



BEZSENYI ANIKÓ^{1,2}

GYARMATI IMRE¹

MAKÓ MAGDOLNA¹

DR. TAKÁCS ERZSÉBET³

bezenyia@fcsn.hu, gyarmatii@fcsn.hu

¹ Fővárosi Csatornázási Művek Zrt.,
1087 Budapest, Asztalos Sándor út 4.

² Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák
Doktori Iskola, Budapest

³ MTA Energiatudományi Kutatóközpont (MTA EK),
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

KIVONAT A környezeti és egészségügyi kockázatot hordozó gyógyszermaradványok kiemelkedő jelentőséggel bírnak a szerves mikroszennyezők között. A szennyvizekben ng, illetve $\mu\text{g}^*\text{L}^{-1}$ koncentrációban megjelenő antibiotikumok mennyisége ahhoz kevés, hogy a baktériumokat elpusztítsák, vagy szaporodásukat gátolják, de az antibiotikum-rezisztencia kialakulásához kedvező környezetet biztosítanak. A kórházak mellett a szennyvíztisztító telepek is forró pontjai az ún. multirezisztens baktériumtörzsek kialakulásának, amely a jövő egyik nagy kihívását jelenti az emberiség számára. A nyers szennyvízben milliliterenként jelen levő 10^6 - 10^8 CFU (telepképző egység) baktériumtömeg egy másik fontos forrása a problémának, ugyanis ún. horizontális génátadással képesek egymással megosztani az antibiotikumrezisztencia-géneket. Az elmúlt évtizedekben számos technológiai újítás jelent meg a mikroszennyezők eltávolítására, amik egy negyedik tisztítási fokozat kiépítésével alkalmazhatók. A beruházási és üzemeltetési költségük nemcsak a szolgáltató terheit növelné meg, hanem végső soron a fogyasztókat sújtaná. A szennyvíztisztító telepek többségében eleveniszapos rendszer üzemel, azonban az számos mikroszennyező szignifikáns eltávolítására is képes lehet megfelelő körülmények között. A legnagyobb biodegradációs hatékonyság elérése alapvető célkitűzés minden üzemeltetőnek. A baktériumok enzimjei véletlenszerűen képesek megváltoztatni a bonyolult szerkezetű molekulák (pl. gyógyszerek) szerkezetét az ún. kometabolikus folyamatokban. Ezt a természetes folyamatot kihasználva segíthetjük a gyógyszer-molekulák biológiai átalakulását a szennyvíztisztítás során.

VÍZ ÉS TUDOMÁNY

Gyógyszermaradványok a szennyvízben – Csak a holnap kihívása?

A MIKROSZENNYEZŐK DIÓHÉJBAN

A különböző vízformákban literenként mikrogramm, illetve nanogram koncentrációban megtalálható mikroszennyezők az életfolyamatok feltételeit és a víznek az ember számára való felhasználhatóságát csökkenthetik, rosszabb esetben megakadályozhatják. Biológiaiilag nem vagy nehezen bonthatók, így a szennyezőforrástól időben és térben is távol kerülhetnek. A hagyományos szennyvíztisztítási eljárások nem alkalmasak minden, a tisztítótelepre kerülő szennyezőanyag eltávolítására. A mikroszennyezők gyakran változatlan formában jutnak keresztül a szennyvíztisztító rendszereken, és a felszíni vizek közvetítésével eljuthatnak a későbbi vízhasználókhoz. Szerves és szervetlen vegyületek alkotják ezt a rendkívül komplex csoportot. Mi ebben a tanulmányban a szerves formákra, illetve azon belül a gyógyszerekre koncentrálnak.

MIÉRT A GYÓGYSZEREK?

A felszíni vizekben megjelenő mikroszennyezők közül a gyógyszerek kiemelkedő jelentőséggel bírnak, hiszen igen elterjedten és nagy mennyiségben alkalmazza az emberiség ezeket a vegyületeket. Becslések szerint évente több száz ezer tonna farmakológiailag aktív anyagot használunk világszerte ember- és állatgyógyászati célokra. [1] Jelentőségük nemcsak a felhasznált mennyiség miatt nagy, hanem komoly népegészségügyi kockázatot is hordozhatnak bizonyos gyógyszertípusok. Ma még nem tudjuk pontosan, hogy a különböző gyógyszermaradványoknak, illetve ezek bomlástermékeinek mekkora az ökotoxicitási értéke. Kockázatelemzéssel próbáljuk becsülni ezeket. Koncentrációtól függően eltérő hatást fejthetnek ki az élőlényekre, és ezt még számos egyéb olyan faktor befolyásolhatja, mint az adaptáció (alkalmazkodás

biológiai értelemben) vagy a kockéltetés (gyógyszerek együttes hatása). Azonban az antibiotikumok hatása, illetve jelenlétük kockázata sajnos vitathatatlan. A literenkénti mikro-, illetve nanomennyiségük ellenére is kiemelt jelentőségűek az antibiotikum-rezisztencia fokozott terjedése miatt.

Az antibiotikum-rezisztencia és következményei

Antibiotikum-rezisztencia akkor alakul ki, ha egy kórokozó ellenállóvá válik egy olyan antimikrobiális gyógyszerrel szemben, melynek hatására korábban elpusztult volna. Ugyanaz a baktérium több antibiotikummal szemben is ellenállóvá válhat, így ún. multirezisztens törzsek is megjelennek. Ezeket gyakran „szuperbaktériumoknak” nevezik, és nincs vagy alig akad gyógyszer, amely bevethető ellenük. Ennek szélsőséges megjelenése az ún. panrezisztens baktérium, amely jóformán minden antibiotikummal szemben érzéketlen. Szerencsére panrezisztencia még csak nagyon kevés baktérium esetében alakult ki. A szuperbaktérium-fertőzések kétharmada kórházi eredetű. [2]

2014-ben látott napvilágot az O'Neill-jelentés, amelyet David Cameron akkori brit miniszterelnök kérésére állított össze egy szakértői csapat Jim O'Neill közgazdász vezetésével. Az elemzők többek között az antibiotikumoknak ellenálló bakteriális fertőzések társadalmi és gazdasági hatásait igyekeztek felmérni. A jelentés szerint az antibiotikum-rezisztencia következtében évente 10 millió ember halhat meg 2050-től. Ez azt jelenti, hogy minden harmadik másodpercben ez okozza egy ember halálát, illetve többen halnak meg antibiotikum-rezisztencia következtében, mint rákban és közúti balesetekben együtt. De nem csupán a jövő problémájáról van szó, hiszen ma a világon évente 700 ezer ember halálát okozza az antibiotikum-rezisztencia, ebből 50 ezren Európában és az Egyesült Államokban hunynak el. [3] A rezisztens

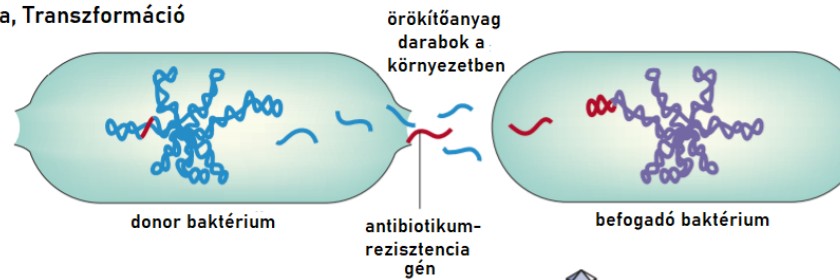
kórokozók egyre gyakoribb megjelenése mellett a gyógyszercégek csökkent érdeklődése az újabb fejlesztések iránt is komoly gondot jelent. Az újonnan törzkönyvezett antibiotikumok száma 90%-kal csökkent az elmúlt 30 évben. [4]

Az antibiotikum az emberi, illetve állati szervezetben megtelepedett baktériumokat elpusztítja (baktericid), vagy csak a szaporodásukat gátolja (bakteriosztatikus). Az antibiotikumok alapvetően természetes vegyületek, amelyeket baktériumok vagy gombák állítanak elő, hogy elpusztítsák a versenytársaikat. A baktériumok olyan részeit támadják (sejtfal), amelyek az emberi sejtekben nem találhatóak, vagy olyan folyamatokat (enzimeket) gátolnak, amelyek csak a baktériumokra jellemzőek (folsavsintézis). A rezisztencia hátterében az áll, hogy a baktériumok különböző stratégiákat fejlesztenek az antibiotikus hatás elkerülésére. Például a sejtfal áteresztőképességét változtatják meg, vagy a sejtbe bekerülő gyógyszert kipumpálják a sejten kívülre. [5] Az antibiotikum(ok)nak való kitétség stressztényező a baktériumok számára, amihez alkalmazkodniuk kell, ha életben akarnak maradni. [2]

