

Györki Gábor¹

Szennyvízkezelés a múltban és a jelenben²

Wastewater Management through History

Absztrakt

Az emberiség történelmében több ezer éve fontos szerepet játszik a szennyvíz kezelése. Kezdetben csak a higiéniai feltételek biztosítása miatt volt rá szükség, a népesség és az ipari termelés növekedésével azonban a szennyezők kibocsátása már a természetes környezetet is fenyegeti. Amióta érzékelhetők a szennyezés hatásai, illetve kifejlődtek megbízható analitikai módszerek, mind a kutatás-fejlesztés, mind a törvényhozás egyre nagyobb figyelmet szentel a környezetvédelemnek, a szennyvíztisztításnak, a szennyvíz-újrafelhasználásnak. Jelen tanulmány a releváns szakirodalom áttekintésével szeretne átfogó képet adni arról, hogyan jutott el a szennyvízkezelés a történelem során a pillanatnyi állapotába.

Kulcsszavak: decentralizált szennyvíztisztítás, higiénia, környezetvédelem, makroszennyezők, szennyvízkezelés, történelem

Abstract

Wastewater management has played a crucial role in the history of mankind for thousands of years. Initially, it was necessary to ensure sanitary conditions, but since the rapid increase in population and industrial production, the high amounts of discharged pollutants are threatening the environment. Since the effects of pollution can be detected using modern, reliable analytical methods, both research and development, as well as legislation are paying

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víztudományi Kar Vízellátási és Csatornázási Tanszék, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky u. 12–14., e-mail: gyorki.gabor@uni-nke.hu

² Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víztudományi Kar, 6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky u. 12–14.

attention to environmental protection, wastewater treatment, and wastewater reuse. By reviewing the relevant literature, this study aims to provide a comprehensive picture of how wastewater management changed throughout history, and reached its current state.

Keywords: decentralised wastewater treatment, sanitation, environmental protection, macropollutants, wastewater management, history

Bevezetés

Napjainkban a környezetbiztonság és a környezetvédelem fogalma az élet szinte minden területén megjelenik. Ahogy a mindennapokban, különböző szakterületeken is figyelembe kell venni e szempontok érvényesülését. A környezetvédelem jól definiálható: azokat a tevékenységeket és szabályokat foglalja magában, amelyek az emberi tevékenységek által a természetes és épített környezetnek okozott károk kiküszöbölését szolgálják. Ezzel szemben a környezetbiztonság (vagy környezeti biztonság) egy folyamatosan változó, összetett fogalom.³ Többek között olyan ismert tevékenységek tartoznak ide, mint a hulladék mennyiségének általános csökkentése, az újrahasznosítás, a megújuló energiaforrások használata, valamint a biodiverzitás megőrzése.

A „szennyvíz” szó önmagában több nyelvben arra utalhat, hogy egy hulladékról van szó, amelytől egyszerűen meg kell szabadulni (hulladékvíz jelentése van például az angol waste water vagy az olasz acque reflue kifejezésnek is). A legmodernebb szennyvíztisztítási technológiák alkalmazása mellett nem csak a tisztítás és az emberi egészség megőrzése teljesül, egyszerre meg lehet felelni a környezetvédelem és a környezetbiztonság összes fent említett pontjának is. Az utóbbi években megjelent technológiák és találó újrafelhasználási módok lehetővé teszik, hogy az eddig hulladékként kezelt használt vizet pozitív hatások elérésére használjuk fel, így egyszerre védjük az emberi egészséget, segítjük a gazdaságot és csökkentjük a környezetterhelést. Egyre gyakrabban jelenik meg továbbá a „lineáris” gazdaságról az úgynevezett „cirkuláris” gazdaságra való átállás, vagyis a regeneratív vízgazdálkodás. Optimális esetben megszüntethető a szennyvíz befogadóba való kibocsátása, ezt a szakirodalom Zero Liquid Discharge (ZLD)-nak nevezi.⁴

Történeti áttekintés

Jelentős mennyiségű kutatás és tanulmány született arról, hogy a történelem során hogyan alakult a vízfelhasználás és a vízkezelés. Sok esetben írásos emlékek alapján állítható össze pontos kép, más esetekben csak a megmaradt vagy régészek által feltárt építmények és eszközök utalnak ezekre. Az is ismert továbbá, hogy kezdetben az emberi egészség védelme követelte meg a hulladék-, víz- és szennyvízkezelés fejlesztését. Az ipari forradalmak és a népességnövekedés hihetetlen felgyorsulása

³ HANKÓ-FÖLDI 2009: 24–38.

