

Illékony szerves vegyületek eltávolításának környezetbiztonsági aspektusai

Environmental security aspects of the removal of volatile organic compounds

Bencsik Dániel
Nemzeti Közzolgálati Egyetem
doktorandusz
Email: bencsik.daniel@uni-nke.hu
ORCID: 0000-0002-1131-0317 

Absztrakt:

A fenntartható ivóvízellátás és a mezőgazdasági felhasználások iránti növekvő igény miatt a szennyvíz újra hasznosítása egyre nagyobb jelentőséggel bír. Hozzájárul a korlátozott édesvízforrásoktól való függés csökkentéséhez, és a vízkészletek megőrzése által enyhíti az éghajlatváltozás hatásait. Az újrahasonosítás fontos szempontja azonban, hogy a fogyasztókhoz ne jussanak el veszélyes szennyezőanyagok. A tanulmány célja olyan számítógépes szimulációk alkalmazásának bemutatása, amelyek képesek számszerűsíteni az illékony szerves komponensek eltávolítását a kezelés és újrahasonosítás során, tekintettel az üzemeltetési költségekre és a tisztított víz minőségére. A kutatás keretében elkészült egy biológiai szennyvíztisztító létesítmény modellje – aktív szén-szűrőkön alapuló utókezeléssel –, amellyel számszerűsíthető az üzemeltetési paraméterek üzemi- és karbantartási költségekre, valamint az elfolyóvíz-minőségre gyakorolt hatása. A szimulációs eredmények igazolják, hogy a biomasza tartózkodási idejének növelésével csökkenthető az aktív szén-szükséglet, különösen a 6 napnál rövidebb tartományban; azonban, környezetbiztonsági szempontból az ezen érték alatti üzemeltetés mindenképp kerülendő, a mikroszennyezők exponenciális koncentráció-növekedése miatt. Érzékenységvizsgálat alapján 10-12 nap tartományú iszap tartózkodási idő biztosítása mellett optimálható az energiaszükséglet – a biológiai kezelés levegőellátásának hatékony szabályozásával együtt. Üzemi haváriák esetén, modellkísérlet alapján gyors és hasznos beavatkozásnak bizonyult az intenzifikált levegőztetés, amely az illékony szennyezők hatékonyabb sztrippelését¹ biztosítja az aktív szén-oszlopokra való betáplálás előtt. A kutatás rávilágít a modellezés által nyújtott lehetőségekre a fenntartható üzemállapotok és haváriatervek kialakításában szennyvíz-újrahasonosításnál.

Kulcsszavak: környezetbiztonság, mikroszennyezők, modellezés, szennyvíz, VOC

Abstract:

With the growing demand for sustainable drinking water supplies and agricultural applications, the practice of wastewater reuse is becoming increasingly important. It contributes to reducing our dependence on limited freshwater sources and mitigating the effects of climate change by conserving water resources. Regarding the recycling of wastewater, however, it must be ensured that hazardous pollutants do not reach consumers. This paper aims to present an application of mathematical modelling to quantify the removal of volatile organic components during treatment and reuse, with regard to operating costs and treated water quality. The study features the model setup of a biological wastewater treatment plant – with post-treatment supplemented by activated carbon filters –, with the goal of quantifying the impact of process parameters on operating and maintenance costs, among effluent water quality. Results of the model simulation demonstrate that increasing the retention time of biomass reduces activated carbon consumption, especially within a range shorter than 6 days; however, from the perspective of environmental security, an operating status below this value should be avoided due to an exponential increase in micropollutant concentrations. Sensitivity analysis has shown that energy demand can be optimised by operating the facility with a sludge residence time in the range of 10-12 days – provided that air supply to biological treatment trains is efficiently regulated. Model runs have shown that, in case of operational emergency scenarios, intensified aeration is a swift and useful operator intervention that provides more efficient stripping¹ of volatile pollutants before loading onto activated carbon columns. The research highlights the potential of dynamic modelling in implementing sustainable operating conditions and emergency planning in wastewater reuse.