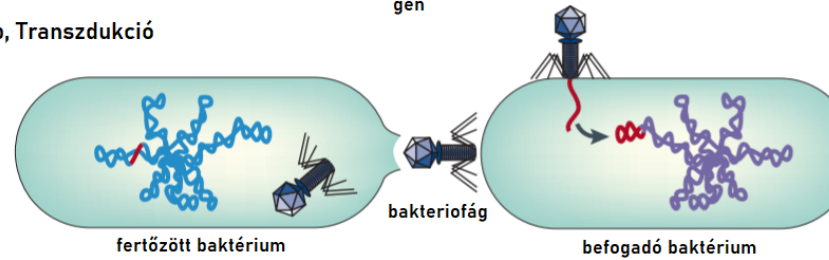
Nemcsak természetes antibiotikum (penicillin), de természetes antibiotikum-rezisztencia is létezik. Például a baktériumot olyan védőburok (sejtfal) veszi körül, amely bizonyos antibiotikumok számára áthatolhatatlan. Ha eredendően nem rendelkeznek rezisztenciával, akkor meg tudják szerezni (szerzett rezisztencia). Örökítőanyag-szinten történik olyan változás, amely ellenállóvá teszi az adott antibiotikummal szemben. Egyrészt mutáció léphet fel magában a sejtben, másrészt más baktériumoktól is átvehet rezisztenciagéneket. Ez utóbbit horizontális géncserének (géntranszfer) nevezzük, és különböző baktériumfajok között is megtörténhet, így ez az egyik fő útvonala a rezisztencia terjedésének. A horizontális géncserébe is többféleképpen zajlik. [2] Egyrészt képesek a külvilágból hosszabb DNS- vagy RNS-molekulákat felvenni, és azokat beépíteni a saját örökítőanyagukba (transzformáció, 1. ábra/a). Ezek a felvett DNS/RNS-darabok tartalmazhatnak antibiotikumrezisztenciagéneket. Másrészt egy baktériumot megfertőző vírus (bakteriofág) is átszállíthat DNS-t egy másik baktériumba (transzdukción, 1. ábra/b). Harmadrészt az egyik baktérium összekapcsolódhat egy társával (konjugáción, 1. ábra/c), amit sokszor a baktériumok szexuális szaporodásának neveznek, és átadhatja neki a lemásolt örökítőanyag egy példányát. [6]

A természetes antibiotikumok és a rezisztencia jelensége már évmilliók óta jelen van a természetben, de mi, emberek, felgyorsítottuk a

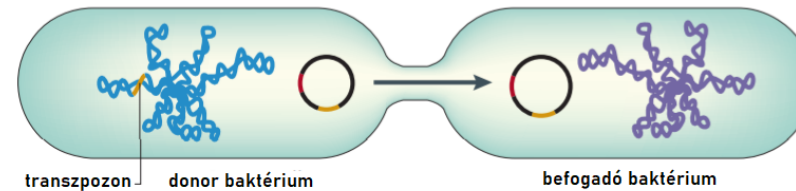
a, Transzformáció



b, Transzdukción



c, Konjugáción



1. ábra: A horizontális génátvitel formái. [6] A transzpozonok (ún. ugráló gének) olyan DNS-szakaszok, amelyek képesek megváltoztatni helyüket az örökítőanyagban. A baktériumok transzpozonjai sok esetben tartalmaznak antibiotikumrezisztenciagéneket

folyamatokat. Az ún. szelektív nyomást növeltük meg az antibiotikumok mesterséges előállításával és fejlesztésével, hiszen napjainkban a baktériumok sokkal több antibiotikumnak vannak kitéve. A túlélésért rezisztenssé kell válniuk. Súlyosította a helyzetet a helytelen, mértéktelen antibiotikum-használat (az állattenyésztésben is), az állati eredetű termékek nemzetközi kereskedelme, a turizmus világméretűvé válása. Az antibiotikumok túlnyomó részét az állattenyésztésben használják fel (az Amerikai Egyesült Államokban az antibiotikumok 80%-át). Ráadásul nem betegségek kezelésére vagy megelőzésére, hanem hozamfokozóként. Az Európai Unió országaiban 2016-tól jogszabály tiltja az antibiotikumok hozamfokozásra való használatát, azonban ez a világnak csak egy kis részét érinti. [2]

A SZENNYVÍZ SZEREPE AZ ANTIBIOTIKUM-REZISTENCIA TERJEDÉSÉBEN

A gyógyszerek az elfogyasztásukat követően különböző mértékben átalakulva (anyagcsere-reakciók) ürülnek ki az emberi szervezetből, majd a csatornahálózaton keresztül a szennyvíztisztító üzemekbe jutnak. Ugyancsak ez a sorsa nagyrészt a lejárt szavatosságú gyógyszereknek, amelyekből a lakosság nem szabályos útvonalon szabadul meg, azaz a lefolyóba dobja. Ezzel azonban csak a probléma egyik oldalát világítjuk meg, ugyanis a gyógyszereken kívül a rezisztens baktériumok, illetve a rezisztenciagének transzportja is zajlik. A rezisztenciagén valamilyen „sikeres ellenállási mechanizmusra” vonatkozó információkat kódol. Például egy olyan pumpa receptjét, ami az antibiotikumot kinyomja a sejtől.

Az emberi test baktériumok, gombák és más mikroorganizmusok billióinak (10^{12}) ad otthont, amik természetes módon együtt tenyésznek a bőrön, az emésztőrendszerben és a szervezet más pontjain. Több mint tízszer annyi mikrobiális

sejtet tartalmazunk, mint emberi sejtet, és csak a teljes bélmikrobióta (a baktériumok összessége) akár 2 kg-ot is nyomhat. A széklet egyetlen grammjával több feleslegessé vált, elhullott baktérium távozik a szervezetből, mint amennyi ember él a Földön. [7] Sokan a betegség tüneteinek enyhülésekor önkényesen abbahagyják az antibiotikum szedését, így a gyógyszerre kevésbé érzékeny kórokozók nem pusztulnak el, és ez fokozza a gyógyszerre rezisztens törzsek kialakulásának esélyét. [5] Ezek a rezisztens baktériumok is kiürülnek egyszer a széklettel.

Az antibiotikumok a szennyvízben $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, illetve $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ koncentrációban jelennek meg, így mennyiségük ahhoz kevés, hogy a szennyvíz baktériumait elpusztítsák, vagy szaporodásukat gátolják. Ugyanakkor a rezisztencia kialakulásához ez a közeg kedvező. A kórházak mellett a szennyvíztisztító telepek is forró pontjai az ún. multirezisztens törzsek kialakulásának. A másik fontos faktor az, hogy rengeteg baktérium van egy helyen, és egymásnak képesek átadni a rezisztenciagéneket (horizontális génátadás). [2][8][9] Így nem kell közvetlenül találkozni az

antibiotikumnak és a baktériumnak. A génátadásnak annál nagyobb a valószínűsége, minél több baktérium halmozódik fel egy helyen. Ha van ilyen közeg, akkor az a nyers szennyvíz, amelyben milliliterenként 10^6 - 10^8 CFU baktérium tenyészik. [10] [11]

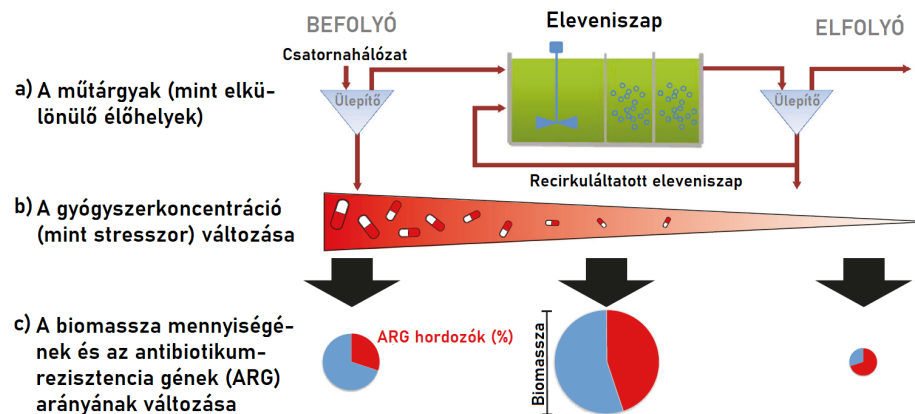
A szennyvíztisztító telepek nem tudnak kellő figyelmet fordítani a mikroszennyezők eltávolítására, hiszen nem áll rendelkezésükre megfelelő technológia. Mindemellett jelenleg határértékek sincsenek. A mikroszennyezők az adott vegyület fizikai-kémiai sajátosságaitól függően különböző mértékben távolíthatók el a szennyvízből a tisztítóművekben. Eltávolításuk hatásfoka 0 és 100% között változhat, és a két szélsőérték között bármilyen értéket felvehet. A gyógyszerekkel sincs ez másként. Az Acetaminophen közel 100%-os eltávolítási hatásfoka mellett az Eritromicin közel 30%-os eltávolítása jellemző. Azonban az eltávolítás hatékonysága a szennyvíztisztítási technológiától függ leginkább, így létezik olyan technológia, amelynél az Eritromicin egyáltalán nem vonható ki a rendszerből. [12]

A szennyvíz rezisztómájának nevezzük a szennyvízminták teljes örökítőanyag-készletében előforduló antibiotikumrezisztencia-gének összességét, vagyis a szennyvíz antibiotikumrezisztenciagén-gyűjteményét. Az átfogó rezisztóma vizsgálatok kimutatták, hogy a szennyvízben megjelenő antibiotikumok és azok hatását blokkoló antibiotikumrezisztencia-gének megjelenése a közegben szorosan összefügg. Ez szinte az összes vizsgált rezisztenciagénre igaznak bizonyult. Kivéteklént az ún. bla géneket említhetjük. A β -laktám antibiotikumok az osztódó baktériumokra hatnak, a sejtfaluk alakját torzítják el. A baktériumok védekező mechanizmusának egyik módja a β -laktamáz enzim előállítása, mely hatástalanítja a gyógyszert. Ezt az enzimtípust kódolják a bla gének, amelyek gyakran előfordultak a szennyvízben, annak ellenére, hogy a β -laktám antibiotikumokat ritkán sikerült kimutatni a vizsgált mintákból. Az elméleti összefüggéseket a gyógyszer-koncentráció, a mikrobiális biomassa és az antibiotikumrezisztencia-gének (ARG) arányának változása között a 2. ábrán mutatjuk.

