07	0,0011
Koffein	22	0,000035	0,0000048
Diazepam	0,25	0,000043	0,000007
Metoprolol	0,73	0,000019	0,0000033
Metolaklór-ESA	83	0,0016	0,00026
Biszfenol-A	2381	0,0079	0,0013

<sup>26</sup> Mért maximális koncentrációérték a parti szűrésű kutak vizében a két bemutatott hazai kutatás összegzett eredményei alapján.

A fővárosi parti szűrésű kutak rendelkezésemre álló vízminőségi adatsorai alapján a szerves mikroszennyezők fogyasztókra számított kockázati tényezője egyetlen esetben sem éri el a kritikus 1,0 értéket. Általánosságban elmondható, hogy a kockázati tényező mintegy 2–6 nagyságrenddel maradt alatta a kritikus értéknek. Ebből a listából egyedül a karbamazepin emelkedik ki, ahol a legérzékenyebb korcsoportra számítva a kockázati tényező 0,12 volt. Ez az érték már figyelemreméltó, azaz bár e vegyület pillanatnyilag nem jelent egészségügyi kockázatot a legérzékenyebb korosztályra sem, koncentrációjának jövőbeni nyomon követése mindenképpen célszerű. Különösen, hogy e vegyület eltávolításában a parti szűrés hatékonysága csupán 20–30%.<sup>27</sup> A vizsgált szennyezőanyagokhoz tartozó kockázati tényezők egymáshoz viszonyított arányát az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra

A legérzékenyebb korcsoportra vonatkozó kockázati tényezők egyes szerves mikroszennyezők esetében a budapesti ivóvízbázisokban mért adatok alapján.

Forrás: a szerző szerkesztése

#### 4.4. Kritikus koncentrációértékek

A fenti elemzés eredményei alapján a gyógyszermaradványok ivóvízellátásra és emberi egészségre gyakorolt kockázata akkor lenne számottevő, ha 2–6 nagyságrenddel nagyobb koncentráció lenne mérhető a nyersvízből származó mintákban. Az európai folyókban ezek a vegyületek jellemzően néhányszor 10, esetleg 100 ng/L koncentrációban fordulnak elő, ritka és kiugró a µg/L koncentráció. Az 1,0 értékű kritikus kockázati tényező a µg/L koncentrációtartománynál lépne fel. A tapasztalatok azt mutatják, hogy egyes, jelentős szennyvízterhelésnek kitett ázsiai folyók esetében gyakrabban

<sup>27</sup> Attila Csaba Kondor et alii (2020) i. m.; Roksana Kruć et. al.: Migration of Pharmaceuticals from the Warta River to the Aquifer at a Riverbank Filtration Site in Krajkowo (Poland). *Water*, 11. (2019), 11.

fordul elő ekkora koncentráció, mint az európai vagy hazai folyók esetén. Fontos azt is kihangsúlyozni, hogy a szerves mikroszennyezőkre fókuszáló kutatások jellemzően néhány, legfeljebb százféle, gyakran előforduló szennyezőanyag koncentrációját vizsgálják, de természetesen ezek mellett még sokféle szerves szennyezőanyag fordulhat elő, amelyekre a kutatások nem térnek ki. vízminőség-védelmi szempontból tehát célszerű, ha a vizsgált vegyületcsoportok koncentrációja jelentősen alatta marad a kockázatot jelentő értékeknek. Ivóvízbiztonság szempontjából a kockázat tovább csökkenthető, ha a vízkezelés alkalmazott technológiái képesek a szerves mikroszennyezők legalább részleges visszatartására (például adszorpció, membrántechnológiák). További problémát jelent, hogy a kutatások jellemzően külön-külön vizsgálják és értékelik e szennyezőanyagok jelenlétét és hatását. Célszerű lenne összeített kockázatelemzést végezni, ez azonban több okból adódóan is igen nehéz – jelen tudásunk mellett tulajdonképpen nem lehetséges. Egyrészt nincs mód arra, hogy az összes ismert szerves mikroszennyező koncentrációját mérjük, hiszen több tízezer vegyületről lenne szó. Másrészt nem ismerjük a szinergikus vagy additív hatásukat, ami a kockázatelemzés jelentős inputja kellene legyen. Végül pedig az egyes vegyületek hatása (DWEL) között is jelentős különbség adódik, így erre összeített mérőszám jelenlegi ismereteink alapján nem adható meg.

## 5. Összefoglalás

Az elmúlt évtized kutatásai rávilágítottak, hogy szerves mikroszennyezők jelen vannak a magyarországi felszíni vizekben is. Koncentrációjuk jellemzően ng/l tartományban mérhető, de egyes vegyületek esetében ritkábban  $\mu$ /l koncentráció is előfordul. A publikált kutatási eredmények azt mutatják, hogy a parti szűrés vegyületenként eltérő hatásfokkal, de kimutathatóan csökkenti a szerves mikroszennyezők koncentrációját. A budapesti ivóvízbázisok termelőkútjaiban mérhető koncentrációértékek, valamint az egyes korcsoportokra vonatkozó egészségügyi határértékek felhasználásával számítható a kockázati tényező értéke. Bár a kritikus 1,0 értéket egyik vegyület kockázati tényezője sem éri el, a 0–3 hónapos, legérzékenyebb korosztályra vonatkozóan a karbamazepin antidepresszáns 0,12 értékével megközelíti azt. Fontos tehát a szerves mikroszennyezők további monitorozása és figyelemmel követése, mert ugyan a rendelkezésre álló adatok alapján a szerves mikroszennyezők ivóvízbiztonságra gyakorolt kockázata a hazai parti szűrésű vízbázisok esetében nem jelentős, számos tényező – mint a koktéllhatás vagy a szekunder szennyezőanyagok hatása – még nem ismert kellőképpen.

