

Bencsik Dániel¹ 

Modellszintű stratégiák szélsőséges időjárás által előidézett káresemények elhárítására szennyvíztisztító telepeken

Model-Based Strategies for Managing Extreme Weather-Related Emergencies at Wastewater Treatment Plants

A szennyvíztisztítási technológiák szakszerű üzemeltetése környezetbiztonsági szempontból elengedhetetlen. A klímaváltozás pedig kihívásokat idéz elő tervezői és üzemeltetői oldalról is. A tanulmány közép-európai tisztítótelepekre adaptált matematikai modell segítségével technikai megoldásokat tár fel a szélsőséges csapadékvíz-terhelés által megnehezített biológiai tisztítás stabilizálására. A modellkísérletek eredményei alapján, ismétlődő esőzéseknel – a stabil üzemállapot fenntartása érdekében – a kellően hatékony denitrifikációnak megfelelően szükséges növelni a belső recirkulációs térfogatáramot. Nagy intenzitású viharok esetén hirtelen romlik a biológiai többletfoszfor-eltávolítás hatékonysága, ezért elkerülendő a vízminőségi határérték esetleges megszegése szakaszos fémsó adagolással, a biológiai tisztítás után. Továbbá, a szimulációk alapján, berendezés kiválasztásánál érdemes szem előtt tartani, hogy a fűvők képesek legyenek fedezni a hidraulikai csúcsterhelésből eredő magasabb levegőszükségletet.

Kulcsszavak: dinamikus modellezés, havária, katasztrófavédelem, szennyvíz-technológia, szélsőséges csapadékesemény

The reliable operation of wastewater treatment technologies is essential for environmental security. However, climate change poses challenges in the field of both design and operation. This paper proposes technical solutions for handling difficulties in biological treatment due to extreme rainwater flow, using a mathematical model adapted to Central European treatment plants. The results of modelling show that, to maintain stable effluent quality in case of repeated rainwater peaks, the internal recirculation flow rate shall be adjusted to provide sufficient denitrification.

¹ Nemzeti Közszolgálati Egyetem, e-mail: bencsik.daniel@uni-nke.hu

Storms with high frequency peak flows may cause sudden deterioration in enhanced biological phosphorus removal, when effluent quality limit violations can be prevented using temporary dosage of metal salt subsequent to biological treatment. The simulations further emphasize that, regarding equipment selection, it is important to consider the need for an increase in the aeration capacity caused by hydraulic loading peaks.

Keywords: *disaster management, dynamic modelling, emergency, extreme storm event, wastewater treatment*

Bevezetés

A mennyiségi és minőségi igényeknek megfelelő vízellátás mai társadalmunkban alapkövetelmény, amelynek csupán részleges teljesítése konfliktusok forrása lehet. Amennyiben a hulladékvizek tisztítása mennyiségileg vagy minőségileg nem elegendő, a vízbázisok jelentős elszennyezése által kihathat az ivóvízellátásra is. Továbbá a fürdőhelyek, lakóhelyek vízi környezetére jelentett mikrobiológiai kockázat révén közegészségügyi és társadalmi problémákhoz vezethet. Ezért a technológiák szakszerű üzemeltetése környezetbiztonsági szempontból rendkívül fontos. Napjaink éghajlati és vízhasználati trendjei – a globális felmelegedés előidézte helyi hőmérséklet- és csapadékmennyiség-változás, illetve az emberiség növekvő vízigénye – pedig kihívásokat idéznek elő a tervezés és üzemeltetés oldaláról is.²

Jelen tanulmány keretében üzemeltetési stratégiai javaslatteteleket mutatunk be szennyvíztisztító létesítmények esetleges haváriaeseményeinek kezelésére, a stabil üzemállapot visszaállítására. A kutatás a hosszas esőzés hatásainak kezelési lehetőségeire irányul, ami a létesítmény hidraulikai és anyagmérlegét összetetten befolyásolja. A szimulációkban alkalmazott újszerű anyagátadási kinetikai megközelítés figyelembe veszi az ebből eredő dinamikus ingadozást az oxigénátadásban is, és ebből kifolyólag a levegőszükségletben is.³ A javaslattetelekhez létesítményszintű matematikai modelleket alkalmazunk. A tanulmány célja a – jellegzetes magyar éghajlati viszonyokra és szennyvízminőségi tulajdonságokra helytálló – szükséghelyzet esetén alkalmazható műszaki javaslatok kidolgozása, amelyek tervezői és üzemeltetői szempontból is hasznosíthatók.

A szennyvíz-technológia nemzetvédelmi kapcsolódási pontjai

A nagyvárosok szennyvíztisztító létesítményei működésének védelme kiemelt közfeladat. Magyarországon a 250 000 lakosegyenérték szennyezőanyag-terhelést meghaladó kapacitású telepeket – amelyek működésképtelenné válása a felszíni víz jelentősen kedvezőtlen állapotát eredményezi – a kritikus infrastruktúrák nemzeti létfontosságú rendszerelemeként kell azonosítani. Ezenfelül európai létfontosságú rendszerelemnek minősül egy szennyvíztisztító létesítmény, ha üzemzavar vagy havária esetén Magyarország és legalább egy szomszédos

² FÖLDI et al. 2015: 13.

³ USEPA 1989a: 16.

állam felszíni, illetve felszín alatti víztesteit a határon áttérjedő hatás miatt jelentős mértékben és tartósan elszennyezheti.⁴

Az alacsonyabb terheltségű létesítmények szintén veszélyeztetettek a természeti és civilizációs eredetű katasztrófák által, amelyek elhárításához indokolt esetben (például műszaki mentés, tereptisztítás) akár a Magyar Honvédség is biztosíthat eszközöket a Katasztrófavédelem számára. Továbbá a Honvédség állománya felkérés esetén részt vesz a katasztrófavédelmi segítségnyújtásban.⁵

A környezetbiztonság jelentősége a szennyvíztisztításban

A vízminőségi határértékeknek megfelelően, az optimális üzemrend megteremtésével a kibocsátások minimalizálására törekednek az illetékes szakemberek. A jövőben egyre fontosabb szempont lehet az üvegházhatású gáz- – főképp a biológiai kezelés során keletkező N_2O és CH_4 – kibocsátások csökkentése is.⁶ Akár műtárgyak tisztítása vagy felújítása során is felléphetnek kiesések a tisztítási kapacitásban, kihatva az elfolyóvíz-minőségre, ezért a karbantartási vagy üzembehelyezési stratégia eltervezésénél lényeges szempont egy alacsonyabb terheltségű, melegebb időjárású időszak kiválasztása, a művelet minél gyorsabb lebonyolítása és a technológiai sorok hatékony felterhelésének megvalósítása érdekében.⁷ Azonban bizonyos katasztrófák okozta hirtelenszerű események kezelésére minden évszakban fontos, hogy felkészültek legyenek a létesítmények üzemeltetői.⁸