HATÁRÉRTÉK NINCS, DE MEGFIGYELÉSI LISTA VAN

Az Európai Unió vízpolitikáját a 2000/60/EK irányelv, hétköznapi nevén a Víz Keretirányelv (VKI) határozza meg. A Víz Keretirányelv előírásai szerint mérni kell a klasszikus paraméterek mellett (pl. vízben oldott oxigén) bizonyos gyógyszermaradványok koncentrációját is. Az Európai Parlament és Tanács 2455/2001/EU sz. határozatában rögzítették a vízügyi területre vonatkozó elsőbbségi anyagok jegyzékét. Ebben harminchárom vegyületet, illetve vegyületcsoportot neveztek meg, amelyek perzisztens (hosszú távon fennmaradó), bioakkumulatív (élőszövetben felgyűlő) és toxikus sajátosságokkal bírnak. Az irányelv 2013. augusztusi módosítása során határozat született egy megfigyelési lista létrehozásáról, majd az Európai Bizottság 2015-ben adta ki az első Megfigyelési listát (Watch List), amelyre akkor három gyógyszerhatóanyag került fel (diklofenák, 17- β -ösztadiol és 17- α -etinil-ösztadiol). A listát 2018-ban és 2020-ban frissítették. A Megfigyelési lista gyógyszer-

2. ábra: A gyógyszer-koncentráció, a mikrobiális biomassa és az antibiotikumrezisztencia-gének (ARG) arányának elméleti változása a szennyvíztisztítás során [8]



rekre vonatkozó változásait az 1. táblázatban foglaltuk össze. Egy illetékes európai szakbizottság dönti el, hogy mely gyógyszerhatóanyagokat veszik fel a Megfigyelési listára. A listán szereplő mikroszennyezők koncentrációváltozását a tagországok vízügyi hatóságainak rendszeresen monitorozniuk (követniük) kell a felszíni vizekben. Az adatgyűjtés hát-

VEGYÜLET	CSOPORT	KIEMELT DÁTUMOK
17 α -etinil-ösztadiol (EE2)	Szintetikus ösztrogén	Watch list 1 (2015), és törölve 2019-ben
17 β -ösztadiol (E2, ösztadiol)	Ösztrogének	
Ösztron (E1)		
Diclofenac	Nemszteroid gyulladáscsökkentő	Watch list 1 (2015), és törölve 2017-ben
Eritromicin	Makrolid antibiotikumok (csoportként volt jegyezve)	Watch list 1 (2015), és törölve 2019-ben
Klaritromicin		
Azítromicin		
Amoxicillin	Antibiotikum	Watch list 2 (2018)
Ciprofloxacín	Antibiotikum	Watch list 2 (2018)
Trimethoprim	Antibiotikum	Watch list 3 (2020)
Venlafaxin	Antidepresszáns	Watch list 3 (2020)
Dezvenlafaxin	Antidepresszáns	Watch list 3 (2020)
Klotrimazol	Fungicid gyógyszer	Watch list 3 (2020)
Flukonazol	Fungicid gyógyszer	Watch list 3 (2020)
Mikonazol	Fungicid gyógyszer	Watch list 3 (2020)

1. táblázat: A Megfigyelési lista gyógyszerekre vonatkozó változásai

térként szolgál ezen anyagok által jelentett veszélyek kezelését, illetve elhárítását célzó intézkedések meghozatalához. [13]

Határértékek még nem születtek a szennyvíztisztítást érintően. Ha lesznek is a jövőben, nem biztos, hogy egységesen vonatkoznak majd minden szennyvíztisztító telepre. A mikroszennyezők esetleges eltávolítása jelentős beruházási terhet ró a kibocsátókra, így valószínűleg az eltávolításra csak akkor lesz szükség, ha a mikroszennyezők jelentős terhelést jelentenek a befogadóra. Például ha a befogadó már eleve terhelt ezekre a komponensekre nézve, ha kicsi a vízhozama, vagy ha nagy a kibocsátott mikroszennyező tömegárama. [14]

A NEGYEDIK FOKOZAT LEHETŐSÉGEI

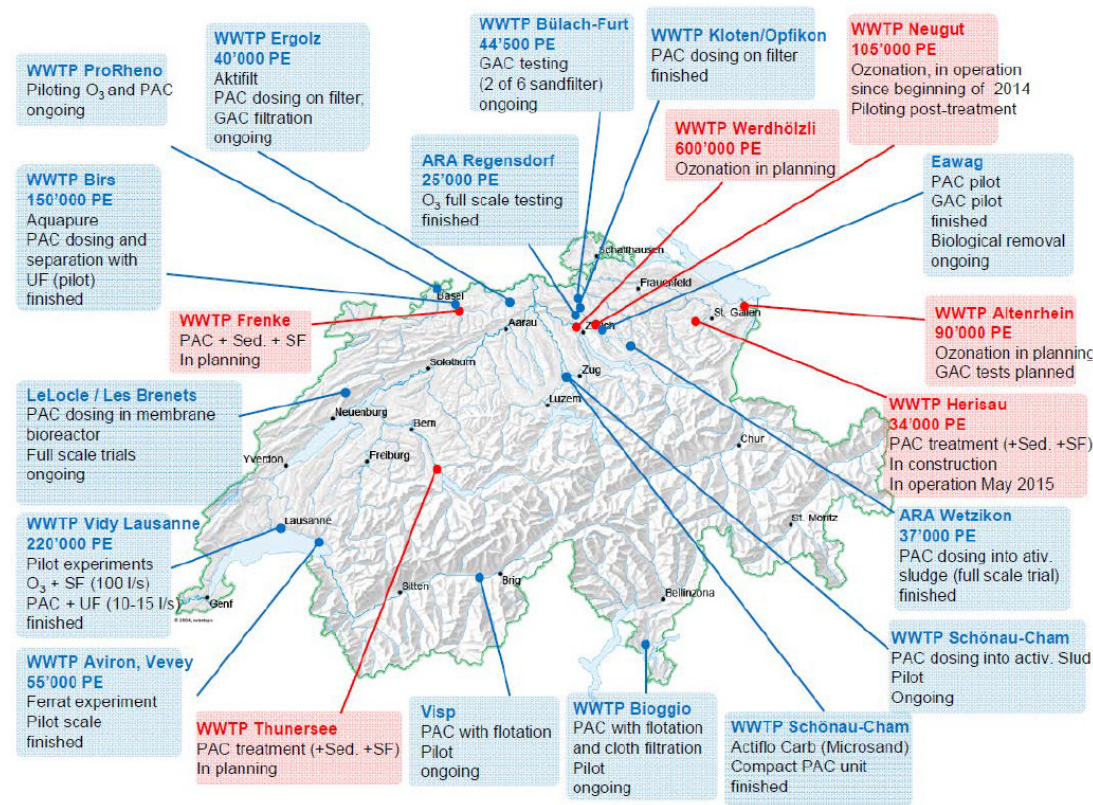
Az antibiotikum-rezisztens baktériumok kialakulásához alapvetően a túlzott és a helytelen antibiotikum-használat vezet, amely ellen a lakosság és az orvosok is sokat tehetnek. Indokolatlan az antibiotikum szedése vírusos fertőzések esetében (pl. megfázás, nátha, influenza), mert az antibiotikumok a vírusokra nem hatnak. [15] Mindemellert a páciensek gyakran nem követik az antibiotikum szedése során az orvos utasításait, vagy nem szedik végig az antibiotikum-kúrát, ami növeli a rezisztencia kialakulásának esélyét. Tehát a felhasználás oldalán is sokat tehetünk.