Keywords: environmental security, micropollutants, modelling, VOC, wastewater

¹ Sztrippelés: oldott gázok kihajtása a folyadékból

¹ Stripping: driving out dissolved gases from the liquid

1. BEVEZETÉS

A nyersanyagfogyasztás és a szennyezőkibocsátások az emberi közösségek fejlődése és növekedése során hajlamosak bizonyos területeken koncentrálni. A környezetre gyakorolt folyamatos antropogén hatások miatt figyelmet kell szánni a modern civilizáció szempontjából kulcsfontosságú közművek biztonságos üzemeltetésére. Nem szabad megengedni, hogy bizonyos, az emberi egészségre káros anyagok eljussanak a fogyasztókhoz, illetve, hogy a környezeti tényezőket hátrányosan befolyásolják.

A szennyvíz újrahasznosításának gyakorlata egyre nagyobb jelentőséggel bír az ivóvízforrások iránti növekvő igény, valamint a fenntartható mezőgazdasági gyakorlat elterjedése miatt. Hatékonyan csökkenti a korlátozott édesvízforrásokra nehezedő nyomást, és a tisztított szennyvízből növényi tápanyagok visszanyerését teszi lehetővé. Az alacsony jövedelmű országokban jelentős kockázatot okoz a kezeletlen szennyvíz közvetlen használata vagy a szennyezett vízfolyások közvetett felhasználása [1].

Scheierling és mtsai. (2011) iránymutatást adtak a tisztított szennyvízzel kapcsolatos stratégiai terv kidolgozásához, és kiemelték a szennyvízkezeléssel kapcsolatos döntéshozók paradigmaváltásának szükségességét [2, pp. 420-440.]. Az újonnan felmerülő, aggodalomra okot adó szennyezőanyagok kiemelt figyelmet kaptak, a velük kapcsolatban ismert vagy vélt környezeti és egészségügyi kockázatok miatt [3].

Az illékony szerves vegyületek² (VOC) közül, amelyek természetes és mesterséges forrásokból egyaránt kerülnek a környezetbe, a benzol, a toluol, az etilbenzol és a xilol³ izomerjei (BTEX) a legjelentősebbek közé tartoznak [4, pp. 476-482.]. Mérgező és karcinogén jellegük miatt figyelmet kell fordítani a kezelőüzemekben dolgozó személyzet és az üzemek közelében élők egészségére. A BTEX-vegyületek emberi egészségre gyakorolt lehetséges káros hatásai kiterjednek az idegrendszerre, a májra, a szívre és a vesére [5].

2. ILLÉKONY SZERVES VEGYÜLETEK ELTÁVOLÍTÁSÁNAK MODELLEZÉSE

A szennyvíztisztítás során az illékony szerves komponensek különböző utakon, például biológiai lebomlással, szorpcióval (megkötéssel) és sztrippeléssel (a folyadékból történő kihajtással) távoznak. A kommunális szennyvízkezelés azonban főképp csak részleges csökkenést biztosít a VOC-k kezdeti koncentrációjához képest a nyers szennyvízben. A szennyezőanyag-koncentrációk jelentős csökkentéséhez a biológiailag kezelt víz további tisztítására van szükség, elsősorban fizikai-kémiai módszerekkel [6].

2.1 VOC-k eltávolítási mechanizmusai

A biológiai szennyvíztisztítási folyamatok során a szerves vegyületeket mikroorganizmusok metabolizálják⁴, széntartalmukat az eleveniszapos medencékben a lebegő biomassza szubsztrátként⁵ használja fel a növekedéshez. Mello és mtsai. (2019) bizonyos VOC-k 99%-os eltávolítási hatékonyságát érték el kötött biomasszát alkalmazó aktív-szén-töltettel, ezáltal a biológiai lebontást kombinálva az adszorpcióval, tehát a fizikai-kémiai megkötés folyamatával [7].