## Felhasznált irodalom

Benson, Robert – Octavia D Conerly – William Sander – Angela L. Batt – J. Scott Boone – Edward T. Furlong – Susan T. Glassmeyer – Dana W. Kolpin – Heath E. Mash – Kathleen M. Schenck – Jane Ellen Simmons: Human health screening and public health significance of contaminants of emerging concern detected

- in public water supplies. *The Science of the total environment*, (2017), 579. 1643–1648. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.146>
- Chai Ching Hsia, Ivy – Nur Anisah Shafie – Norzafirah Razali – Arif Azhan A Manap – Intan Khalida Salleh: *Using CHARM Modelling to Decide the use and Discharge of Surfactant at an Offshore EOR Project*. 2018. november. Online: <https://doi.org/10.2118/192715-MS>
- de Jesus Gaffney, Vanessa – Cristina M.M. Almeida – Alexandre Rodrigues – Elisabete Ferreira – Maria João Benoliel – Vitor Vale Cardoso: Occurrence of pharmaceuticals in a water supply system and related human health risk assessment. *Water Research*, (2015), 72. 199–208. Online: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.10.027>
- Dragon, Krzysztof – Józef Górski – Roksana Kruć-Fijałkowska – Dariusz Drożdżyński: Removal of Natural Organic Matter and Organic Micropollutants during Riverbank Filtration in Krajkowo, Poland. *Water*, 10. (2018), 10. Online: <https://doi.org/10.3390/w10101457>
- EPA: *2018 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories Tables*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, 2018.
- EPA: *Guidance on Selecting Age Groups for Monitoring and Assessing Childhood Exposures to Environmental Contaminants*. Risk Assessment Forum, EPA/630/P-03/003F., U.S. Environmental Protection Agency, Washington, 2005.
- Goda Zoltán – Knisz Judit – Mátrai Ildikó – Vadkerti Edit: A szerves mikroszennyező csoportok részletes bemutatása. In Knisz Judit (szerk.): *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2020.
- Goda Zoltán: Szerves mikroszennyezők előfordulása ivóvízbázisokban. In Knisz Judit (szerk.): *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2020.
- Hiscock, Kevin M. – Thomas Grischek: Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Journal of Hydrology*, 266. (2002), 3. 139–144. Online: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00158-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00158-0)
- Knisz Judit – Vadkerti Edit: A szerves mikroszennyezők előfordulása, sorsa és hatása a környezetben. In Knisz Judit (szerk.): *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2020.
- Kondor, Attila Csaba – Gergely Jakab – Anna Vancsik – Tibor Filep – József Szeberényi – Lili Szabó – Gábor Maász – Árpád Ferincz – Péter Dobosy – Zoltán Szalai: Occurrence of pharmaceuticals in the Danube and drinking water wells: Efficiency of riverbank filtration. *Environmental Pollution*, (2020), 265. Online: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114893>
- Központi Statisztikai Hivatal: *A felszín alóli víztermelés víztípusok szerint (1985–)*. Budapest, 2018.
- Kruć, Roksana – Krzysztof Dragon – Józef Górski: Migration of Pharmaceuticals from the Warta River to the Aquifer at a Riverbank Filtration Site in Krajkowo (Poland). *Water*, 11. (2019), 11. Online: <https://doi.org/10.3390/w11112238>
- Nagy-Kovács, Zsuzsanna – Balázs László – Ernő Fleit – Katalin Czichat-Mártonné – Gábor Till – Hilmar Börnick – Yasmin Adomat – Thomas Grischek: Behavior of Organic Micropollutants During River Bank Filtration in Budapest, Hungary. *Water Research*, 10. (2018), 12. Online: <https://doi.org/10.3390/w10121861>

- Snyder, S. A. – B. Vanderford – J. Drewes: *State of Knowledge of Endocrine Disruptors and Pharmaceuticals in Drinking Water*. Denver, Awwa Research Foundation, 2008.
- Weiwei, Ben – Bing Zhu – Xiangjuan Yuan – Yu Zhang – Min Yang – Zhimin Qiang: Occurrence, removal and risk of organic micropollutants in wastewater treatment plants across China: Comparison of wastewater treatment processes. *Water Research*, (2018), 130. 38–46. Online: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.057>
- World Health Organization: *Guidelines for Drinking Water Quality*. Geneva, Svájc, 2011.

*Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-3-II-NKE-7 kódszámú új nemzeti kiválóság programjának szakmai támogatásával készült.*