Az eltávolítás oldalán is sok új lehetőség nyílt meg technológiai újítások formájában az elmúlt egy-két évtizedben. A szerves mikroszennyező anyagok hatékony eltávolítása szennyvízből negyedik tisztítási fokozat kiépítésével érhető el. Ebben Svájc jár élen, ahol a hagyományos biológiai szennyvíztisztítási technológiát követően, azt kiegészítve első alkalommal 2014-ben, illetve 2015-ben helyeztek üzembe negyedik tisztítási fokozatot. Az első üzemi méretű ózonos oxidáció a dübendorfi Neugut szennyvíztisztítóban (2014, 105.000 LEÉ), az első aktív szén adszorpcióval kiegészített technológia a herisai Bachwis szennyvíztisztító telepen (2015, 45.000 LEÉ) indult.

A számításba vehető technológiák közül a tisztítási hatások, a beruházási és az üzemeltetési költségek, valamint az energiaigény figyelembevételével, az ózonnal történő oxidáció és az aktív szénen történő adszorpció (PAC: powdered activated carbon, GAC: Granular activated carbon) tekinthető nagyüzemi méretekben is megvalósítható megoldásnak. [16] Az utóbbi pár évben felzárkózni látszik az ózonnal történő oxidáció mellé egy másik nagyhatékonyságú oxidációs eljárás is (Advanced Oxidation Processes, AOPs), amelynél az ionizáló sugárzást elektrongyorsító segítségével állítják elő.

A 2016-ban elkészült új vízügyi szabályozásnak megfelelően Svájcban 2040-ig 650-ből 120-130 szennyvíztisztító esetén építik ki a mikroszennyezők eltávolítási fokozatát. A beruházás teljes költsége mintegy 1,2 milliárd CHF, amelynek 75%-a állami finanszírozású, és a 25%-át, valamint az üzemeltetési költséget az önkormányzatok fedezik. Elsődleges cél az érzékeny víztestek és az ivóvízbázisok megóvása a mikroszennyezőktől. Várható növekmény a szennyvíztisztítás költségeiben kisebb szennyvíztisztítók esetén 10-20%, nagyobbaknál 20-50%. A fejlesztésre kerülő szennyvíztisztítók kiválasztásánál elsődleges szempontként szerepelt az érzékeny víztestek védelme. Olyan telepeket vá-

lasztanak, amelyek 8000 lakosegyenérték feletti, amelyek esetén a hígulás mértéke a befogadóba vezetésnél alacsony (<10-szeres). A másik szempont az ivóvízbázisok védelme. Ezek 24.000 lakosegyenérték feletti szennyvíztisztítók esetében kiemelten kezeltek, melyeknek tisztított vize állóvízbe kerül bevezetésre. A harmadik szempont a terhelés csökkentése, amelynek a 80.000 lakosegyenérték feletti szennyvíztisztítóknál van kiemelt jelentősége. [17][18][19][20][21]



3. ábra: Mikroszennyező-eltávolítási technológiák telepítésének állapota Svájcban 2015-ben [18]

Természetesen a mikroszennyezők eltávolítására irányuló technológiák fejlesztése és üzembe helyezése nem korlátozódik kizárólag Svájcra és Németországra. Negyedik fokozat épült a következő helyeken:

- Franciaország: ózonos oxidáció az alábbi tisztítóművekben
- a 15.000 lakos-egyenértékű (LEÉ) Saint-Pourçain-sur-Sioule
- a 26.000 LEÉ Sophia Antopolis, Valbonne

- Hollandia: aktív szén adszorpció a Horstemeer szennyvíztisztítóban
- Japán: ózonos kezelés több mint 60 szennyvíztisztítóban
- Kanada: a világ legnagyobb ózonos oxidációval üzemelő tisztítóműve a montreali 2.500.000 LEÉ Jean-R. Marcotte [22]

Az ózonozás mellett az elektrongyorsító a másik nagyhatékonyságú oxidációs eljárás, amit a gyakorlatban is alkalmaznak. Jelenleg még nagy

beruházási, de viszonylag alacsony üzemeltetési költséggel működnek elektrongyorsítók elsősorban Ázsiában. Dél-Koreában, Daeguban (Korea EB-Tech Co.) 2005 decemberében helyeztek üzembe egy 10.000 m³/nap kapacitással működő sugárzásos (Electron Beam, EB) kezeléssel kombinált szennyvíztisztítót. Textilszínezék-tartalmú szennyvíz visszaforgatására telepítették, és 1,06 USD/m³ teljes költséggel (1 MeV-400 kW gyorsító, évi 365 napi működéssel számolva) üzemel. Az ionizáló sugárzás keltésére elektrongyorsítót használnak. Az elektronsugár alatt vezetik el a szennyvizet filmrétegszerűen. A gyorsított elektronok behatolási mélysége az energiájuktól függ. 1–2 MeV-nál nagyobb gyorsítóenergiát általában nem alkalmaznak, így nem hatolnak nagyon mélyen a vízbe a gyorsított elektronok (néhány milliméter). Folyamatos üzemben kezelik a vizet. [23][24] A dél-kínai Jiangmen városban a Guanhua Knitting Factory napi 30 ezer m³ textilipari szennyvizének tisztítására alkalmas szennyvízkezelő rendszert hozott létre. Ehhez a kapacitáshoz 7 elektrongyorsító egységet szükséges telepíteni. [25]

beruházási, de viszonylag alacsony üzemeltetési költséggel működnek elektrongyorsítók elsősorban Ázsiában. Dél-Koreában, Daeguban (Korea EB-Tech Co.) 2005 decemberében helyeztek üzembe egy 10.000 m³/nap kapacitással működő sugárzásos (Electron Beam, EB) kezeléssel kombinált szennyvíztisztítót. Textilszínezék-tartalmú szennyvíz visszaforgatására telepítették, és 1,06 USD/m³ teljes költséggel (1 MeV-400 kW gyorsító, évi 365 napi működéssel számolva) üzemel. Az ionizáló sugárzás keltésére elektrongyorsítót használnak. Az elektronsugár alatt vezetik el a szennyvizet filmrétegszerűen. A gyorsított elektronok behatolási mélysége az energiájuktól függ. 1–2 MeV-nál nagyobb gyorsítóenergiát általában nem alkalmaznak, így nem hatolnak nagyon mélyen a vízbe a gyorsított elektronok (néhány milliméter). Folyamatos üzemben kezelik a vizet. [23][24] A dél-kínai Jiangmen városban a Guanhua Knitting Factory napi 30 ezer m³ textilipari szennyvizének tisztítására alkalmas szennyvízkezelő rendszert hozott létre. Ehhez a kapacitáshoz 7 elektrongyorsító egységet szükséges telepíteni. [25]

A BIOLÓGIAI SZENNYVÍZTISZÍTÁSBAN REJLŐ LEHETŐSÉGEK

A szennyvíztisztító telepek többségében eleveniszapos technológia áll az üzemeltetők rendelkezésére jelenleg. A negyedik fokozat beruházási költségeit valószínűleg csak funkcionáló határértékek esetén teremti meg az ellátásért felelős. Ezért érdemes megvizsgálni, hogy a biológiai szennyvíztisztítás mennyi mikroszennyezőt képes eltávolítani, illetve a teljesítményt és az eltávolítási hatásfokot milyen technológiai változtatásokkal tudjuk növelni.

A biológiai tisztítást végző óriási, pelyhekbe rendeződött baktériumtömeg az eleveniszap. A baktériumok életben maradásukhoz, növekedésükhöz és szaporodásukhoz szükséges tápanyagokat csak korlátozott mérettartományban képesek felvenni a sejtjeikbe. Ezért a nagyobb szerves molekulákat enzimek segítségével kell feldarabolniuk, hogy a képződő kisebb molekulák bejuthassanak a sejtbe, ahol bekapcsolódhatnak a baktérium anyagcseréjébe.

Az enzimek az anyagcsere csomópontjai. Olyan fehérjék, amelyek molekulákat alakítanak át, segítve azok valamilyen irányú hasznosulását. A cél érdekében a baktériumok a sejten belülre és kívülre is termelnek enzimeket. Bármilyen enzimről legyen is szó, természetes úton kialakult kémiai vegyületekhez idomult az evolúció során. A mesterségesen előállított szerves mikroszennyezőket a mikroorganizmusok nem tudják közvetlenül lebontani, anyagcsereútjaiknak idegenek ezek a vegyületek (xenobiotikumok). Az anyagcsere folyamatai, útvonalai az evolúció során változnak. Ez fontos a mikroorganizmusok szempontjából, mert a változó körülményekhez hosszú távon csak így tudnak alkalmazkodni. Azonban a szintetikus gyógyszermolekulák nagyrészt az utóbbi évtizedekben jelentek meg, így a mikroorganizmusok korábban nem találkoztak ezekkel.

Elvértve akadnak olyan baktériumtörzsek is, amelyek az anyagcseréjükbe képesek bevonni bizonyos

gyógyszereket. Ez nagyon ritka jelenség, ráadásul ezek alkalmazása a szennyvíztisztítási technológiában nehézkes és költséges lenne.