² Volatile organic compound - VOC: illékony szerves vegyület

³ Benzol, toluol, etilbenzol, xilolok - BTEX

⁴ Metabolizmus: biokémiai anyagcsere-folyamat, amelyet a környezetvédelmi biotechnológiában szennyezőanyagok eltávolítására alkalmaznak

⁵ Szubsztrát: biokémiai reakcióban átalakuló komponens, amelyet a mikroba képes felhasználni a szaporodáshoz

Bár napjainkra már számos fejlett, például membránokon [8, pp. 440-445.], mikroalgákon [9, pp. 101-107.] vagy szén nanocsöveken [10, pp. 1005-1025.] alapuló technológiát fejlesztettek ki, e tanulmánynak nem célja, hogy átfogó áttekintést adjon a területen alkalmazott legkorszerűbb technikákról; a BTEX-eltávolítás módszertanára és továbbfejlesztésére összpontosít.

Lee és mtsai. (1998) olyan vegyületek biológiai lebomlásának modellezése felé tettek jelentős lépést, amelyek az eleveniszaphoz adszorbeálódnak, közvetlenül fokozva azok lebomlását és csökkentve az elfolyó vízzel való távozásukat. Emellett megállapították, hogy a közepes vagy nagy illékonyssággal rendelkező vegyületek sztrippelése, azaz kihajtása a medencék vízfelületéről jelentős lehet [11, pp. 1118-1131.]. Pomiès és mtsai. (2012) 18 matematikai megközelítést gyűjtöttek össze a mikroszennyező anyagok szennyvízből való eltávolításának modellezésére, és a legtöbb szerző álláspontja alapján arra a következtetésre jutottak, hogy csak az oldott mikroszennyező anyagok bonthatóak le biológiailag, bár fontos megjegyezni, hogy nem találtak kísérleti bizonyítékot ennek az állításnak az alátámasztására. Az egyszerűsített (elsőrendű kinetikán alapuló) matematikai megközelítések nem veszik figyelembe az összetett metabolikus útvonalakat és a szennyvíztisztítás különböző fokozatai közötti kapcsolatokat, illetve nem tükrözik az üzemeltetés során fellépő dinamikus viselkedést. Mindezek ellenére, ezen modellezési eszközök hasznosak a mikroszennyező anyagok eltávolítási folyamatainak megértését célzó kutatások elvégzésében, de még nem állnak készen a folyamattervezésben való felhasználásra [12, pp. 733-748.].

E tanulmány célja, hogy bemutassa a VOC-tartalmú szennyvíz kezelését és újrafelhasználását modellező numerikus eszközök gyakorlati alkalmazását. Ezek leírják a szennyezőanyagok sorsát a szennyvíztisztító telepeken olyan dinamikus matematikai módszerek segítségével, amelyek képesek alkalmazkodni az üzemeltetésben bekövetkező változásokhoz. A tanulmány újdonsága abban rejlik, hogy a módszereket teljes üzemkonfigurációra alkalmazza, továbbá az üzemeltetési költségek minimalizálásának és a szennyvízminőség javításának lehetőségeit együttesen vizsgálja. Feltárja két kulcsfontosságú üzemeltetési tényező – az iszap tartózkodási idő és a levegőellátás – BTEX-lebontásra és -sztrippelésre gyakorolt hatását.