A természeti katasztrófák közül a földrengések a szennyvízcsatorna törését, a szivattyúk és a műtárgyak sérülését okozhatják; az árvizek szintén károsíthatják a műtárgyakat, szivattyúkat, és visszanyomhatják a szennyvizet a lakásokba.⁹ A klímaváltozás szélsőséges időjárást idéz elő, ami hatással lehet a szennyvíztisztító telepek üzemállapotára. Az erős szél akár telepekre is kiható áramszüneteket eredményezhet, leállítva az összes villamos gép működését, beleértve a nyers szennyvíz betáplálását. Ugyanakkor áramkimaradást civilizációs eredetű katasztrófák (például kibertámadás) is eredményezhetnek.¹⁰

Az éghajlatváltozás szélsőséges csapadékvíz-terhelés formájában is megnyilvánulhat; ismert, hogy a Kárpát-medencében a csapadék mennyisége az elmúlt száz év átlagához képest csökken, viszont az intenzív és visszatérő csapadékesemények száma nő.¹¹ Az ismétlődő viharok következtében a megnövekedett csapadékvíz-mennyiséggel jelentősen felhígulhat a műveleti egységek tartalma, potenciálisan megnehezítve a – megváltozott összetételű biomassza által végzett – tisztítást. A haváriaesemények kezeléséhez fontos az üzemeltetők felkészültsége, berendezések méretezésénél pedig lényeges szempont lehet a tartalék kapacitás biztosítása.

⁴ 541/2013. (XII. 30.) Korm. rendelet.

⁵ 2011. évi CXIII. törvény.

⁶ HALÁSZ–FÖLDI 2007: 183.

⁷ KARCHES et al. 2020: 240.

⁸ USEPA 1974.

⁹ FÖLDI–HALÁSZ 2013: 66.

¹⁰ FÖLDI–HALÁSZ 2014: 13.

¹¹ DOMJÁN et al. 2019: 25.

Helytelen üzemeltetés eredményeképp – főként csapadékesemények során – a medencékből kimosódhat a biomasza jelentős része, lerontva a tisztítási folyamatok hatékonyságát, és kiülepedő, berothadó iszappal szennyezve a befogadó víztestet. Utóbbi esetben a katasztrófavédelmi szervek akár az üzemeltetőt is kötelezhetik vízminőség-javító kotrásra, a további környezeti károk megelőzése, mentesítése céljából.¹²

A szennyvíztisztítás iparbiztonsági vonatkozásai

A szennyvíztelepek általánosabb katasztrófavédelmi kérdéskörébe tartoznak a munkavégzési szabályzatok, többek között a foglalkoztatott munkaerő megfelelő munkavédelmi és tűzvédelmi oktatása, szükséges védőfelszereléssel történő ellátása, illetve – mivel állandó jelleggel közvetlenül is patogén anyagoknak van kitéve – kötelező védőoltásokkal való ellátása. A rutinszerű műveletektől eltérő tevékenységekről (például különleges mérési kampányok, időszakos karbantartási munkálatok) pedig további biztonsági instrukciókkal kell ellátni a végrehajtó szakembereket. Mivel a kommunális szennyvíztisztító üzemek nyilvános létesítmények, biztosítani kell a veszélyes területek elszigetelését az üzemlátogatásokon részt vevő emberektől, illetve a személyzetnek tájékoztatnia kell a látogatókat a rájuk vonatkozó veszélyforrásokról.¹³

A szennyvíz-technológia egyik fő iparbiztonsági vonatkozása a veszélyes anyagok alkalmazásaihoz kötődik. A legtöbb tisztítótelepen adagolnak vegyszereket (pótszénforrásként, pH-szabályozásra stb.). Bizonyos kemikáliák tűzveszéllyel, maró, mérgező vagy egyéb hatásokkal járhatnak, amelyekről a gyártó köteles tájékoztatást adni a biztonsági adatlapokon; tárolásukra, szállításukra és mozgatásukra pedig szigorú biztonságtechnikai előírások vonatkoznak a telepek üzemeltetési és karbantartási szabályzatában.¹⁴

Tervezés során, iparbiztonsági szempontból mindenképp szem előtt kell tartani a víz- és iszapvonali műtárgyak, csővezetékek mechanikailag biztonságos kialakítását, potenciális szivárgások elkerülése végett, amelyek a talaj és a felszín alatti vizek elszennyeződéséhez vezethetnek.¹⁵ Ezenkívül biogázvonalon, levegőtisztaság-védelmi okokból hasonlóan fontos a szivárgások megelőzése, illetve a nyomás alatti szerkezetek megbízható kialakítása a robbanásveszélyes körülmények elkerülésének érdekében. Szakszerűtlen tervezés vagy üzemeltetés által a levegőszállító vezetékekben repedések, törések keletkezhetnek – a nem megfelelő nyomásviszonyok kialakulása miatt – jelentős energiapazarláshoz vezetve. Karbantartási stratégiák kidolgozásakor arra törekedve kell kiválasztani az eljárásokat és azok gyakorlatiát, hogy ne befolyásolják a telep biztonságos üzemvitelét, és hosszú távon ne rontsák a szennyvízkezelés hatékonyságát.¹⁶

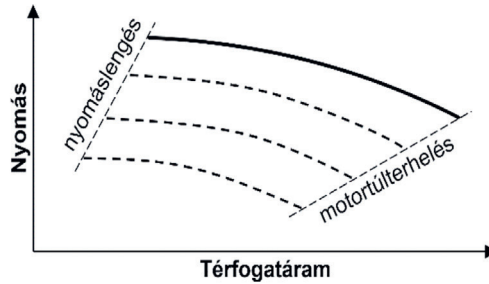
¹² A Csatornázási Művek tájékoztatása a Gyáli-patak szennyezéséről. 2020.

¹³ 24/2007. (VII. 3.) KvVM rendelet a Vízügyi Biztonsági Szabályzat kiadásáról.

¹⁴ 2000. évi XXV. törvény a kémiai biztonságról.

¹⁵ BERGER – KÁTAI-URBÁN 2020.

¹⁶ CHEN et al. 2020: 452.



1. ábra: Működési korlátokat bemutató generikus fűvő/szivattyú jelleggörbe

Forrás: a szerző szerkesztése

Tervezők és üzemeltetők számára egyaránt rendkívül fontos a kiválasztott villamos gépek működési tartományainak megfelelő ismerete, alkalmazkodniuk kell a terhelésből adódó maximumokhoz. Szivattyúk és fűvők esetében nagy nyomás- és kis térfogatáram-értékek mellett nyomáslengés és a szállított közeg felmelegedése léphet fel, károsítva a motort és a hidraulikus szerkezeteket; túlzottan nagy szállított mennyiségnél viszont a motor terhelődhet túl, annak és az alkatrészeknek a tönkremeneteléhez vezetve. Az energiahatékonyság, illetve biológiai folyamatok szabályozása céljából a gépek teljesítményének szabályozhatósága is hasznos, a terhelés változásainak megfelelően.¹⁷ Az 1. ábra a centrifugál szivattyúkra és kompresszorokra jellemző jelleggörbéket szemlélteti – a folytonos görbe a névleges maximális fordulatszám esetére vázolja fel a nyomás–térfogatáram profilt, a szaggatott görbék pedig a frekvenciaváltóval szabályozott profilokat jelzik. A görbéket határoló két egyenes mutatja a berendezés – gyártók által rendszerint ismertetett – működési korlátozásait, amelyek átlépése hosszú távon veszélyes az élettartamára és a létesítmény biztonságára nézve.