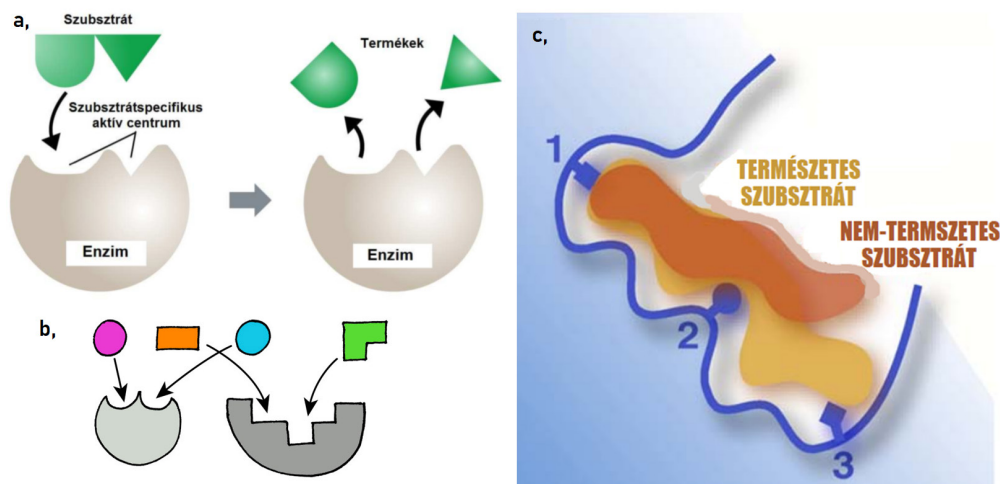
Az anyagcsere-folyamatok rugalmassága, képlékenysége bizonyos szempontból az enzimek hiányosságaihoz köthető. Az enzimek ugyanis néha hibáznak. Az enzim által irányított biokémiai átalakulás kiindulási vegyületét szubsztrátnak nevezzük. Ennek a molekulának változik meg a szerkezete, ezen fejt ki az enzim a hatását. A szubsztrát térben jól illeszkedik az enzim egy bizonyos részébe, mint kulcs a zárba. Az enzim így ismeri fel a szubsztrátját. Nagyon eltérő szerkezetű molekulát nem tudna átalakítani. Az enzimek egy része összetéveszti a szubsztrátját egy másik, hasonló szerkezetű molekulával. Ez akkor valósulhat meg, ha az enzimbe a szubsztrátja nem szorosan illeszkedik, azaz az enzim „lötyög”. Mintha a zár már kopott lenne, és a kulcs nem passzolna pontosan bele. Ez tulajdonképpen működési hibának tekinthető, de fontos evolúciós szempontból, mert az enzim későbbi repertoárja kiszélesedhet. Ez esetleg az enzim tulajdonosának, a baktériumnak az életét mentheti meg. A mikroszennyezők esetében is működhet ez a véletlenszerű átalakítás. Ezt a jelenséget kometabolizmusnak nevezzük.

A kometabolizmus során a baktérium képes megbontani egy bonyolult szerkezetű molekulát (pl. gyógyszervegyületet), ha egy egyszerű, könnyen bontható szubsztrát is a rendelkezésre áll. Ez utóbbiként sokféle molekula szóba jöhet, de legtöbbször egyszerű alkoholok (me-

tanol, etanol) vagy szerves savak (ecetsav, hangyasav), esetleg szervesen vegyületek (ammónia). A szubsztrát megdolgoztatja az enzimet, amely néha hibázik, és a bonyolult molekulát alakítja át. Az enzim csak egy kis változtatást hajt végre a molekulán, nem bontja le teljesen. Abban az esetben, ha az enzim a saját szubsztrátját bontja, a szubsztrát az anyagcserébe bekapcsolva szén- és/vagy energiaforrásként hasznosul. Ezzel szemben a kometabolizmus, a véletlenszerű átalakítás nem jár energiatermeléssel vagy egyéb hasznosítással. Ettől függetlenül a bonyolult molekula elindul a biokémiai átalakulás útján. Mint amikor az ember éppen a vasárnapi húslevesét fogyasztja, és ráharap egy borszszemre. Nem fogyasztja el, hanem visszafojt egy kis szitkozódást, és udvariasan a szalvétába törli, de ettől még a borsszem szétroppan.

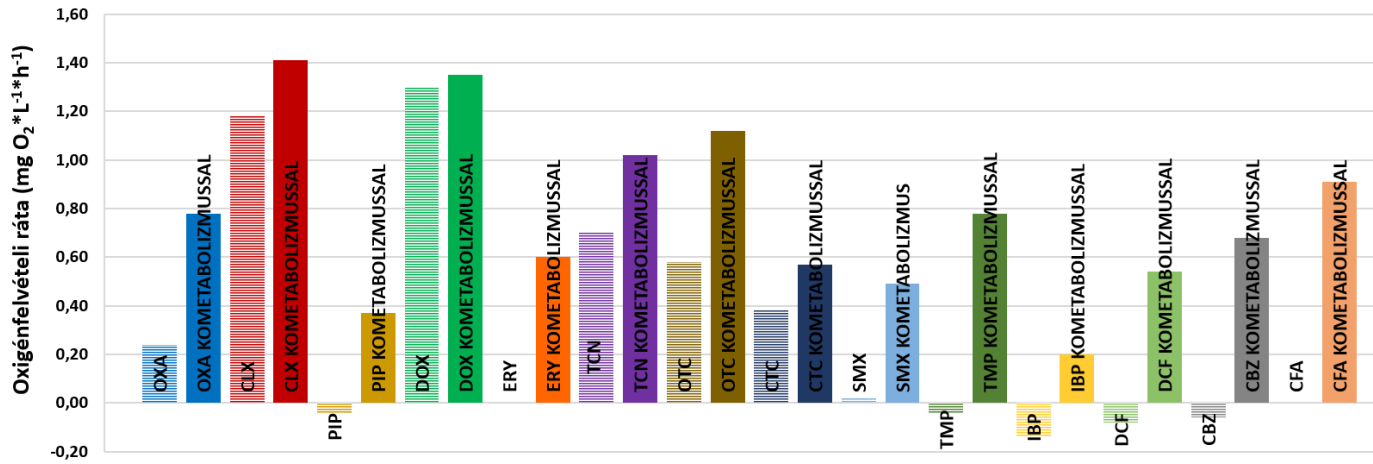
Mivel sokféle enzim képes vagy inkább hajlamos erre a véletlenszerű folyamatra, így nemcsak szerves anyagot fogyasztó (heterotróf/organotróf) szervezetek, hanem ún. autotrófok is művelik, melyeknek nem szerves anyag a szén/energiaforrásuk. A nitrogéneltávolítási ciklusból jól ismert nitrifikálók is ilyenek. [26][27]

A Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. kutatás-fejlesztési munkában foglalkozik a heterotróf mikroorganizmusok kometabolizmusával, és vizsgálja a szennyvíztisztításban betöltött szerepüket. A korábban részletezett közegészségügyi kockázatok miatt kifejezetten gyógyszermaradványokra koncentrálnak.



4. ábra: Az enzim és a szubsztrát találkozási. a, A szubsztrát kapcsolódik az enzimhez, és az enzim segíti az átalakulását. b, Az enzim-szubsztrát kapcsolódás specifikus, az enzim csak olyan szubsztrátot képes magához kapcsolni, amely illeszkedik a térbeli szerkezetébe. c, „Lötyögő” enzimek: a saját szubsztrátja helyett elfogad egy hasonló szerkezetű, de nem pontosan azonos molekulát (például egy gyógyszermolekulát). Az eredmény véletlenszerű reakció (kometabolizmus)

KOMETABOLIZMUS (BIOMASSZA = ELEVENISZAP; SZUBSZTRÁT = ELŐÜLEPÍTETT SZENNYVÍZ DESZTILLÁTUM)



A gyógyszerek biológiai bonthatóságát a legegyszerűbben légzésintenzitás-vizsgálatokkal követhetjük nyomon. A légzésintenzitást az oxigénfelvételi rátával (Oxygen Uptake Rate, OUR) számszerűsíthetjük, amely a biomassza (eleveniszap vagy biofilm) metabolikus aktivitását tükrözi. A vizsgálatot oxigénelektóddal végeztük el, és az eredményeket mg O₂*L⁻¹*h⁻¹ formában adtuk meg. Minél nagyobb a légzésintenzitás, annál nagyobb az anyagcsere-aktivitás. Ezen keresztül következtethetünk a vizsgált szerves anyag biológiai bonthatóságára. A kometabolizmus úgy vizsgálható, hogy megmérjük a gyógyszer és a szubsztrát által okozott légzésintenzitást külön-külön és egyben is. Ha az együttes adagolás során nagyobb légzésintenzitási értéket kapunk, mint a külön mérték összesítésével, akkor a kometabolizmus működik:

$$OUR_{\text{gyógyszer}} + OUR_{\text{szubsztrát}} < OUR_{\text{gyógyszer+szubsztrát}}$$

Ha az együtt mért érték és az összesített között nincs különbség, akkor kometabolizmus nem jellemző az adott gyógyszer esetében:

$$OUR_{\text{gyógyszer}} + OUR_{\text{szubsztrát}} = OUR_{\text{gyógyszer+szubsztrát}}$$