2.2 Modellalkotás

A szennyvíztisztítási folyamatok modellezése összetett és több almodellt foglal magában, mint például a vízmérleg modellje, a befolyó szennyvíz összetevőinek modellje [13, pp. 283-293.], a fázisátváltási modell [14, pp. 473-479.], a gáz-beoldódási modell, a folyamatszabályozási modell és a biokinetikai modell. A biokinetikai modellezés széles körben alkalmazott megközelítés a szennyvíztisztító rendszerekben lejátszódó biológiai folyamatok leírására. A biokinetikai modellek közé tartoznak az eleveniszap-modellek, amelyek a mikroorganizmusok viselkedését szimulálják az egyik legelterjedtebb szennyvíztisztítási technológia biológiai reaktorában, az eleveniszapos medencében [15, pp. 165-182]. Az üzemszintű modellek ezzel szemben egy teljes létesítményre kiterjednek, fejlettebb tisztítási folyamatok szimulációs képességeit biztosítják. Több részfolyamatot is figyelembe vesznek; mint például az iszapkezelés, a pH és a kémiai egyensúly, a csapadékképzés és a gáz-folyadék anyagtranszport. Mindezek segítségével üzemkonfigurációkat tesznek lehetővé, amelyek például mechanikai előkezelést vagy akár szennyvíz-újrachasznosítási fokozatot is magukba foglalnak. Ezek a modellek a létesítmények energiagazdálkodására és üzemeltetési költségeire is kiterjeszhetőek, továbbá képesek figyelembe venni a berendezések üzemeltetési korlátait az iparbiztonság tekintetében [16, pp. 1023-1036.].

A Nemzetközi Vízügyi Szövetség iránymutatásokat tett közzé a szennyvíztisztítás területén alkalmazott jó modellezési gyakorlatról. A protokoll keretét biztosít a matematikai modellek kidolgozásához és alkalmazásához, és célja annak biztosítása, hogy a modelleket szabályszerűen és következetesen használják. Az iránymutatások olyan témaköröket tárgyalnak, mint a modellalkotás, a verifikáció, az érzékenységvizsgálat és a bizonytalanság-elemzés [17].

A tanulmány céljának megfelelően a kézirat feltárja a VOC-eltávolítás kommunális szennyvíztisztításban való alkalmazásait, a létesítményszintű modellezésben rejlő lehetőségek bemutatásán keresztül. Ezek segítségével összekapcsolhatóak a szennyvíz tisztítására és a víz újrafelhasználására irányuló kezelés koncepciói. A legjelentősebb eltávolítási mechanizmusok – biokémiai reakciók és gáz–folyadék egyensúly – a leghatékonyabban a Gujer-mátrix formátumban írhatóak le [18]. A mátrix tartalmazza a kémiai sztöchiometriai együtthatókat és a folyamatok sebességét, amelyekből a közönséges differenciálegyenletek kibonthatók és számítógépes algoritmusok segítségével megoldhatók. Biokinetikai modellekben az állapotváltozók (komponensek) tömegegyensúlyának matematikai leírása egyszerűsített áramlási viszonyokra alapozó skaláris transzportegyenletekre támaszkodik, ahol a diffúziós sebességeket elhanyagolhatónak feltételezzük – ezek általános formáját az (1) egyenlet írja le.

$$V_r \frac{dC_i}{dt} = Q_{in}(C_{i,in} - C_i) + \text{rate}F_{C_i}, \quad (1)$$

ahol V_r a reaktor hasznos térfogata (m^3),
 C_i az i -edik komponens koncentrációja (g/m^3),
 Q_{in} a betáplált szennyvíz hozama (m^3/d),
 $C_{i,in}$ az i -edik komponens koncentrációja a betáplált szennyvízben (g/m^3),
 $\text{rate}F_{C_i}$ az i -edik komponens egységnyi tömegére vonatkoztatott reakciósebesség (g/d).