Módszertan

A modellközpontú tanulmány célja, hogy a haváriaesemények elhárítására következtetéseket vonjon le méretezés és működtetés szempontjából egyaránt. A csúcsterhelések jellege mérvadó lehet műveleti egységek tervezésénél és berendezések kiválasztásánál, amihez a valós tapasztalatok alapján kalibrált dinamikus modellek hasznos eszköznek bizonyulhatnak. Üzemeltetési stratégiai szempontból a modellezés például irányítási technikák fejlesztésével költségmegtakarítási lehetőségeket tárhat fel, és rámutathat a környezetvédelmi előírások hatékony betartásához szükséges beavatkozásokra.¹⁸ A szennyvíz-technológiában használatos változókra felírt reakciósebesség- és komponensmérleg-egyenletek megoldása biokinetikán alapuló szimulációs környezetet igényel.¹⁹ A vizsgálatokhoz a Sumo21 szimulációs szoftvert

¹⁷ KÓSA–LUKENICS–VERBA 1997: 93.

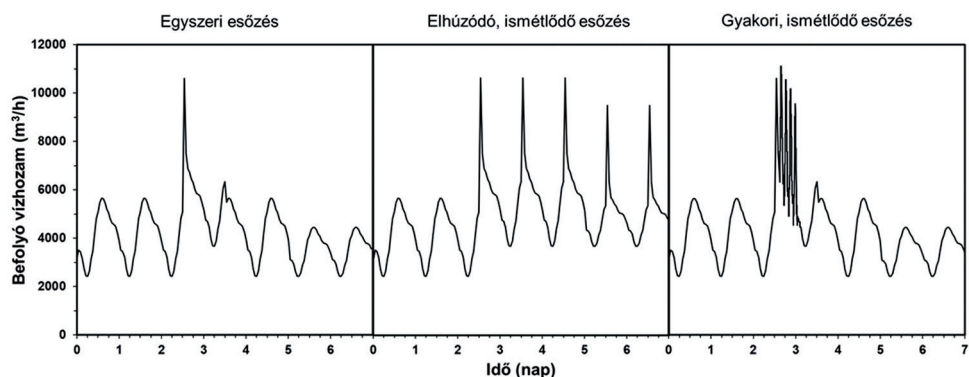
¹⁸ RIEGER et al. 2012: 28–29.

¹⁹ BÁBA–KARCHES 2021: 62.

alkalmazzuk. A szoftverkörnyezet üzemszintű modellkonfigurációk felépítését teszi lehetővé, amelyek a mérnökök számára átláthatóvá teszik a szennyvíz- és iszapvonalai anyagmérlegeket, energiagazdálkodást.²⁰

A tisztítandó víz modellbeállításai

A szimulációkban a 2. ábrán bemutatott három különböző, egyhetes nyers szennyvíz térfogataram-profilat hasonlítjuk össze; Közép-Európára jellemző napi ingadozású, azonos mennyiségű szennyvízzel, viszont eltérő mennyiségű csapadékvízzel.²¹



2. ábra: A három vizsgált hidraulikus terhelés időbeli lefolyása

Forrás: a szerző szerkesztése

Csapadékvíz szempontjából az első profil egy szokványos viharnek tekinthető, valós adatokból generált egyszeri (a száraz időszak maximum duplájának megfelelő) csúcs hozammal jellemezhető, a másik kettőben – elméleti, elhúzódó szélsőséges csapadékeseményeket jellemezve – ugyanez a csúcs ismétlődik ötször, különböző frekvenciával.²² A második profilban a hidraulikus csúcs naponta ismétlődik (a hétvégi terhelésre is kihatva), a harmadikban pedig egy napon belül 160 percenként, egy sokkal intenzívebb vihart leképezve.

Az illusztrált vízminőségi paraméterek és összetételi frakciók időbeli eloszlását szakirodalmi áttekintés után dolgoztuk fel és tápláltuk a szoftverbe – frakcionálás tekintetében a program a bemenő adatokat külön-külön kezeli a csapadékvízre,²³ illetve a szennyvízre vonatkozóan.²⁴ A 3. ábra szemlélteti a szervesanyag-tartalmat kémiai oxigénigényben kifejezve (KOI) és a lebegőanyag- (TSS-) koncentrációt, a 4. ábra pedig az összes nitrogén (TN) és összes foszfor (TP) koncentrációját, a csapadékesemények első 160 percére és a befolyó szennyvíz egyhetes ingadozására. Szennyvíz tekintetében a magyar viszonyokra jellemző át-

²⁰ GAZSÓ et al. 2017: 849.

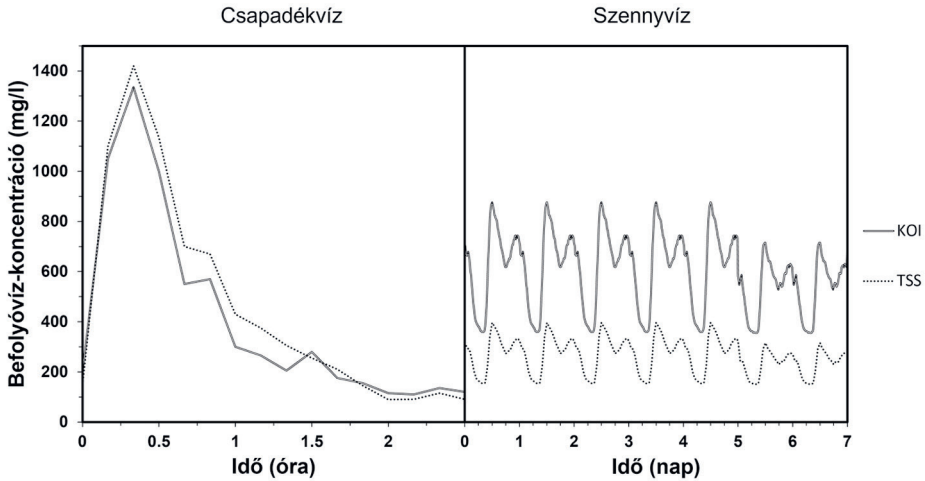
²¹ SCHUCHARDT et al. 2007: 483.

²² LI et al. 2007: 296.

²³ LI et al. 2007: 296.