⁴ YAQUB-LEE 2019: 551–563.

exponenciálisan megnövelte a környezetszennyezés mértékét, így a 19–20. századra már elkerülhetetlen volt erre is figyelmet fordítani. A 21. században a népesség méretének és a vízkészletek mennyiségének aránya miatt még egy lépést kellett tenni, ennek legfőbb pontjai a folyamatos átállítás a víz minél nagyobb mértékű újrahaznosítására és az értékes nyersanyagok visszanyerésére.⁵

Egyes vélemények szerint a vízkezelés történetét vizsgálni lényegtelen, a múlt és a jelen közötti jelentős különbségekből adódóan, viszont a civilizáció fejlődése végigkísérhető az elveken és az alkalmazott technológiákon keresztül.⁶ A politikus és regényíró Victor Hugo szerint az emberiség történelme a csatornák történelmében tükröződik.⁷

A vízkezelés és a szennyvízkezelés több mint 5000 évvel ezelőttre nyúlik vissza, az ókori görög és szanszkrit írások alapján.⁸ Az emberek már ekkor felismerték a tiszta ivóvíz fontosságát: ismerték a szűrést, a homokszűrést, valamint a forralás jelentőségét. Természetesen a mikroorganizmusok jelenlétéről, valamint a kémiai szennyeződésekről még nem tudhattak. A környezetvédelem ekkor még ismeretlen fogalom volt, az emberek életmódjából adódóan nagyon sokáig nem is volt rá szükség. Az egyik legfőbb indok, hogy az emberiség népsűrűsége kisebb volt, az elszórt közösségek nem tudtak jelentős környezeti károkat okozni. A nomád életmódot követő letelepedett, termelő életmód vonta maga után a közösségek körüli tér folyamatos szennyeződését.⁹ Egy másik kézenfekvő indok, hogy a ma ismert és szabályzott szennyezők jelentős részét vagy nem tudták kimutatni, vagy még nem is léteztek.¹⁰ Közel 5500 éve Mezopotámiában néhány lakóháznak már volt lefolyója és szennyvíztározója. Az Indus-völgyi civilizációban hasonlóképp nem engedték valamilyen kezelés (leginkább szűrés, ülepítés) nélkül elfolyni a szennyvizet. Később Egyiptomban a társadalom felső rétegének már elérhető volt a fürdőszoba kezdetleges formája. Az ókori Görögország élen járt mind a vízkezelésben, mind a szennyvízkezelésben, latrinák alatt épített csatornák gyűjtötték össze a szennyvizet és szállították el a városból, többnyire a termőföldeken való felhasználásra.¹¹ Ezeket a találmányokat később a Római Birodalom tökéletesítette, kiterjesztve a vízellátást, a csatornázást és az általános higiéniát a társadalom szegényebb rétegeire, valamint elterjedten alkalmaztak kezdetleges emésztőgödörket is.¹²

Az egyik legkorábbi szennyvízfelhasználási eljárás a mezőgazdasági területeken való alkalmazás volt, amelyre már a bronzkorban is találunk példát. A nitrogénben és foszforban gazdag szennyvíz így az emberektől viszonylag távol került, természetes módon trágyázta a termesztett növényeket. Ez a megoldás azonban egészségügyi kockázatot (mikroorganizmusok) és környezeti kockázatot is (eutrofizáció, a talaj minőségének romlása) jelentett. A Római Birodalom bukása után a középkorban szinte teljesen eltűntek ezek a higiéniát szolgáló megoldások, és az ipari forradalomig szinte

⁵ TORRE et al. 2021.

⁶ SARMA 2018.

⁷ LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264.

⁸ SARMA 2018.

⁹ LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264.

¹⁰ SARMA 2018.

¹¹ LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264.

¹² JARAMILLO–RESTREPO 2017.

vissza sem tértek.¹³ A szennyvíz összegyűjtésére és mezőgazdasági felhasználására ezután volt néhány példa (London, 1189-től), de széles körben csak az újkor elején terjedt el ismét, főleg Európában.¹⁴