E tanulmány céljainak eléréséhez, továbbá a szimulációk gyorsasága és átláthatósága érdekében a MiniSumo nevű folyamatmodell szolgál alapul biokinetikai modellként – amely a nyílt forráskódú szimulációs platformon, a Sumo22 keretében érhető el. Ugyanis ez egy egyszerű, de jól kalibrált üzemszintű modell, ami a szennyvíztisztítás legfontosabb és legáltalánosabb alapfolyamataira összpontosít; név szerint az egylépéses nitrogéneltávolításra, a mikrobák oxigénszükségletére és az iszaptermelésre, -kezelésre [19]. A modellben a biológiai reakciók párhuzamosan zajlanak le, a BTEX-vegyületek teljes mértékben szén-dioxiddá és biomasszává alakulnak át. Feltételezzük, hogy a szénlebontásra alkalmas biomasszának egy közös csoportja metabolizálja a BTEX-szennyezőanyagokat. A metabolizmus során a mikroorganizmusok vagy oxidálják őket oldott oxigén jelenlétében, vagy pedig oxigénmentes környezetben távolítják el őket, amikor csak nitrátionok állnak rendelkezésre (denitrifikáció során). Eltérő esetben – O_2 , illetve NO_3^- -ionok hiányában – a vegyületek erjedés útján kerülnek lebontásra. Oxigén jelenlétében a metabolikus útvonalak reakciósebessége nagyobb, mint az oxigénhiányos körülmények között végbemenő reakcióké [20, pp. 279-293.].

A tisztítás során fontos figyelembe venni a VOC-k szennyvízből légkörbe kerülését. Ezen illékony vegyületek gáz- és folyadékfázis közötti átadását Fick kétfilm-elméletével számszerűsítjük. A MiniSumo gáz-folyadék átadási koncepciója egyaránt képes az oldható gázok folyadékba való beoldódásának, és a folyadékból történő kihajtásának, sztrippelésének modellezésére. Az egyensúlyi folyamat állapotváltozókra gyakorolt hatását a folyamatmodell Gujer-mátrixa írja le [21]. Fick első törvénye szerint egy gáznemű komponens átadási sebességét a (2) egyenlet írja le általános módon, ahol az oldódás vagy a sztrippelés hajtóerejét a telítési koncentráció és a folyadékfázis koncentrációjának különbsége határozza meg.

$$\frac{dC_i}{dt} = k_L a_i \cdot \overbrace{(C_i^* - C_i)}^{\text{hajtóerő}} \quad (2)$$

$C_i^* > C_i \rightarrow$ oldódás
 $C_i^* < C_i \rightarrow$ sztrippelés

ahol $k_L a$ a folyadékoldali anyagátadási együttható ($1/d$),
 C_i^* az i -edik gáznemű állapotváltozó telítési koncentrációja a folyadékfázisban (g/m^3).

A Higbie-féle penetrációs elmélet alapján a folyadékoldali tömegátadási együttható értékei az O_2 és a többi oldott gázkomponens diffúziós tényezője alapján arányosan kiszámíthatók [22, pp. 365-388.]. Az elméletet Jiang és mtsai. (2010) alkalmazták VOC-k sztrippelésének becslésére levegőztetett medencékből [6, 1189-1196.].

A Fick-törvény szerint, amint azt a (2) egyenlet szemléltette, egy komponens telítési koncentrációja – az oldhatósági határ a folyadékban – dönti el, hogy az egyensúlyi folyamat az oldódás vagy a sztrippelés irányába mozdul-e el.