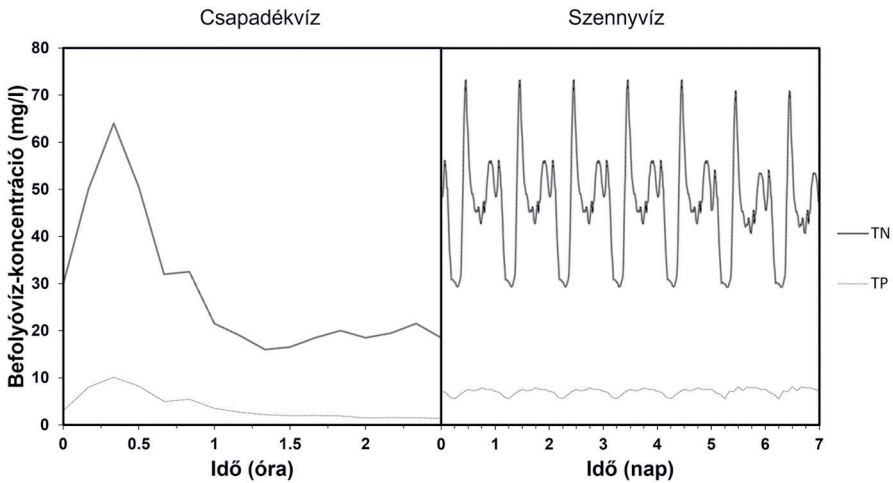
²⁴ ALEX et al. 2008: 12.

lagértékek alapján arányosított koncentrációprofilok lettek beállítva.²⁵ Fontos megjegyezni, hogy a szélsőséges esőzések scenárióiban az első utáni ismétlődő térfogatáramcsúcsokkal párhuzamosan a szennyezőanyagok koncentrációja állandósult értéken lett hagyva, abból kiindulva, hogy a csapadékvíz-lefolyásokkal kapcsolatos first flush jelenség (a koncentrációk lökésszerű növekménye) az időben egységes viharok kezdeti tulajdonsága.²⁶



3. ábra: A beállított KOI- és TSS-profilok a csapadékvízben és szennyvízben

Forrás: a szerző szerkesztése



4. ábra: A beállított TP- és TN-profilok a csapadékvízben és szennyvízben

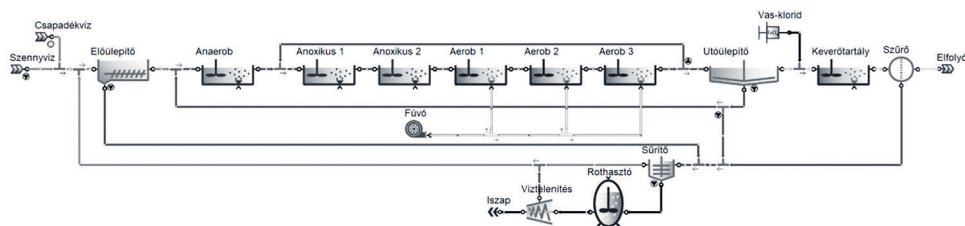
Forrás: a szerző szerkesztése

²⁵ TARDY–BAKOS–JOBÁGY 2012.

²⁶ BUDAI–BUZÁS 2007: 2.

A vizsgált telepkonfiguráció bemutatása

A modellfuttatások végcélja az üzemzavarhoz való alkalmazkodás által a napi átlagkoncentrációban megszabott, elfolyó vízzel szemben támasztott minőségi követelmények betartása a teljes szimulációs időtartamra nézve. A futtatásokat egy jellegzetes magyarországi szennyvíztisztító telep mintájára, 20 °C és 10 °C befolyó vízhőmérséklet esetére hajtottuk végre annak érdekében, hogy a kifejlesztett stratégiák a legmelegebb és leghidegebb hónapokra is helytállóak legyenek;²⁷ a tisztított vízre vonatkozó vízminőségi határértékek pedig tükrözzék az adott évszakra vonatkozó szabályozást.²⁸



5. ábra: A modellezett eleveniszapos telep folyamatábrája

Forrás: a szerző szerkesztése

A modellszintű vizsgálatok egy eleveniszapos, 400 000 lakosegyenérték kapacitású, 15 nap iszaptartózkodási idővel üzemeltetett; anaerob, anoxikus és oxikus terekkel elrendezett (A2O) telepkonfiguráció alapján készültek, amelynek technológiai sémáját az 5. ábra illusztrálja. A szennyvíz és a csapadékvíz különálló befolyó egységekből érkezik a telepre. Az előülepítőben a víz hidraulikus tartózkodási ideje (HRT) 2,9 óra, a biológiai reaktorokban 12,5 óra, az utóülepítőben 3,6 óra, anaerob rothasztásnál az iszap HRT-je 20 nap. Az aerob medencékben a modell konstans oxigénkoncentrációt tart a levegőhozam változtatásával – amely téli körülmények között a három reaktorban rendre 1,2, 1,2 és 1,5 mg/l, nyári viszonyok között pedig 0,5, 0,5 és 0,7 mg/l értékeket vesz fel. A nitrát recirkulációs térfogatáram átlagosan 1,4-szerese a nyers szennyvíz hozamának.

Az előülepítés szimulációjára három részre tagolt megközelítést alkalmaztunk, hogy a biológiai többletfosfor eltávolítása előtt figyelembe vehesse az előzetes anaerob fermentációt; utóülepítéshez pedig – elsősorban környezetbiztonsági okokból – egy egydimenziós, konvektív transzporton alapuló réteges üledési modellt választottunk, amely továbbá képes számolni a hidraulikai növekmények által előidézett iszapszint-emelkedéssel és az ebből eredő lebegőanyag-vesztéssel.²⁹ A konfigurációban a biológiai szennyvíztisztítást érintő esetleges üzemzavarok szempontjából a kémiai foszforeltávolítás lehetősége is ki van építve a szűrési művelet előtt, bevetésekor a kicsapási reakció a keverőtartályban zajlik le.

²⁷ TARDY et al. 2012.

²⁸ 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet.

²⁹ TAKÁCS–PATRY–NOLASCO 1991.

Az alkalmazott matematikai modellrendszer leírása

A szimulációs feladatokban a biokinetikai, fiziko-kémiai és egyéb anyagmérleggel kapcsolatos számítások céljából a Sumo1 elnevezésű, széleskörűen verifikált, létesítményszintű folyamatmodellt választottuk. Az ASM-típusú (*activated sludge model*) modellcsaládra épít, amelyet az IWA kutatócsoportja hozott létre 1986-ban. Az első modell az ASM1 elnevezést kapta, amely képes a bioreaktor szervesanyag- és nitrogéneltávolítását leírni, úgynevezett Petersen-mátrixban összesítve az eleveniszapos szennyvíztisztítás során lejátszódó reakciókat.³⁰ Ezenfelül a Sumo1 egy teljes üzem műveleti egységeire is ki tudja terjeszteni a folyamategyenleteket, fixfilmes eljárásokra is alkalmazhatóan. 73 állapotváltozót és 82 differenciálegyenletet tartalmaz, képes a fő növényi tápanyag-eltávolítási folyamatok leírására a szennyvíz-technológiában, beleértve a biológiai szén-, nitrogén- és foszforeltávolítást, valamint a kémiai foszforkicsapást. A nitrifikáció és denitrifikáció mögötti reakciókat egyszerűsítve, egy lépésben írja le. A szénvegyületek átalakulási mechanizmusai tartalmazzák a hidrolízist és a fermentációt. Magában foglalja a rothasztáshoz és biogáztermeléshez kötött metanogén-biomassza két fő populációjának metabolizmusát is. Arrhenius-típusú összefüggések felhasználásával számol a folyamatok hőmérséklet-érzékenységgel is, amely elengedhetetlen a különböző évszakok szerinti méretezéseknél, optimalizálási tevékenységeknél.³¹