Az emberek a higiénia és a környezetvédelem fontosságára csak a 19. században jöttek rá, ezelőtt a szennyvizet szinte sehogy nem kezelték, sok esetben el sem vezették. Ezt támasztja alá a több európai járványhullám is, amelyek az iparosodás és a városiasodás során kialakuló higiéniai problémák miatt törtek ki.¹⁵ Ezenfelül a gőzgép és a szivattyú feltalálása után csaknem korlátlan mennyiségben állt rendelkezésre a víz a lakosságnak, az iparnak és a fellendülő vegyiparnak, az innen származó agresszív szennyvizek kezelés nélkül kerültek a befogadóba. Londonban a lakosság és az ipar által termelt szennyvíz a Temzét olyannyira zavarossá, koszoszá és kellemetlen szagúvá tette, hogy a folyó gúnyneveket is kapott (The Great Stench – A Nagy Bűz; Monster Soup – Szörnyleves). Ennek ellenére a folyó hígító hatását még mindig elegendőnek gondolták a tisztításhoz.¹⁶ Az 1830-as és 1850-es években szinte megállíthatatlanul terjedő kolera- és hastífuszjárványok több tízezer ember életét követelték. Ezután vált nyilvánvalóvá a betegségek vízzel való kapcsolata, így mérnöki megoldásokat hívtak segítségül, és még a 19. században modern csatornarendszereket építettek ki a szennyvíz biztonságos elvezetésére.¹⁷ A világon először egy 1861-es törvény mondta ki, hogy a szennyvizet tisztítani szükséges a befogadóba vezetés előtt. Először azonban csak fizikai tisztítást (rácsokat, később ülepitőket) alkalmaztak, a „modernebb” technológiák megjelenésére még fél évszázadot kellett várni. Az első eleveniszapos telep (akkoriban úgynevezett szellőztetési biológiai rendszer) 1914-ben épült Manchesterben, ami mér-földkőnek számított, ugyanis lerakta az alapját a környezetvédelmi ipar kialakulásának. Németországban már 1904-ben létrejött Európa első vízvédelmi szervezete, amely a folyók szennyezettségi állapotát vizsgálta. Ebben az időben definiálták a szennyvíz egy fontos paraméterét is, a biokémiai oxigénigényt, amely a biológiailag bontható szénforrások lebontásához szükséges oxigénmennyiség.¹⁸ A környezeti és egészségügyi problémák kezelésének módját ebben az időben jelentősen befolyásolta a politika, a tudományos felfedezések, valamint olyan társadalmi-gazdasági történések, mint a világháborúk.¹⁹

A 20. században a nagyvárosok folyamatosan fejlesztették ki az egyre újabb, jobb és költségesebb rendszereket: az ipari szennyezés jelentős problémává nőtte ki magát, aminek hatására több országban fogadtak el víztisztítással kapcsolatos törvényeket. Budapest jelentős eredményeket ért el a nagy fokú csatornázással, ezek hiányában pedig pöcegödörök és derítők alkalmazásával. Tisztítóművek épültek továbbá Pécsen és Debrecenben is. Hatékonyan alkalmazták már az iszap elgázosítását, valamint a klóros kezelést is, amelynek eredményeként a mikrobiológiai problémák lényegesen ritkábbak lettek. A második világháború után jelentős lassulás volt megfigyelhető,

¹³ LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264; JARAMILLO–RESTREPO 2017.

¹⁴ LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264; ANGELAKIS–SNYDER 2015: 4887–4895.

¹⁵ LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264.

¹⁶ JUHÁSZ 2011.

¹⁷ SARMA 2018.

¹⁸ JUHÁSZ 2011.

¹⁹ LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264.

majd a kutatások fellendülésével a vízminőségi problémák kezelése is újra felgyorsult.²⁰ Először az olyan, könnyen észlelhető vízminőségi paramétereket és eseményeket azonosították, mint az oxigénegyensúly, az eutrofizáció, a nehézfémek jelenléte, a savasodás, a talajszennyezés, majd az antropogén anyagok jelenléte. Fontos megjegyezni, hogy az ipar mindennap újabb és újabb szennyező anyagokat produkál, amire a tisztítási technológiák csak fáziskéséssel tudnak reagálni. Ez utóbbi szennyezők típusukat tekintve leginkább a mikroszennyezők közé tartoznak.²¹

Eltávolítandó szennyezők

A szennyvíztisztításban az ipari forradalom óta a makroszennyezők eltávolítása elengedhetetlen környezetvédelmi szempontból,²² a hagyományos fizikai, kémiai és biológiai úton működő szennyvíztisztító telepek és berendezések képesek ezeket megfelelő mértékben eltávolítani. Ide tartoznak olyan, relatíve nagy (általánosan az 1 mg/l feletti) koncentrációjú szennyezők, mint a lebegőanyagok, szerves anyagok és növényi tápanyagok.²³