14 gyógyszervegyületet esetében vizsgáltuk a jelenséget: eritromicin (ERY), oxacillin (OXA), trimethoprim (TMP), piperacillin (PIP), kloxa-

5. ábra: Különböző gyógyszerek kometabolizmus eleve-niszap-oltóanyaggal, előülepitett szennyvíz-desztillátum adagolása mellett (vak értékkel korrigált)

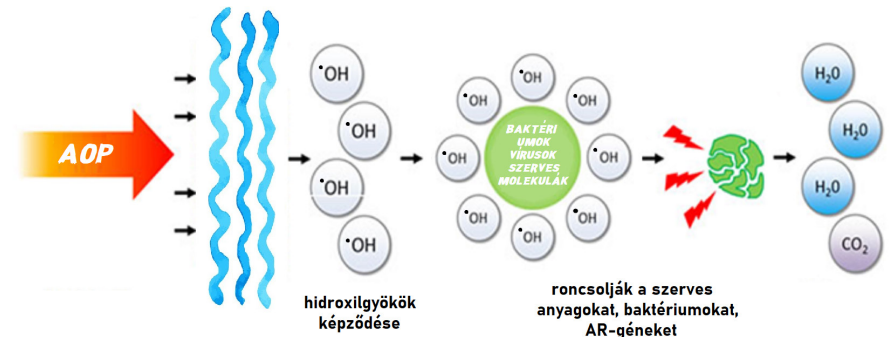
cillin (CLX), tetraciklin (TCN), oxitetraciklin (OTC), klórtetraciklin (CTC), doxiciklin (DOX), szulfametoxazol (SMX), diclofenák (DCF), ibuprofen (IBP), klofibrinsav (CFA), karbamezepin (CBZ). Szubsztrátként az előüle-pített szennyvíz desztillátumát használtuk. Az előülepitett szennyvízben az anaerob (oxigénmentes) bomlás során egyszerű szerves savak és al-koholok képződnek, főként ecetsav. A desztillátum a szennyvíz illósav-tartalma, amelyben a szubsztrátot dúsítjuk fel a kometabolizmushoz a desztillációval. Az oltóanyag, vagyis a vizsgált baktériumkultúra az eleve-niszap volt. Az 5. ábrán látható a légzéstesztek eredménye. Egy szín egy gyógyszert jelöl. Minden vegyülethez két oszlop tartozik azonos színnel, de eltérő mintázattal. A sávozott oszlop a gyógyszer és a szubsztrát kü-lön-külön mért légzésintenzitásának az összege. A telített oszlop az együttes adagolás során mért légzésintenzitás. Minden gyógyszervegyület ese-tében nagyobb a légzésintenzitása az együttes adagolásnak, azaz a telített oszlop mindig na-gyobb a sávozottnál, a kettő közötti különbség változó. Tehát a kometabolizmus változó intenzi-tású. A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a kometabolizmus az összes tesztelt gyógyszer-vegyület esetében működő jelenség. Egy másik kísérlet során nagyhatékonyágú folyadékkro-

matográfia (HPLC) vizsgálatokkal számszerűsítettük is a kometabolizmus hatékonyságát, vagyis a gyógyszer-koncentráció változását. Ebben az esetben egy speciális denitrifikáló biofilmkultúrát tápláltunk metanollal, és a közegben jelenlévő diclofenák (DCF, nemszteroid gyulladáscsökkentő, fájdalomcsillapító) koncentrációváltozását mértük a légzésintenzitás mellett. A biomassza metanolhoz szokott, mivel a napi gyakorlatban ez szolgál szervesanyag-forrásként a denitrifikációhoz (a nitrogéneltávolítás utolsó lépcsője) a Dél-pesti Szennyvíztisztító Telepen. A mért 0,59 mg O₂/ mg DCF oxigénfogyasztás és a gyógyszerfogyás arányából kiol-vasható, hogy az oxidáció nem teljes. A teljes oxidációhoz 2,32 mg O₂/ mg DCF-arány szükséges elméleti számítások alapján. Ez nem meglepő, mert a kometabolizmus valóban csak részleges bontást jelent. Félüzemi kísérletek alapján a kometabolizmus hatékonysága ennél a kultúránál 420±100 µg DCF*g⁻¹ biomassza*nap⁻¹. Ez a jelenség nemcsak ülepitett nyers szennyvízzel, hanem csurgalékvizekkel is működik.

A NAGYHATÉKONYSÁGÚ OXIDÁCIÓS ELJÁRÁSOK HASZNOSÁGÁRÓL

A nagyhatékonyágú oxidációs eljárások közös sajátossága, hogy ag-resszív gyökök, főként hidroxilgyökök (·OH) indítják el az átalakuláso-kat. A legismertebb eljárások: ózonozás, ózon és ultraibolya sugárzás (UV) kombinációja, hidrogén-peroxid és UV, fentonreakció, foto-fenton reakció, ultrahang alkalmazásán alapuló reakciók (szonokémia), ionizá-ló sugárzás (gamma-sugarak, elektrongyorsító).

6. ábra: A nagyhatékonyágú oxidációs technológiák (Advanced Oxidation Processes, AOPs) le-egyszerűsített működési elve (AR-gének: antibiotikumrezisztencia-gének). A folyamat végén, az ábra jobb oldalán feltüntetett szén-dioxid- és vízmolekulák a teljes mineralizáció (ásványosodás) lehetőségét mutatják. Ez nem feltétlenül magának az AOP-nak a közvetlen eredménye, inkább azt jelenti, hogy a roncsolt szerkezetű molekulák már biológiai úton lebomlanak a környezetben



A gyökök gyakran olyan oxigén-, nitrogén-, kén- vagy szénköz-pontú molekulák, molekulárszettek, amelyek elektronszerzés céljából nagyon gyorsan lépnek kémiai reakcióba más vegyületekkel. Tulajdonképpen megtámadnak más molekulákat. A biológiailag nem vagy nehezen bontható szerves molekulák szerkezetét képesek megbontani, roncsolni, így közvetve sejtrongáló, örökítőanyag-károsító hatásuk is van. Tehát az antibiotikum-rezisztencia elleni küzdelemben két fronton vívhatunk csatát e technológiák segítségével. Egyrészt a gyógyszer-molekulák szerkezetét megbontva azok nemcsak élettani aktivitásukat veszítik el, hanem megszűnik a rezisztencia kialakulásához szükséges modellszerepük. Nem tudnak a baktériumok hozzászokni a jelenlétükhöz. Másrészt az antibiotikumrezisztencia-géneket (AR-gének) is tönkreteszik, illetve a rezisztens baktériumokat elpusztítják (6. ábra).

A szerves molekulákat az alkalmazott dózistól függő mértékben roncsolják az AOP-k. Megfelelően nagy dózisonál nagyon egyszerű szerkezetű szerves molekulák (pl. szerves savak) és szervesetlen molekulák (pl. ammónia, nitrát, szulfát) képződnek. Ezek az egyszerű molekulák már fogyaszthatók a baktériumok számára, az anyagcsereutakon szén- és energiaforrásként hasznosulhatnak. Mindemellett a kometabolizmust is segítik, mert az egyszerű szerves savak hajtómotorként szolgálnak olyan enzimek működéséhez, melyek véletlenszerűen megváltoztathatják a gyógyszer-molekulák szerkezetét.

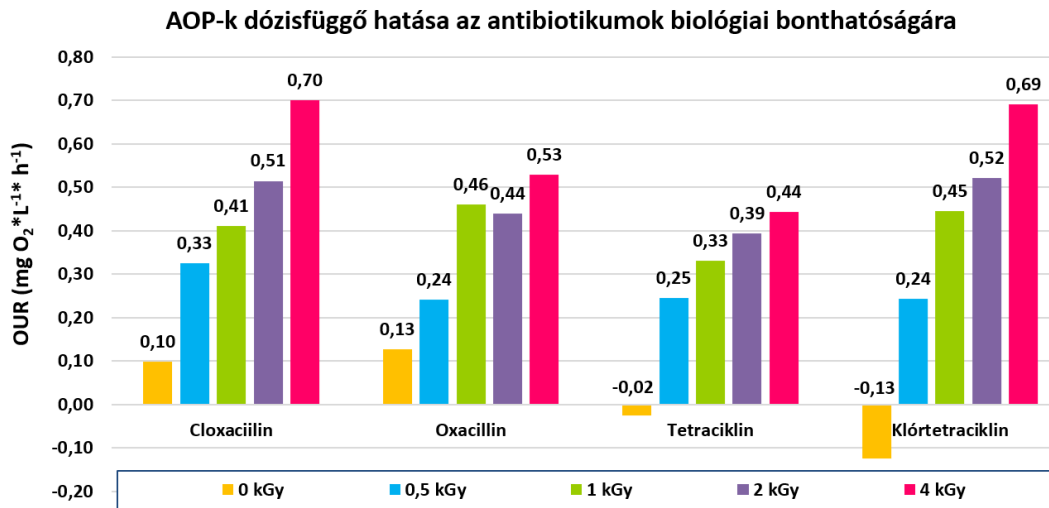
Az AOP-k biológiai bonthatóságra és kometabolizmusra gyakorolt hatását is vizsgáltuk. A modellezésére használt γ -radiolízis-kísérleteket az Izotóp Intézet Kft. tulajdonában lévő SLL-01 típusjelzésű, panoráma típusú Co^{60} γ -sugárforrással végeztük, 0,5-1-2-4 kGy dózist alkalmazva.