Egyensúlyi folyamatok egyenletei által a Sumo1 modellben pH-számítás is megvalósítható, amely fontos a csapadékképzés és a CO_2 -, NH_3 -átadás pontos számszerűsítéséhez. A gáz-folyadék anyagátadási kinetika lényeges eleme a levegőigény vagy oxigénszint dinamikus előrejelzésének, illetve a gáz kibocsátások becslésének. A Henry-törvényen és Fick kétfilm-elméletén alapul, továbbá, bizonyos szennyező komponensek jelenlétének függvényében számítja az átadási hatékonyság leromlását a tiszta vízhez képest. A modell összekapcsolható a turbókompresszorok, finombuborékos levegőztető elemek és centrifugál szivattyúk hatékonyságát becsülő korrelációkkal, amelyek segítségével számszerűsíthető egy létesítmény energiafogyasztása, tekintetbe véve a berendezések iparbiztonsági korlátozásait is.³²

Eredmények, javaslattételek

Az egyhetes időtartamú modellfuttatásokat a három különböző csapadékesemény példájára, téli és nyári időszakra vonatkozó körülményekre végeztük el. A szennyvíz- és iszapkezelési eljárásoknak az egyszeri esőzésre történő – az előző fejezetben ismertetett paraméterek szerinti – méretezése után a modellkonfigurációban különböző üzemeltetési beavatkozásokat hajtottunk végre annak érdekében, hogy az elfolyó vízminőséggel szemben támasztott követelmények továbbra is teljesüljenek. A továbbiakban ismertetjük a haváriaesemények kezelésére felvetett stratégiai lépéseket.

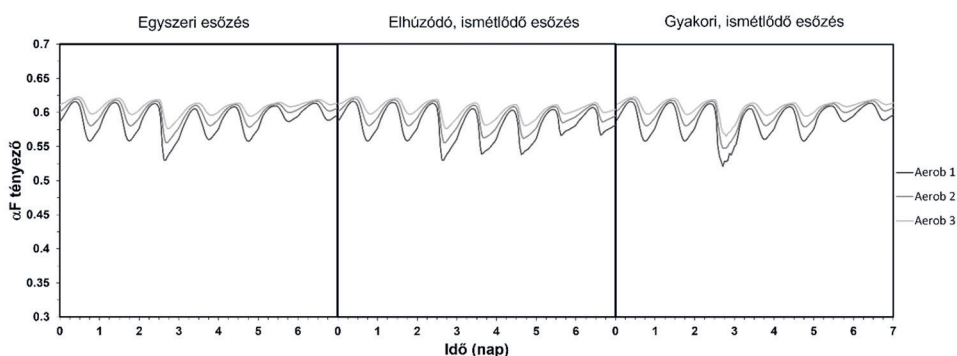
³⁰ HENZE et al. 1987.

³¹ GAZSÓ et al. 2017: 851.

³² NDEBA-NGANONGO et al. 2018.

A levegőztetés stabil üzemeltetésével kapcsolatos megállapítások

A levegőztetés művelete egyaránt fontos a nitrifikáció, a foszforeltávolítás és a szervesanyag-eltávolítás stabil oxigénellátásához és működéséhez. Az oldottoxigén-koncentrációk tartása során a terhelés növekedésével nemcsak a finombuborékos diffúzorok teljesítménye romlik, hanem a szennyvíz – 6. ábrán feltüntetett, aF tényezővel számszerűsített – átadási hatékonysága is, amelyek figyelembevétele szükséges a pontos levegőigény-becsléshez. A modell fontos tulajdonsága, hogy elkülöníti a hidraulikai és az anyagmérleg-alapú hatásokat a szennyvíz- és csapadékvíz-terhelés dinamikájában. A szennyvízkezelés mentén, bizonyos komponensek eltávolításával az oxigén beoldódási képessége reaktoronként is változik, a nagyobb szennyezőanyag-tartalommal terhelt reaktorok érzékenyebben reagálnak a körülírt hatásokra.³³



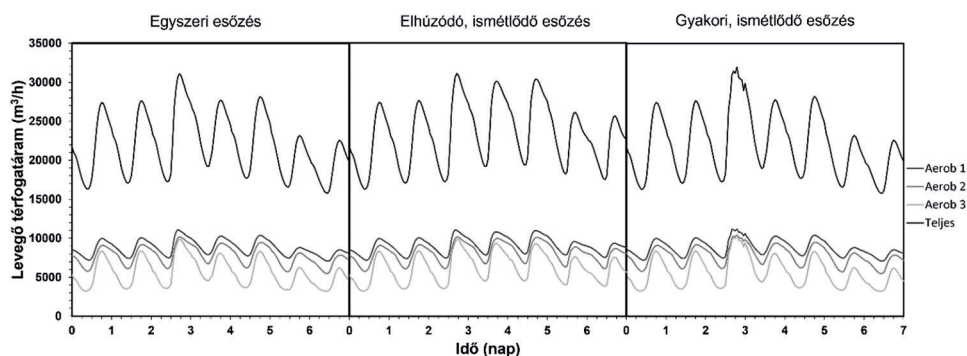
6. ábra: A csapadékesemények aF értékprofilja az aerob reaktorokban

Forrás: a szerző szerkesztése

Az aF , vagyis a szennyvíz/tiszta víz átadási arány napi ingadozása a hétköznapi és hétvégi terhelési trendekkel fordítottan arányosan alakul, egyszeri esőzés esetén a vihar idejére tapasztalható csak csökkenő aF profil; tehát a rendszer a szennyezőanyagok eltávolításával visszaáll alapállapotába, és a többi nap oxigénátadására lényegében nem hat ki az esemény. Elhúzódó, ismétlődő esőzés esetében a first flush lezajlása után, mivel csak a térfogatáram-csúcsok ismétlődnek – a csapadékvízben állandósult szennyezőanyag-koncentrációval –, így a tényező értékprofilja csak kisebb mértékben csökken a viharmentes napokhoz képest; viszont ez a térfogatáram-növekmény a hétvégi kisebb szennyvízterheléssel bíró időszakban nagyobb hatást gyakorol az aF csökkenésére. Ugyanakkor, haváriaszerű gyakori esőzés időtartama alatt szokványos esőzéshez képest tovább csökkennek az aF értékek a reaktorokban.

Az összehasonlított eszési profilokkal párhuzamosan a levegőszükségletben bekövetkező hatást a 7. ábra tünteti fel 10 °C vízhőmérséklet esetére.

³³ USEPA 1989a: 14.