A szennyvízben a nitrogén jelen lehet ammónia, nitrit, nitrát formájában és szerves anyagokban kötött nitrogénként, az esetleges szennyeződések típusától és korától függően. Felszíni vizekben friss szennyezésre utal a magas ammónia- és nitrittartalom, a nitrát az előrehaladott nitrifikáció folyamatára utal. A foszfor jellemzően ortofoszfát, polifoszfát, valamint szerves anyagokban kötött foszfor formájában van jelen a vizekben. Gyakori jelenség, hogy a szennyvíztelepekről kijutó nitrogén- és foszforformák mint növényi tápanyagok feldúsulnak a befogadóokban.²⁴ Ezek felszíni vizekbe jutása eutrofizációt (vízvirágzást) okozhat, amely során megnő a fotoszintetizáló szervezetek (algák/vízi növények) mennyisége, aránya és diverzitása, ami hatással lehet a táplálékláncre és a környező ökoszisztémára is. A jelentős tápanyag-feldúsulás miatt az algák gyorsan elszaporodnak, nehezen bontható anyagokat, esetleg toxinokat állítanak elő, az elburjánzó növényzet sok esetben a víz felszínét betéri, így árnyékolja a víz alsóbb rétegeit. Az emésztőgödrökből is kiszivároghatnak a tápanyagok, így nem körültekintő elhelyezés esetén a talajvízen keresztül eljuthatnak a felszíni víztestekhez, eutrofizációt idézve elő.²⁵

A szerves széntartalmú vegyületek (*total organic carbon*, TOC) jelentős része könnyen felhasználható szénforrást jelent a mikroorganizmusoknak, amelyek elszaporodásukkal anyagcseréjük révén befolyásolják a vízi élettereket, többek között az oxigénszint csökkentésével. Egyes vegyületek továbbá káros melléktermékeket képezhetnek az ivóvíztisztítás során alkalmazott vegyszerekkel. A TOC mellett a kémiai oxigénigény (KOI), valamint a biológiai oxigénigény (BOI) további fontos mérőszámai a vizeknek és a szennyvizeknek, amelyek az oxigénfogyáson keresztül

²⁰ JUHÁSZ 2011; LOFRANO–BROWN 2010: 5254–5264.

²¹ JUHÁSZ 2011.

²² JUHÁSZ 2011.

²³ KNISZ 2020.

²⁴ SMITH 2009: 61–73.

²⁵ HERREN et al. 2021.

adnak információt a szervesanyag-tartalomról. A szennyvíz szerves széntartalma jelentősen csökkenthető már ülepítés során is, nagyobb mértékű eltávolítás pedig a biológiai lépésekben történik.²⁶

A lebegőanyagok (*total suspended solids*, TSS) és oldott anyagok (*total dissolved solids*, TDS) további fontos jellemzők, amelyek jelentős változatosságot mutatnak nemcsak a szennyvíztelepek között, de adott telepen belül is. A lebegőanyagok lehetnek szerves, illetve szervesetlen eredetűek. A vizekben magas koncentráció esetén zavarosságot okoznak, valamint elnyelik a fényt, ezáltal a vízhőmérséklet megemelkedhet, az oldott oxigénszint pedig csökkenhet. A szennyvíztisztítás során a fertőtlenítésre használt UV-fényt is elnyelhetik, ezzel csökkentve annak hatékonyságát. Ezekből kifolyólag a lebegőanyagokat szűrők és rácsok segítségével, illetve flotálással, ülepítéssel eltávolítják.²⁷ Az oldott anyagok közé tartoznak az ásványi anyagok, oldott sók, fémek és néhány szerves anyag. A sók, valamint a fémek természetes mennyiségben nem okoznak gondot a természetben. A szerves anyagok (amelyek a víztestekbe kerülve megnövelnék azok oxigénigényét) jelentős részét biológiai úton könnyen el lehet távolítani, amennyiben biodegradálhatók és nem toxikusak. A káros szerves anyagok eltávolítása általában nem ilyen egyszerű, az utóbbi időkben azonban ezek eltávolítására is nagy hangsúlyt fektetnek.²⁸

A mikroszennyezők, a makroszennyezőkhöz képest, jelentősen alacsonyabb koncentrációban vannak jelen a vízben, és kis koncentrációban is mérgezők lehetnek. Általában az 1 mg/l-es szint alatt határozzák meg ezeket a komponenseket. Megkülönböztethetünk szerves és szervesetlen mikroszennyezőket is. Olyan anyagok tartoznak ide, mint a gyógyszermaradékok, peszticidek, ipari vegyszerek, nehézfémek, kozmetikai és testápolási szerek.²⁹ A legelterjedtebb szennyvíztisztítási eljárások nem képesek teljes mértékben eltávolítani néhány ilyen mikroszennyezőt, így a kezelt szennyvíz továbbra is veszélyt jelenthet a környezetre és az emberi egészségre.³⁰

A szennyvíztisztítás egyik célja a patogén ciklus megállítás, a patogén mikroorganizmusok eltávolítása általában meg is történik. A tisztítás úgynevezett harmadlagos fokozata felelős többek között a patogén baktériumok eltávolításáért, például UV-fertőtlenítés segítségével, ozonizálással vagy oxidatív reagensek adagolásával. Eleveniszapos rendszerek esetén az iszap dúsulhat a patogénekben, ami szintén nem elhanyagolható.³¹ Gyakran vizsgált és eltávolítani kívánt indikátorbaktériumok például az *Escherichia coli*, a *Salmonella* és a *Clostridium perfringens*. Ezek mellett fontos megemlíteni a patogén vírusokat (például adenovírusok), a férgeket (például galandférgek), valamint a protozoákat (például *Giardia lamblia*).³²

²⁶ KARCHES 2020.