Négy gyógyszer (OXA, CLX, TCN, CTC) desztillált vizes oldata biológiai bonthatóságának változását, vagyis szubsztrát-

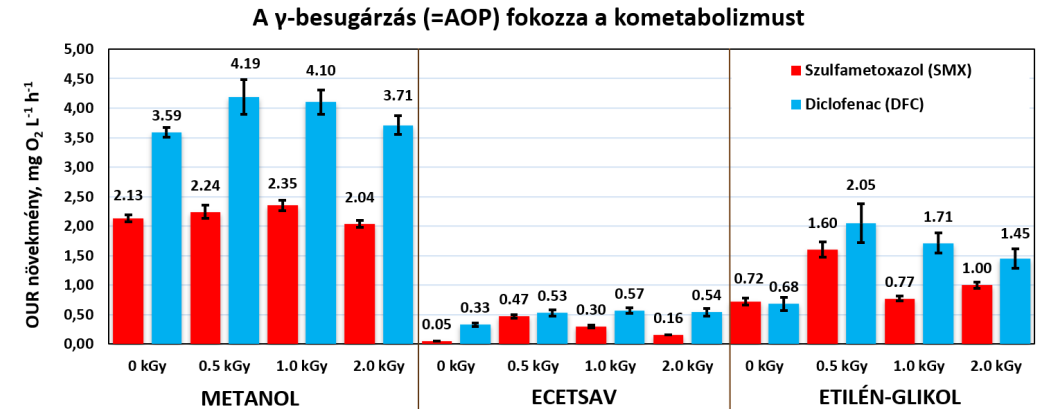
ként való hasznosulását követhetjük nyomon légzéseszkével. A 7. ábrán jól látható, hogy jelentős légzésintenzitás-növekedést mértünk minden alkalmazott dózisonál, és a bonthatóság az alkalmazott dózissal nőtt. A kezeletlen minták közül (0 kGy) a klórtetraciklin kifejezetten gátolta az eleveniszap normál aktivitását ($-0,13 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$), de ez a gátlás már a legkisebb alkalmazott dózisonál (0,5 kGy) eltűnt, és légzésintenzitás-növekedést mértünk ($0,24 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$).

A besugárzás (0; 0,5; 1; 2; 4 kGy) hatását a kometabolizmusra SMX és DCF esetén vizsgáltuk. Az eredmények a 8. ábrán láthatók, ahol az oszlopok a növekményt jelenítik meg, vagyis azt a változást, amelyet a kezeletlen/kezelt gyógyszer adagolása eredményez a szubsztrát önálló adagolásánál mérthez képest (szubsztrátlégzés). Szubsztrátként az enzimek megdolgoztatására metanolt, ecetsavat és etilén-glikolt használ-

8. ábra: A légzésintenzitás változása besugárzás hatására szulfametoxazol és diklofenák esetén, metanol, ecetsav, illetve etilén-glikol adagolása mellett. Az oszlopok a szubsztrátlégzéshez viszonyított növekményt jelenítik meg. Kezeletlen (0 kGy) DCF esetében a gyógyszer hatására működő kometabolizmus $3,59 \text{ mg O}_2^{-1} \text{ h}^{-1}$ légzésintenzitás-növekedést eredményez a metanol önálló adagolásánál mérthez képest (= szubsztrátlégzés) [28]



7. ábra: A γ -radiolízissel (0; 0,5; 1; 2; 4 kGy) kezelt gyógyszerek biológiai bonthatóságának változása. Vakkal (a biomassa önálló légzése) korrigált értékek



tunk. A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a kezeletlen mintákat önmagában a baktériumkultúra nem volt képes bontani ($0 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, azaz nem volt anyagcsere-aktivitás; ez nem szerepel az ábrán), míg szubsztrát jelenlétében (rendre ecetsav, etilén-glikol, metanol) a légzésintenzitás növekedett (SMX: $0,05 - 0,72 - 2,13 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$; DCF: $0,33 - 0,68 - 3,59 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Mindkét gyógyszervegyület lebontásánál a metanol bizonyult a leghatékonyabbnak.

Besugárzás hatására is javult a biológiai hozzáférhetőség mindkét gyógyszernél, a dózis növelésének függvényében. 0,5; 1,0 és 2,0 kGy elnyelt dózisonál az SMX esetében $0,16; 0,27$ és $0,35 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$, míg a DCF esetében $0,01; 0,14$ és $0,31 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ oxigénfogyasztás-növekedést mértünk.

A két módszer kombinálása során azt tapasztaltuk, hogy a kooxidáció hatékonyságát a besugárzás képes fokozni 0,5 kGy dóziséig (ecetsav, etilén-glikol, metanol sorrendben; SMX: $0,47 - 1,60 - 2,24 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$; DCF: $0,53 - 2,05 - 4,19 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1} \text{ h}^{-1}$), nagyobb dózisonál már nem tapasztaltunk javulást. A kezelés azonban nem metanol esetében hozta a legnagyobb javulást. A szulfametoxazolhoz adagolt ecetsav közel tízszeres, a diklofenákhoz kevert etilén-glikol háromszoros légzésintenzitást eredményezett az önálló kometabolikus hatáshoz viszonyítva.

Metanollal a kezelés hatása alig kimutatható (SMX: 2,13-ról 2,24 mg O₂ L⁻¹ h⁻¹-re; DCF 3,59-ről 4,19 mg O₂ L⁻¹ h⁻¹-re). (8. ábra)

A kísérletek során bebizonyosodott, hogy ugyan a γ -sugárzással végzett kezelés önmagában is képes biológiailag hozzáférhetővé tenni a gyógyszervegyületeket, a kometabolizmussal azonban a biológiai átalakulás jelentősen fokozható. Az eredmények alapján a AOP-k alkalmazása a – természetes folyamatok intenzifikálásán alapuló – kometabolizmussal sikeres fejlesztési útvonal lehet a szerves mikroszennyezők eltávolításában. [28]

ÖSSZEFOGLALÁS

A szerves mikroszennyezők eltávolítására sok új technológiai lehetőség nyílt meg az elmúlt egy-két évtizedben. A hatékony eltávolításuk a szennyvízből negyedik tisztítási fokozat kiépítésével érhető el. Ebben Svájc és Németország járt élen, ahol a hagyományos biológiai szennyvíztisztítási technológiák kiegészítőjeként első alkalommal 2014-ben, illetve 2015-ben helyeztek üzembe negyedik tisztítási fokozatot. A tisztítási hatások, a beruházási és üzemeltetési költségek, valamint az energiaigény figyelembevételével az ózonozás és az aktív szénen történő adszorpció tekinthető nagyüzemi méretekben is megvalósítható megoldásnak jelenleg, de biztatók az első gyakorlati eredmények az ionizáló sugárzás keltésére használt elektrongyorsítókkal.

A negyedik fokozat kiépítése és üzemeltetése mindenképpen költségnövekedést jelent egy szennyvíztisztító üzem számára. Jelenleg nincs létjogosultsága a BAT (Best Available Techniques; legjobb elérhető technológia) szerinti technológiáknak. Valószínűleg nem a bevetendő technológiák hiánya okoz problémát a jövőben, hiszen hatékonyan működtethetők például a nagyhatékonyságú oxidációs eljárások, hanem az általuk megnövelt szolgáltatási díjak. Effektíve bármit el lehet távolítani a szennyvízből, de a fogyasztóknak meg kell fizetni az árát.

A mikroszennyezők közül kiemelt jelentőséggel bírnak a gyógyszermaradványok. Jelentőségük nemcsak a felhasznált mennyiségük miatt nagy, hanem komoly népegészségügyi kockázatot is hordozhatnak bizonyos gyógyszerfajták. Az antibiotikumok mennyisége ahhoz kevés a szennyvízben (ng, ill. $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), hogy a szennyvíz baktériumait elpusztítsák, vagy szaporodásukat gátolják. Ugyanakkor a rezisztencia kialakulásához ez a közeg kedvező, így a kórházak mellett a szennyvíztisztító telepek is forró pontjai az ún. multirezisztens törzsek kialaku-

lásának. A másik fontos faktor az, hogy ún. horizontális génátadással képesek egymással megosztani az antibiotikumrezisztencia-géneket. A génátadásnak annál nagyobb a valószínűsége, minél több baktérium található egy helyen, így a nyers szennyvíz milliliterenkénti 10⁶-10⁸ CFU baktériumtömege megfelelő közegnek tekinthető.