7. ábra: A csapadékesemények léghozamprofilja 10 °C-on a reaktorokban és összesítve

Forrás: a szerző szerkesztése

Az aF értékek alakulása határozottan megfigyelhető a léghozamprofilokban is: a vihar eleji lökészerű szennyezőanyag-növekmény dominál a maximális térfogatáram-érték meghatározásában. Következésképp a stabil levegőellátáshoz elegendő, ha a fűvók a telep által befogadható csapadékvízhozamból adódó óracúcsra vannak méretezve.³⁴ Ennek alapján méretezve, intenzíven ismétlődő esőzésnél a célértékhez képest csak marginálisan csökkenhet az oldottoxigén-koncentráció; biztonságosan betartva a tisztított vízre vonatkozó határértékeket ugyanis nem növekszik szignifikánsan a maximális levegőigény. Viszont, az aF tényező és az oxigénátadás száraz időjárási viszonyokhoz képesti romlását figyelmen kívül hagyva, a vihar jelentős része alatt meglehetősen romolhat a nitrifikáció oxigénellátása és határfoka, határérték-átlépéshez vezetve.³⁵ Ezt különösen fontos szem előtt tartani az elhúzódóan ismétlődő vihar esetében, ugyanis a száraz időszakhoz képesti hidraulikai csúcsok a first flush lezajlását követő napokban is növelik a levegőfogyasztást, nem megfelelő méretezés esetén tartós határérték-megszegést eredményezve.

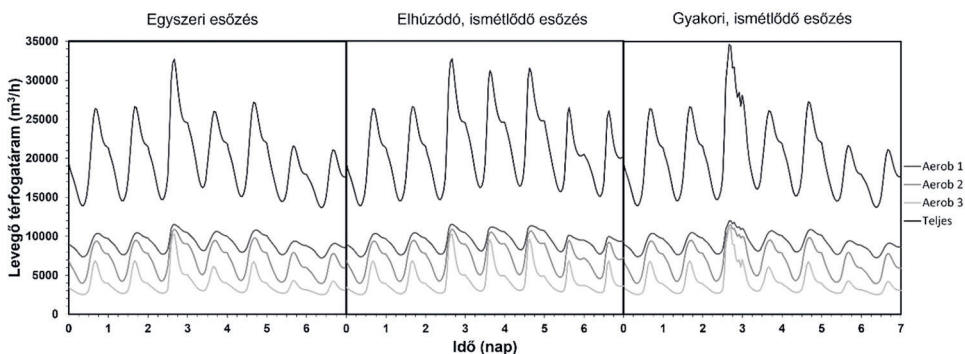
Tervezési szempontból tehát fontos a csapadékmaximum által megemelkedett levegő térfogatáram-kapacitásának biztosítása a kiválasztott fűvók működési tartományán belül, hiszen a motor túlterhelése hosszú távon iparbiztonsági szempontból veszélyes és energia-pazarlást okoz. Üzemeltetési oldalról az ábrázolt levegőhozam-tartományon belül szükséges váltakozás lefedése érdekében lényeges feladat az oldottoxigén-koncentráció szabályozásának behangolása.³⁶

Viszonyításképp a 8. ábrán láthatóak a 20 °C befolyó hőmérséklet példájára számított levegőztetési trendek.

³⁴ USEPA 1989b: 108.

³⁵ CHEN et al. 2020: 459.

³⁶ CHEN et al. 2020: 434.



8. ábra: A csapadékesemények léghozamprofilja 20 °C-on a reaktorokban és összesítve

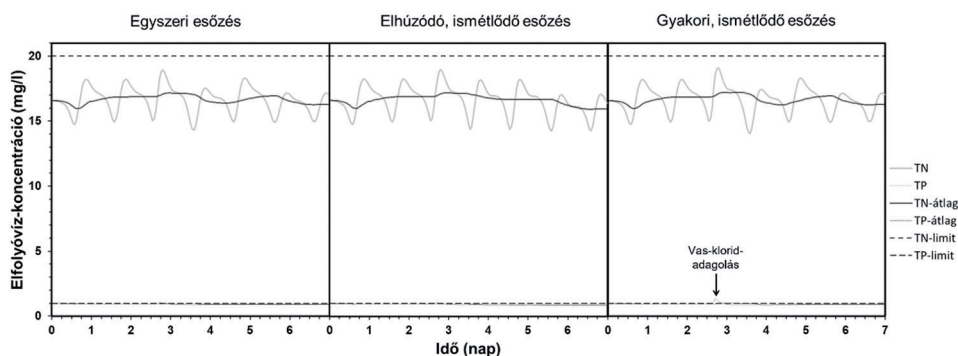
Forrás: a szerző szerkesztése

A levegőztetési rendszer méretezése szempontjából lényeges, hogy a nyári időszakban a szigorúbb, összes nitrogénre vonatkozó korlátozás (és hatékonyabb nitrifikáció) miatti magasabb oxigénszint-beállítások, illetve nagyobb hőmérsékletű vízben az oxigén rosszabb oldhatóságából kifolyólag összességében több levegőfogyasztással szükséges számolni. Ezenkívül a csapadékmennyiség növekményei élesebb csúcsokkal is járnak a levegő térfogatáram profilok tekintetében, amelyet az üzemeltetési stratégiának fontos tükröznie a folyamatirányítás hangolásában, a fúvók frekvenciaszabályozása által.

A foszforeltávolítás stabil működésével kapcsolatos megállapítások

A biológiai többletfoszfor-eltávolítás stabil üzemeltetéséhez fontos a foszforakkumuláló biomassza iszaprecirkuláció általi visszatartása, a folyamat érzékeny a hirtelenszerű hidraulikai növekményekre. A tanulmány példáiban napi egy térfogatáramcsúccsal jellemezhető csapadékvíz-mennyiség az elfolyó határérték tekintetében nem befolyásolta a biológiai foszforeltávolítás teljesítményét. Viszont a gyakori, ismétlődő esőzés esetében utóülepítéskor az iszapszint emelkedése és a biomassza kimosódása az eleveniszapos rendszerből ahhoz vezetett, hogy a biológiai kezelés önmagában 10 és 20 °C vízhőmérsékleten sem volt elegendő a vízminőségi korlátozás betartásában. Így, a határérték 0,2 mg/l értékkel történő meghaladása után fél órán keresztül Fe:P = 2:1 molarányban történő vas-klorid-adagolásra volt szükség annak érdekében, hogy a napi átlagban kifejezett szabályozás fenntartható legyen. A 9. ábra feltünteti a tisztított szennyvíz téli időszakra vonatkozó tápanyag-koncentrációit, az azokból származtatott egynapos mozgó átlagértékeket és a rájuk vonatkoztatott határértékeket, valamint a foszforeltávolítási üzemzavar elhárításának időpontját.³⁷

³⁷ 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet.



9. ábra: A csapadékesemények elfolyó TN- és TP-koncentráció profiljai 10 °C-on

Forrás: a szerző szerkesztése

Tervezési oldalról, biológiai többletfoszfor-eltávolítást alkalmazó létesítményekben mindenképp érdemes kiépíteni a kémiai foszforeltávolítás infrastruktúráját is, akár egyéb üzemeltetési problémákból eredő hatásfokromlás esetére is; praktikus ülepítés utáni szűrés előtt vagy egy második ülepítési fokozat előtt, ahol a szennyezőanyag-eltávolítás tovább javítható polimeradagolással, és kellő idő biztosított a havária kezelésére. A második fáziseltávolítási lépcsőre környezetbiztonsági okokból szintén érdemes befektetni, hiszen megakadályozza az elúszott iszap befogadóba történő kijutását.