²⁷ KARCHES 2020.

²⁸ NEMEROW 2007: 105–148.

²⁹ KNISZ 2020.

³⁰ ELGARAHY et al. 2021.

³¹ KNISZ 2020.

³² DE SANCTIS et al. 2017.

Centralizált és decentralizált rendszerek

A szennyvíztisztítás több mint 150 éves múltjában³³ számtalan különböző megoldást találunk, kisebb-nagyobb hatékonyságokkal, ezenkívül minden módszernek és berendezésnek megvan az előnye és a hátránya. A történeti áttekintésből világosan látszik, hogy a kezdetben emberi egészséget szolgáló megoldások egyre inkább olyan irányba fejlődnek, amely a környezetvédelmet is lényeges pontnak tekinti.

A rendszerek két nagy csoportba sorolhatók: ezek a centralizált telepek és a decentralizált megoldások. A centralizált kezelés során a szennyvizet összegyűjtik, majd elvezetés után nagy léptékben, a keletkezéstől távol tisztítják meg, a befogadóba jutás előtt. A decentralizált berendezések ezzel szemben definíció szerint a szennyvizet a keletkezés helyén, általában kis léptékben kezelik. Ez utóbbi rendszerek jelentős változatosságot mutatnak mind méret, mind felépítés és működési elv szerint.³⁴ A legkorábban alkalmazott emésztőgödörök szigorúan véve decentralizált rendszernek számítanak, bár kialakulásuk idején ez a kifejezés még nem létezett.

A centralizált rendszerek a 20. században jelentek meg, amikor szükségessé vált a nagy mennyiségű, koncentrált szennyvizet tisztítani. A nagyvárosok fejlődésével terjedtek el a szennyvíztisztító telepek, az épületek jelentős részét pedig csatlakoztatták a csatornarendszerhez.³⁵ Napjainkban is ilyen telepek látják el a nagyobb, illetve sűrűn lakott települések szennyvizének tisztítását. A kistelepüléseken csatornázás hiányában még mindig előfordulhat, hogy esetenként kezelés nélkül folyik el a szennyvíz az épületektől, ami jelentős terheket róhat a környezetre. Azokon a településeken és településrészekeken, ahol a csatornahálózat kiépítése gazdaságilag nem indokolt, ott az egyedi szennyvízkezelés valamely változatának használata kötelező a talaj, talajvíz és felszíni víz szennyezésének elkerülésére. A 174/2003. (X. 28.) Korm. rendelet szerint az egyedi szennyvízkezelés három eszköze egyedi szennyvízelhelyezési kislétesítmény, egyedi szennyvíztisztító kisberendezés vagy egyedi zárt szennyvíztároló létesítmény lehet.³⁶ Az első megoldáshoz tartozik például a gyökérszűrés tisztítás, míg az utóbbihoz az emésztőgödörök vagy szikkasztók alkalmazása.

Napjainkban viszont egyre népszerűbbek az olyan, modernebb technológiákat alkalmazó decentralizált rendszerek, mint az eleveniszapos reaktorok és a membrán bioreaktorok.³⁷ Ezeket leggyakrabban pénzügyi okokból, vagy csatornák hiányában kényszerből alkalmazzák, és a szennyvíztisztító telepekhez hasonlóan védik az emberi egészséget, valamint a környezetet, megállíthatják a felszíni vizek minőségromlását.³⁸ A kialakításból és működésből adódó különbségek miatt közvetlenül nehezen hasonlíthatók össze a centralizált és decentralizált rendszerek, ezt tovább nehezíti az eltérő mintavételezés, legfőképp pedig a beérkező szennyvíz összetételében rejlő eltérések. Míg a decentralizált rendszerek 1-1 ház, épület vagy gyár szennyvizét kezelik, a centralizált telepekre gyakran az esővíz, a lakossági és különféle ipari szennyvizek is

³³ JUHÁSZ 2011.

³⁴ BERNAL–RESTREPO 2012.

³⁵ JUHÁSZ 2011.

³⁶ KARCHES 2020.

³⁷ BÁBA–KARCHES 2020: 103–111.