Biológiailag csupán néhány mikroszennyező, illetve gyógyszermolekula bontható csak metabolikusan, azaz oly módon, hogy az anyagcserében valóban felhasználható (energia formájában, vagy szénként beépül). Ez ritka jelenség, nem jellemző a szennyvíztisztító rendszerek mikroorganizmus-közösségére. Azonban a gyógyszerek többségének molekulaszervezete valószínűleg véletlenszerű enzimreakciók (kometabolizmus) segítségével hozzáférhető. Ez ugyan csak részleges oxidációt jelent, és nem a molekula teljes lebontását, mégis elindulhat ezeknek a bonyolult szerkezetű molekuláknak a biológiai átalakulása. Így komoly beruházások nélkül is tudunk a mikroszennyezők eltávolításáért, ha a kometabolizmusban közreműködő baktériumcsoportokat (pl. nitrifikálók, metilotrófok) képesek vagyunk megoldoztatni. Minél inkább dolgozik egy enzim, annál nagyobb a véletlenszerű reakciók (kometabolizmus) valószínűsége. A nitrifikáló baktériumokat hosszú tartózkodási idővel, a denitrifikációban is jeleskedő metilotróf baktériumokat pedig metanoladagolással vehetjük rá a kometabolizmusra. Azonban az eleveniszap általánosságban is képes erre egyszerű szerves savakban gazdag vizek (előülepitett szennyvíz, csurgalékvizek) hasznosításával.

A nagyhatékonyságú oxidációs eljárások bevezetése több szempontból kedvező lehet a megemelkedett költségek ellenére is. A biológiailag nem vagy nehezen bontható szerves molekulák szerkezetét képesek megbontani, roncsolni az alkalmazott dózistól függő mértékben. A képződő egyszerű szerves és szeretlen molekulák már hasznosíthatók a baktériumok számára, mindemellett a kometabolizmust is segítik, mert hajtómotorként szolgálnak olyan enzimek működéséhez, amelyek véletlenszerűen megváltoztathatják a gyógyszermolekulák szerkezetét. Mivel az eljárások során képződő reaktív gyökök a komplex szerves molekulákat hasítják, így közvetve sejtrongáló, örökítőanyag-károsító hatásuk is van. Tehát az antibiotikum-rezisztencia elleni küzdelemhez valószínűleg nélkülözhetetlenek lesznek, mivel megbontják a gyógyszermolekulákat, az antibiotikumrezisztencia-géneket (AR-géneket) is tönkreteszik, illetve a rezisztens baktériumokat elpusztítják.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Zenker A., Cicero M.R., Prestinaci, F., Bottoni, P., Carere, M. (2014): Bioaccumulation and biomagnification potential of pharmaceuticals with a focus to the aquatic environment. *Journal of Environmental Management* 133, 378–387.
- Méhi, O. (2019): Már egy generáción belül katasztrofális következményei lehetnek az antibiotikum-rezisztenciának. Forrás: tudomany.hu/cikkek/mar-egy-generacion-belul-katasztrofalis-kovetkezmenyei-lehetnek-az-antibiotikum-rezisztencianak-109742
- Lord Jim O'Neill's independent antimicrobial resistance (AMR) review: amr-review.org
- Gajdács, M. (2019): Pánrezisztens kórokozók által okozott többlethalalozás: mi áll valójában a szakirodalomban? *Egészségfejlesztés*, 60 (2). pp. 29–35. ISSN 1786-2434
- Faigl, F. (szerk.), Szeghy, L., Kovács, E., Mátravölgyi, B. (2011): *Gyógyszerek. Egyetemi jegyzet. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Typotex Kiadó.* pp. 207–210.
- Furuya, E. Y., & Lowy, F. D. (2006): Antimicrobial-resistant bacteria in the community setting. *Nature Reviews Microbiology*, 4(1), 36–45.
- Enders, G. (2017): *Bélügyek – A belek csodálatos világa és a jó emésztés. Park Könyvkiadó.* pp. 149–155.
- Ju, F., Beck, K., Yin, X., Maccagnan, A., McArdell, C. S., Singer, H. P., Johnson, D. R., Zhang, T., Bürgmann, H. (2018): Wastewater treatment plant resistomes are shaped by bacterial composition, genetic exchange, and upregulated expression in the effluent microbiomes. *The ISME Journal*. doi: 10.1038/s41396-018-0277-8
- Wang, J., Chu, L., Wojnárovits, L., & Takács, E. (2020): Occurrence and fate of antibiotics, antibiotic resistant genes (ARGs) and antibiotic resistant bacteria (ARB) in municipal wastewater treatment plant: An overview. *Science of the Total Environment*, 140997.
- Sorgen, A., Johnson, J., Lambirth, K., Clinton, S. M., Redmond, M., Fodor, A., & Gibas, C. (2021): Characterization of environmental and cultivable antibiotic-resistant microbial communities associated with wastewater treatment. *Antibiotics*, 10(4), 352.
- Heß, S., Lüddecke, F., & Gallert, C. (2016): Concentration of facultative pathogenic bacteria and antibiotic resistance genes during sewage treatment and in receiving rivers. *Water Science and Technology*, 74(8), 1753–1763.
- Xu, Y., Yuan, Z., Ni, B.J. (2016): Biotransformation of pharmaceuticals by ammonia oxidizing bacteria in wastewater treatment processes. *Science of the Total Environment* 2016 566-567, 796–805.
- Záray, Gy. (2018): *Gyógyszermaradványok a felszíni vizekben. Magyar Tudomány*, 2018/9.
- BM-közlemény Magyarország felülvizsgált, 2015. évi vízgyűjtő-gazdálkodási tervéről. A 2015. december 22-én közzétett „A Duna-vízgyűjtő magyarországi része VÍZGYŰJTŐ-GAZDÁLKODÁSI TERV – 2015” dokumentumának összefoglaló rövidített változata. Forrás: net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A16K0142.BM&xtreferer=00000001.TXT
- ÁNTSZ (2016): *Módszertani levél a multirezisztens kórokozók által okozott fertőzések megelőzéséről.* Forrás: www.antsz.hu
- Margot, J., Kienle, C., Magnet, A., Weil, M., Rossi, L., Alencastro, L. F., Abegglen, C., Thonney, D., Chèvre, N., Schärer, M., Barry, D. A. (2013): Treatment of micropollutants in municipal wastewater: Ozone or powdered activated carbon? *Science of the Total Environment* 461–462. (2013), 480–498.
- Joss, A., Scharer, M., Abegglen, C. (2015): *Micropollutants: the Swiss strategy*. 2nd GF Water Technology Summit. www.water2020.eu
- Wunderlin, P. (2017): *Micropollutants in municipal wastewater: removal strategy in Switzerland.* www.unep.org/fileadmin/DAM/env/documents/2017/WAT/05May_04-05_Protocol_SDG_and_9th_TFTSR/presentations/11.Switzerland_Wunderlin.pdf
- Eawag: *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (2016): Swiss strategies and results from advanced wastewater treatment. ESAMUR XII Technical Conferences, Murcia, 9–10 Nov 2016*

20. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (2019): The Swiss approach in reducing micropollutants in wastewater. STOWA Workshop: Beating micropollutants in WWTPs, Nov. 5 2019, Aquatech Expo RAI, Amsterdam, NL
21. www.aquastrategy.com/article/switzerlands-progress-micropollutants-sewage
22. Cimbritz, M. (2016): International "state of the art" of eliminating pharmaceutical residues by wastewater treatment. Water and Pharmaceuticals – insights and perspectives for health and environment – 12–13. April, 2016 in Uppsala

23. nkfih.gov.hu/hivatalrol/otka-kiadvanyok/gyogyszermaradvanyok
24. atdi.uni-obuda.hu/sites/default/files/takacs-erzsebet-a-nagyenergiaju-sugarzas-gyakorlati-alkalmazasai-az-anyagtudomany-teruleten-2014-04-23.pdf
25. CGN Dasheng (2020): World's Largest Industrial Wastewater Treatment Project. Forrás: www.cgndea.com/worlds-largest-industrial-wastewater-treatment-project
26. Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., Liang, S., Wang, X. C. (2014): A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. Science of the Total Environment, 473–474., 619–641.

27. Bezesenyi, A., Sági, Gy., Bodáné Kendrovics, R., Bakosné Diószegi, M., Makó, M., Palkó, Gy., Wojnárovits, L., Takács, E. (2019): Kometabolizmus: Mikrobiológiai segítség a gyógyszermaradványok szennyvízből való eltávolításához. MASZESZ HÍRCSATORNA, 4 pp. 11–37. (2019)
28. Bezesenyi, A., Sági, G., Makó, M., Palkó, G., Tóth, T., Wojnárovits, L., Takács, E. (2019): The effect of combined cometabolism and gamma irradiation treatment on the biodegradability of diclofenac and sulfamethoxazole. Radiation Physics and Chemistry, 108642.

Komplett megoldások

- ▶ Vegyszeradagolás
- ▶ Mérés - és szabályozás technika
- ▶ Vízkezelés



További információkért kérjük, látogassa meg weboldalunkat:
www.prominent.hu vagy hívjon minket az alábbi telefonszámon: +36 96 /511-400



ProMinent®