Üzemeltetés szempontjából fontos az elfolyófoszfor-koncentráció monitorozása, hogy a kémiai foszforeltávolítás kiegészítő beavatkozása időben megkezdődhessen. Ennek hatékony megvalósításaként célszerű elhelyezni egy ortofoszfát koncentrációt online mérő szondát az utolsó aerob reaktorban, amely alapján a vegyszeradagolás mennyisége akár automatizálható is. A beavatkozás megvalósítható a biológiai reaktorok után elhelyezett utóülepítőben is, bár ez esetben feltétlenül kerülendő a fémsó túladagolása, hogy a rendszerben ne halmozódhasson fel vegyszeres iszap, amely egyéb biológiai folyamatok hatékonyságának lerontásával és iszapfelúszással járhat.³⁸

A denitrifikáció stabil működésével kapcsolatos megállapítások

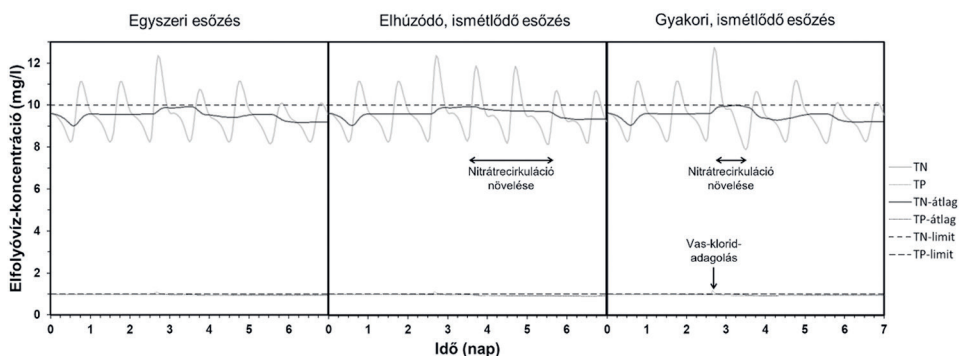
A tanulmány téli időszakában kevésbé szigorúak a nitrogéneltávolítással kapcsolatos követelmények, és így a kellően hatásos denitrifikálás miatt nincsen szükség a haváriaesemények elhárításához szükséges lépésekre. Ellenben a nyári elhúzódó viharok során a biomaszkoncentráció és az iszapkor csökkenése miatt mérvadóbb a denitrifikáció hatékonyságának leromlása. Ezáltal csak a belső recirkulációs térfogatáram növelésével sikerült tartani az elfolyó átlag TN-koncentráció határértékét a teljes szimulációs időszámban.³⁹ A nitrifikáció javítása

³⁸ HALÁSZ–FÖLDI 2007: 211.

³⁹ 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet.

egyéb alternatívaként megfontolandó, azonban ez túllegezőtetéssel járna, amely tovább rontaná a denitrifikálás teljesítményét. A 10. ábra mutatja a 20 °C vízhőmérséklet mellett időben előrejelzett tápanyag-koncentrációk értékét, mozgóátlagát, a határértékeket és a beavatkozások időintervallumát.

Gyakori és ismétlődő esőzésnél a nitráteltávolítás kellő intenzifikálása érdekében a recirkulációs vízhozamot 7%-kal szükséges növelni, a vihar végéig. Elhúzódóan ismétlődő esőzés során csak 4%-kal szükséges megemelni a nitrátrecirkuláció térfogatáramát, azonban a példában a vihar hosszabb ideig tart, így összességében ez több energia felhasználásához vezet; a hétvégi szennyvízterhelés mellett már visszaállítható a térfogatáram eredeti értéke. Fontos megjegyezni, hogy a belső recirkuláció túlzott növelése a gyorsabb áramlási sebességek miatt hidraulikai rövidzárlattal és a vízszint jelentős emelkedésével járhat, amely – a denitrifikációs kapacitás mellett – lényeges szempont a medencék méretezésénél.⁴⁰



10. ábra: A csapadékesemények elfolyó TN- és TP-koncentráció profiljai 20 °C-on

Forrás: a szerző szerkesztése

A vizsgálat eredményei alapján, berendezéskiválasztásnál lényeges szempont lehet, hogy a recirkulációs szivattyúk által biztosított maximális térfogatáram megfeleljen a szélsőséges esőzések által előidézett nitrogéneltávolítási kihívásoknak, figyelembe véve a működési határokkal kapcsolatos környezetbiztonsági megfontolásokat. Üzemeltetési oldalról, a szakemberek általi vízminőség monitorozása mellett még biztonságosabb és gazdaságosabb megközelítés a nitrátkoncentráció szabályozása folyamatirányítási stratégiával.⁴¹

⁴⁰ KARCHES 2018: 145.

⁴¹ YUAN–OEHMEN–INGILDSSEN 2002.

Összefoglalás, következtetések

A tanulmányból összességében következtetésképp levonható, hogy magyar szennyvíz-technológiai viszonylatban, a tisztítótelepeket érintő, klímaváltozásból eredő potenciális szélsőséges csapadékesemények haváriahelyezeti időben kivitelezett és helytálló beavatkozásokkal – tisztított vízzel szemben támasztott követelmények szempontjából – elháríthatóak. Levegőtetés szempontjából a legfőbb következtetés, hogy a fűvők az esős időjárásra vonatkoztatott maximális óracúcs alapján legyenek méretezve. Ez különösen fontos a potenciálisan elhúzódo, ismétlődő viharok tekintetében. A hirtelenszerű befolyó csapadékvíz térfogatáram-növekmények utóülepítésnél az iszapszint emelkedéséhez és a biomasza elúszásához vezethetnek, ezért környezetbiztonsági szempontból célszerű egy második fázissztválasztási fokozat telepítése a létesítményben. A stabil foszforeltávolítás biztosítása érdekében alapvetően gyakori, ismétlődő esőzések esetében a biológiai tisztítási fokozat után szükséges lehet a biológiai többletfoszfor-eltávolítás kiegészítése ideiglenes, szakszerűen időzített kémiai foszforeltávolítással. A kellően hatékony nitrogénel távolítás érdekében fontos, hogy az ismétlődő viharok biomasza-koncentrációt csökkentő hatása miatt a belső recirkulációs szivattyúk rendelkezzenek (iparbiztonsági szempontból is) elegendő tartalék kapacitással.

Érdemes megjegyezni, hogy a tanulmány szennyvíz-technológiai kérdésekre fókuszál, ezért egy szennyvíztelepre maximálisan érdemileg befogadható csapadékmennyiségekkel számol, azonban előfordulhatnak esetek, hogy nagyobb térfogatáram esetén az üzemeltetők kénytelenek kerülőúton tisztítatlanul kibocsátani a befolyó víz egy részét. Továbbá, a vizsgálatok általánosan arra az esetre vonatkoznak, amikor a nyers befolyó vizet közvetlenül kezelik; bizonyos létesítményekben viszont az óracúcsok kiegyenlítésére léteznek külön technikák, például puffertartályokban történő előzetes tárolás, megkönnyítve a szennyvíztisztítást.