³⁸ LIBRALATO – VOLPI GHIRARDINI – AVEZZÙ 2012; TORRE et al. 2021.

befolyanak, rendkívül összetetté téve a kezelendő vizet.³⁹ Az eutrofizáció megelőzését tekintve a jelenleg legjobb centralizált és decentralizált rendszerek hasonló eltávolítási hatásokkal rendelkeznek, a befogadó vizekben megakadályozzák a tápanyag-feldúsulást.⁴⁰ A decentralizált rendszereknek megfelelő üzemeltetés esetén több működésbeli előnyük is van, amelyek közvetlenül hatnak a természetes környezetre, az energiaigényeken keresztül pedig indirekt módon az éghajlatváltozásra. A szennyvíz a keletkezés helyén szétválasztható, a frakciók pedig célzottan kezelhetők. A feketevíz kezelhető granulált iszapos anaerob rendszerben (például Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB), a szürkevíz pedig eleveniszapos reaktorban vagy membrán bioreaktorban (MBR). Az UASB rendszerekben oxigén hiányában nem megy végbe a nitrifikáció és denitrifikáció, amely nitrogéngázt eredményezne; a biológiai többletfoszfor-eltávolítás pedig váltakozó anaerob és anoxikus terek kialakításával megoldható. Így megvalósítható a nagy fokú nitrogén- és foszforvisszanyerés, amely akár négyszer, illetve harmincszor hatékonyabb lehet egyes kisberendezések esetén. Így csökken az N₂O-kibocsátás,⁴¹ és indirekt módon csökkenthető a műtrágya-előállítás szükségessége. A centralizált telepeken a nitrifikáció során a nitrogén nagy része a légkörbe kerül, így nem nyerhető ki.⁴² A kémiai oxigénigényt vizsgálva megállapították, hogy a szerves anyagok eltávolítása és biogázzá alakítása is hatékonyabb a különböző szennyvizek szétválasztását alkalmazó rendszereknél. A biogázból energia nyerhető vissza, amely csökkenti az ilyen rendszerek jelentős energiafelhasználását, tovább csökkentve a környezeti terhelést.⁴³ A keletkezett iszap is kevesebb gondot okoz kisberendezések esetén: egyrészt a kisebb vegyszerhasználat miatt több lehetőség van annak felhasználására, másrészt nincs szükség magas költségű szállításra, kezelésre és elhelyezésre.⁴⁴ A nagyobb iszapkor és az eltérő mikrobiális összetétel miatt hatékonyabban történhet egyes szerves anyagok lebontása, egy kutatás szerint pedig 13 olyan anyagot is sikerült eltávolítani, amelyet a centralizált rendszerek nem tudtak, többek között például 3-metil-akridin, p-(2-metilallil)-fenol.⁴⁵

A kisberendezések legnagyobb előnyei a centralizált telepekkel szemben azonban nem a hatékonysággal függenek össze. Egy 2012-es kutatás részletesen ismerteti az azt megelőző, több mint 10 év pozitív tapasztalatait.⁴⁶ Jelentős pénzügyi előnynek számít, hogy nem kell egy kiterjedt csatornarendszert építeni és karbantartani, a berendezések kis helyet igényelnek, több változatban elérhetőek, és dinamikusan üzemeltethetőek. Ebből kifolyólag alkalmas megoldás az elszigetelt vagy kis létszámú települések kiszolgálására, megkönnyítheti a városok tervezését, viszont a megfelelő berendezést körültekintően kell kiválasztani.⁴⁷ Továbbá, nincs szükség a természetes vagy épített környezet megzavarására csatornák telepítésével. Odafigyelő szennyvízkezelés mellett kevesebb anyagi terhet ró a lakosságra, ami a gazdaságilag elmaradottabb

³⁹ LIBRALATO – VOLPI GHIRARDINI – AVEZZÙ 2012; BERNAL–RESTREPO 2012.

⁴⁰ TORRE et al. 2021.

⁴¹ BENCSIK–KARCHES 2015.

⁴² TORRE et al. 2021.

⁴³ BESSON et al. 2021; ESTÉVEZ et al. 2022.

⁴⁴ TORRE et al. 2021.

⁴⁵ MLADENOV et al. 2022.

⁴⁶ LIBRALATO – VOLPI GHIRARDINI – AVEZZÙ 2012.

⁴⁷ BOGUNIEWICZ-ZABŁOCKA – CAPODAGLIO 2017.

területeken kiemelten fontos. A centralizált telepek mint kritikus infrastruktúrák működését befolyásoló természeti katasztrófák (földrengés, viharok) és esetleges szándékos sabotázsok (terrorista támadások) jelentős kockázatot jelentenek. Ezzel szemben a decentralizált rendszerek kis méretükből, biztonságosabb működésükből és elszórt elhelyezkedésükből adódóan kevésbé kitettek ezeknek a veszélyeknek.⁴⁸ A legígéretesebb előnyük továbbá, hogy lehetővé (és kedvezővé) teszik a kezelt szennyvíz helyben történő újrahatszósítását. Korszerű és összetett módszerekkel ez felhasználható ivóvízként, toalettohlításra, viszont a leggyakoribb mód az öntözésre való felhasználás. A kitermelendő víz mennyisége és a víztestek terhelésének csökkentése mellett a tulajdonosoknak is megtakarítást jelenthet.⁴⁹ Fontos megemlíteni, hogy az elégtelenül kezelt szennyvízben maradt patogén baktériumok jelentős egészségügyi kockázatot jelentenek felszíni öntözésre való felhasználás esetén.⁵⁰ Egy 2012-es tanulmány összefoglal több olyan esetet, ahol a decentralizációval jelentős sikereket értek el: az Egyesült Államokban a kezelt szennyvizet több helyen használják kertek, golfpályák és közterületek öntözésére. Pekingben a nagyobb intézmények rendelkeznek saját decentralizált szennyvíz-újrahatszósító rendszerrel, Velence szigetein pedig 4493 kisberendezés látja el a szennyvízkezelést.⁵¹

A kutatások alapján a decentralizált rendszerek mindenképpen előnyösebbek a környezetre és az emberi egészségre nézve, mint a szennyvizek közvetlen befogadóba engedése, bármilyen típusú vagy koncentrációjú szennyvízről legyen is szó. A centralizált rendszerekkel szemben viszont a felsorolt előnyök mellett néhány hátrány is jelentkezhet. Először is, szennyvíz-térfogategységre lebontva a modern kisberendezéseknek nagyobb az energiaigényük,⁵² ez nagyobb nyersanyag-felhasználást von maga után. Ez önmagában kedvezőtlen, de a korábban tárgyalt előnyökkel a környezeti hatások összességében csökkenthetők.⁵³ A meghibásodások miatti esetlegesen környezetbe kerülő kezeletlen szennyvíz a kisebb hígítás miatt lokálisan nagyobb károkat okozhat.⁵⁴ Ennek kiemelt jelentősége van, tekintve, hogy a kisberendezések karbantartása nem minden országban megoldott.

Összefoglalás

Ez a tanulmány a releváns szakirodalom feldolgozásával vette sorra az ókortól napjainkig tartó fejlődést és változásokat a szennyvízkezelés témakörében, és hasonlította össze az aktuálisan alkalmazott két legfontosabb technológiai megoldást. A történelmi események és az utóbbi idők jogszabályai alapján jól követhető, hogyan kap egyre nagyobb jelentőséget a természetes környezet védelme. A történelem során többször is előfordult, hogy a háborúk és konfliktusok miatt a környezetvédelem háttérbe került,

⁴⁸ LIBRALATO – VOLPI GHIRARDINI – AVEZZÙ 2012.

⁴⁹ LIBRALATO – VOLPI GHIRARDINI – AVEZZÙ 2012.

⁵⁰ KNISZ et al. 2021.

⁵¹ BERNAL–RESTREPO 2012.

⁵² KARCHES 2022.

⁵³ BESSON et al. 2021; TORRE et al. 2021.

⁵⁴ TORRE et al. 2021.

azonban minden esetben igazolódik ennek rendkívüli fontossága. Az utóbbi néhány évtized kutatásai rávilágítottak azokra a pontokra, ahol van lehetőség fejleszteni a szennyvíztisztításon, a kapcsolódó publikációk egyre növekvő száma pedig igazolja, hogy egy releváns, intenzíven kutatott témáról van szó. A folyamatosan megjelenő innovatív megoldások közelebb vihetik az emberiséget ahhoz, hogy az erőforrások megvédésével biztosíthassa saját fejlődését. Mindazonáltal törekedni kell arra, hogy a különböző technológiák alkalmazása során a gazdaságosság és az egészségvédelem mellett mindig központi szerepet kapjon a környezetvédelem.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