Jövőbeli tanulmányok célkitűzése a decentralizált, kisebb léptékű telepek havariaelhárítási lehetőségeinek felfedése, nagyobb fajlagos terhelésingadozással.

Irodalomjegyzék

- A Csatornázási Művek tájékoztatása a Gyáli-patak szennyezéséről. *Ittlakunk.hu*, 2020. november 24. Online: <https://23.kerulet.ittlakunk.hu/termeszeti/201124/csatornazasi-muvek-tajekoztatasa-gyali-patak-szennyezeserol>
- ALEX, Jens et al. (2008): Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1). In *Report by the IWA Task Group on Benchmarking of Control Strategies for WWTPs*. Lund: Lund University Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. Online: www.iea.lth.se/publications/Reports/LTH-IEA-7229.pdf
- BÁBA Barnabás – KARCHES Tamás (2021): Operation Improvement of Sequencing FED-batch Wastewater Treatment. *Pollack Periodica*, 16(2), 61–66. Online: <https://doi.org/10.1556/606.2020.00302>
- BERGER Ádám – KÁTAI-URBÁN Lajos (2020): A veszélyes anyagok beszivárgásának betontechnológiai kockázatai, valamint a környezetre gyakorolt hatásuk. In *Iparbiztonsági és Hatósági Szakmai Nap*. Paks: Tolna Megyei Katasztrófavédelmi Igazgatóság, 28–38. Online: <https://tolna.katasztrofavedelem.hu/application/uploads/documents/2020-04/70644.pdf>

- BUDAI Péter – BUZÁS Kálmán (2007): Highway Runoff Characterisation in Hungary. In *Proceedings of the 11th International Conference on Diffuse Pollution* (CD). Belo Horizonte: Federal University of Minas Gerais, PAP0076.
- CHEN, Guanghao et al. szerk. (2020): *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling and Design*. IX. kötet. Aeration and Mixing. London: IWA Publishing. Online: https://doi.org/10.2166/9781789060362_0419
- DOMJÁN Anita et al. (2019): Reakció idő számítása hidrológiai mérőhálózat alapján Pécssett. In *Országos Települési Csapadékvíz-gazdálkodási Konferencia tanulmányai*. Budapest: Dialóg Campus, 25–35. Online: https://vtk.uni-nke.hu/document/vtk-uni-nke-hu/Kézikönyv_csapadék.pdf
- FÖLDI László – HALÁSZ László (2013): *Környezetmérnökök katasztrófavédelmi feladatai*. Veszprém: Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet. Online: https://tudastar.mk.uni-pannon.hu/anyagok/33-Katasztrofa_v2.pdf
- FÖLDI László – HALÁSZ László (2014): *Környezetbiztonság*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar. Online: <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/100403/562.pdf?sequence=1>
- FÖLDI László et al. szerk. (2015): *A hadtudomány és a hadviselés komplexitása a XXI. században*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem. Online: <http://real.mtak.hu/31932/>
- GAZSÓ, Zita et al. (2017): Full-scale Wastewater Treatment Plant Simulation for Real-time Optimization. *Water Practice and Technology*, 12(4), 848–856. Online: <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.091>
- HALÁSZ László – FÖLDI László (2007): *Környezetvédelem II*. Budapest: Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Kar Vegyi- és Katasztrófavédelmi Intézet ABV Védelmi Tanszék.
- HENZE, Mogens et al. (1987): Activated Sludge Model No. 1. In *Scientific and Technical Reports No. 1*. London: International Association on Water Pollution Research and Control. Online: www.researchgate.net/publication/243624144_Activated_Sludge_Model_No_1
- KARCHES Tamás (2018): Effect of Internal Recirculation on Reactor Models in Wastewater Treatment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 228, 145–153. Online: <https://doi.org/10.2495/WP180151>
- KARCHES Tamás et al. szerk. (2020): *Kis kapacitású szennyvíztisztító létesítmények*. Budapest: Ludovika Egyetemi Kiadó. Online: <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/handle/20.500.12944/16097>
- KÓSA Levente – LUKENICS Jánosné – VERBA Attila (1997): *Vegyipari géptan II*. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
- LI, Li-qing et al. (2007): First Flush of Storm Runoff Pollution from an Urban Catchment in China. *Journal of Environmental Sciences*, 19(3), 295–299. Online: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60048-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60048-5)
- NDEBA-NGANONGO, Lionnel A. N. et al. (2018): The Application of ADM/ASM Interface in Sumo Wide Plant Model. In *10th International Conference on Advances in Science, Engineering, Technology & Healthcare (ASETH-18)*. Cape Town: Eminent Association of Pioneers, 237–241. Online: <https://doi.org/10.17758/EARES4.EAP1118257>
- RIEGER, Leiv et al. (2012): Good Modelling Practice – Realizing the Full Benefits of Wastewater Treatment Modelling. *Water21*, 28–29. Online: www.researchgate.net/publication/231180872_Good_modelling_practice_-_Realizing_the_full_Benefits_of_wastewater_treatment_modelling
- SCHUCHARDT, A. et al. (2007): Evaluation of Oxygen Transfer Efficiency under Process Conditions Using the Dynamic Off-gas Method. *Environmental Technology*, 28(5), 479–489. Online: <https://doi.org/10.1080/09593332808618812>
- TAKÁCS Imre – PATRY, Gilles G. – NOLASCO, Daniel A. (1991): A Dynamic Model of the Clarification-thickening Process. *Water Research*, 25(10), 1263–1271. Online: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(91\)90066-Y](https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90066-Y)

- TARDY Gábor Márk – BAKOS Vince – JOBBÁGY Andrea (2012): Conditions and Technologies of Biological Wastewater Treatment in Hungary. *Water Science and Technology*, 65(9), 1676–1683. Online: <https://doi.org/10.2166/wst.2012.062>
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (1974): *Emergency Planning for Municipal Wastewater Treatment Facilities*. Lynchburg, VA, EPA-430/9-74-013
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (1989a): *Summary Report: Fine Pore (Fine Bubble) Aeration Systems*. Cincinnati, OH, EPA/625/8-85/010
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (1989b): *Design Manual: Fine Pore Aeration Systems*. Cincinnati, OH, EPA/625/1-89/023
- YUAN, Zhiguo – OEHMEN, Adrian – INGILDSSEN, Pernille (2002): Control of Nitrate Recirculation Flow in Predenitrification Systems. *Water Science and Technology*, 45(4–5), 29–36. Online: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0544>

Jogi források

- 24/2007. (VII. 3.) KvVM rendelet a Vízügyi Biztonsági Szabályzat kiadásáról
- 28/2004. (XII. 25.) KvVM rendelet a vízszennyező anyagok kibocsátásaira vonatkozó határértékekről és alkalmazásuk egyes szabályairól
- 541/2013. (XII. 30.) Korm. rendelet a létfontosságú vízgazdálkodási rendszerelemek és vízilétesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről
2000. évi XXV. törvény a kémiai Biztonságról
2011. évi CXIII. törvény a honvédelemről és a Magyar Honvédségről, valamint a különleges jogrendben bevezethető intézkedésekről