Felhasznált irodalom

- ANGELAKIS, Andreas N. – SNYDER, Shane A. (2015): Wastewater Treatment and Reuse: Past, Present, and Future. *Water (Switzerland)*, 7(9), 4887–4895. Online: <https://doi.org/10.3390/w7094887>
- BÁBA, Barnabás – KARCHES, Tamás (2020): Sizing of a Decentralized Wastewater Treatment Unit Supported by Biokinetic Modeling. *Pollack Periodica*, 15(1), 103–111. Online: <https://doi.org/10.1556/606.2020.15.1.10>
- BENCsik, Dániel – KARCHES, Tamás (2015): Estimation of GHG Emissions of a Fixed Bed Biofilm Reactor Cascade in Wastewater Treatment. *Journal of Environmental Science and Engineering A*, 4(11). Online: <https://doi.org/10.17265/2162-5298/2015.11.001>
- BERNAL, Diana P. – RESTREPO, Inès (2012): Key Issues for Decentralization in Municipal Wastewater Treatment. In *12th edition of the World Wide Workshop for Young Environmental Scientists*. Online: <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00731140>
- BESSON, Mathilde et al. (2021): Environmental Assessment of Urine, Black and Grey Water Separation for Resource Recovery in a New District Compared to Centralized Wastewater Resources Recovery Plant. *Journal of Cleaner Production*, 301. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126868>
- BOGUNIEWICZ-ZABŁOCKA, Joanna – CAPODAGLIO, Andrea G. (2017): Sustainable Wastewater Treatment Solutions for Rural Communities: Public (Centralized) or Individual (On-Site) – Case Study. *Economic and Environmental Studies*, 17(44), 1103–1119. Online: <https://doi.org/10.25167/ees.2017.44.29>
- DE SANCTIS, Marco et al. (2017): Removal of Pollutants and Pathogens by a Simplified Treatment Scheme for Municipal Wastewater Reuse in Agriculture. *Science of the Total Environment*, 580, 17–25. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.002>

- ELGARAHY, A. M. et al. (2021): A Critical Review of Biosorption of Dyes, Heavy Metals and Metalloids from Wastewater as an Efficient and Green Process. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100209. Online: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100209>
- ESTÉVEZ, Sofia et al. (2022): How Decentralized Treatment Can Contribute to the Symbiosis Between Environmental Protection and Resource Recovery. *Science of the Total Environment*, 812. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151485>
- HANKÓ Márta – FÖLDI László (2009): Életterünk környezetbiztonsági kérdései. *Hadmérnök*, 4(4), 24–38. Online: http://hadmernok.hu/2009_4_hanko1.pdf
- HERREN, L. W. et al. (2021): Septic Systems Drive Nutrient Enrichment of Groundwaters and Eutrophication in the Urbanized Indian River Lagoon, Florida. *Marine Pollution Bulletin*, 172. 112928. Online: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112928>
- JARAMILLO, María F. – RESTREPO, Inés (2017): Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability (Switzerland)*, 9(10), 1734. Online: <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- JUHÁSZ Endre (2011): *A szennyvíztisztítás története*. Budapest: Magyar Víziközmű Szövetség.
- KARCHES Tamás szerk. (2020): *Kis kapacitású szennyvíztisztító létesítmények*. Budapest: Ludovika.
- KARCHES, Tamás (2022): Fine-Tuning the Aeration Control for Energy-Efficient Operation in a Small Sewage Treatment Plant by Applying Biokinetic Modeling. *Energies*, 15(17). Online: <https://doi.org/10.3390/en15176113>
- KNISZ Judit szerk. (2020): *Szerves mikroszennyezők a vizekben*. Budapest: Ludovika.
- KNISZ, Judit et al. (2021): Genome-level Insights into the Operation of an On-site Biological Wastewater Treatment Unit Reveal the Importance of Storage Time. *Science of the Total Environment*, 766. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144425>
- LIBRALATO, Giovanni – VOLPI GHIRARDINI, Annamaria – AVEZZÙ, Francesco (2012): To Centralise or to Decentralise: An Overview of the Most Recent Trends in Wastewater Treatment Management. *Journal of Environmental Management*, 94(1), 61–68. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.07.010>
- LOFRANO, Giusy – BROWN, Jeanette (2010): Wastewater Management through the Ages: A History of Mankind. *Science of the Total Environment*, 408(22), 5254–5264. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062>
- MLADENOV, Natalie et al. (2022): Persistence and Removal of Trace Organic Compounds in Centralized and Decentralized Wastewater Treatment Systems. *Chemosphere*, 286. Online: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131621>
- NEMEROW, Nelson L. (2007): Removal of Organic Dissolved Solids. In *Industrial Waste Treatment*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 105–148. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-012372493-9/50043-0>
- SARMA, Bornali (2018): Evolution of Waste Water Treatment Technology and Impact of Microbial Technology in Pollution Minimization during Natural Fiber Processing. *Current Trends in Fashion Technology & Textile Engineering*, 3(5), 555621. Online: <https://doi.org/10.19080/CTFTE.2018.03.555621>

- SMITH, V. H. (2009): Eutrophication. In LIKENS, Gene E. (szerk.): *Encyclopedia of Inland Waters*. Amsterdam: Elsevier, 61–73. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00234-9>
- TORRE, Andre et al. (2021): Wastewater Treatment Decentralization: Is This the Right Direction for Megacities in the Global South? *Science of the Total Environment*, 778, 146227. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146227>
- YAQUB, Muhammad – LEE, Wontae (2019). Zero-liquid Discharge (ZLD) Technology for Resource Recovery from Wastewater: A Review. *Science of the Total Environment* 681, 551–563. Online: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.062>