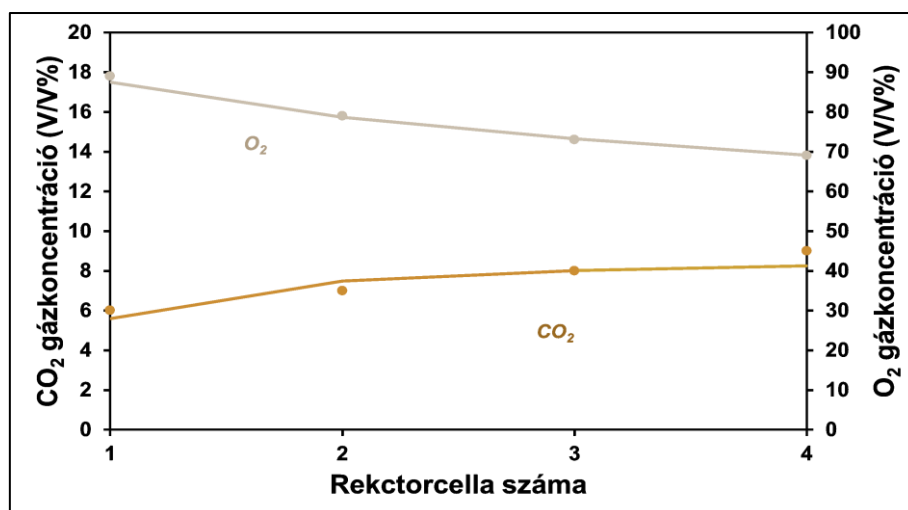
A folyadékfázis telítési koncentrációit a Henry-törvény értelmében a komponensek parciális nyomása alapján, a gázösszetételre vonatkoztatva számoljuk [23, pp. 4399-4981.].

2.3 A modell verifikációja

Egy modell verifikálása során a szimulációs eredményeket különböző üzemi körülmények között (lehetőleg különböző műszaki konfigurációkból vagy létesítményekből) szerzett mért adatokkal összevetve teszteljük [17]. A tanulmányban a gázoldás/sztrippelés modelljének érvényességét a reaktorokból távozó gáz összetételén keresztül lehet értékelni, megerősítést kapva, hogy a numerikus módszerek képesek számszerűsíteni az oldható gáznemű komponensek átadásából származó anyagáramokat. Ez a cikk két kiválasztott szennyvízkezelési technológián vizsgálja az elmenőgáz-koncentrációk előrejelzésének pontosságát; egy zárt gáztérrel rendelkező nagy tisztaságú oxigén alapú levegőztetett rendszeren – a gáztér O_2 - és CO_2 -tartalma alapján –, és egy hagyományos eleveniszapos telepen – ahol az N_2O -kibocsátást mérték a medence folyadékfelületén. Az ellenőrzésre kiválasztott első konfiguráció a kaliforniai Sacramentóból származó nagyhatásfokú félüzemi rendszer, amelynek célja csak a szervesanyag-eltávolítás, és amely négy reaktorcellával (egy reaktorkaszkáddal) rendelkezik. Ezenkívül a nagy tisztaságú oxigén technológia első generációján alapul, amely mechanikus levegőztetést alkalmaz a folyadékfelület feletti zárt gáztérrel.

A levegőztető medencék fedettek, oxigéndús környezetet és hatékony anyagátadást fenntartva, és ilyen körülmények között a szén-dioxid, amelyet rendszerint a légkörbe juttatnak, felgyülemlik a gáztérben; pontos alapot szolgáltatva a gáz-folyadék transzport modell ellenőrzésére, a gázok anyagszámlájának nyomon követésére. Ezek a kísérleti üzemek meglehetősen stabil terhelési körülmények között üzemeltethetőek, ami lehetővé teszi a koncentráció-gradiensek összehasonlítását gyakorlatilag állandósult állapotban. A biológiai kezelés során a folyadékfázisban a széndioxid-termelés az oxigénfogyasztáshoz kapcsolódik, 1 mól O_2 felhasználása 1 mól CO_2 keletkezésével jár, ezért az oxigénfelvételi és -átadási sebességek pontos szimulációja mellett a gázfázis modellje tesztelhető a CO_2 koncentrációprofilok robusztus előrejelzése tekintetében [24].

A pH-modellezés kulcsfontosságú volt a befolyó CO_2 -tartalom megfelelő beállításához – ami a kémiai egyensúlytól függ –, csakúgy, mint a belépő gázáram pontos beállítása a gázfázis anyagforgalmának reprodukálása érdekében. Az 1. ábrán látható állandósult állapotú eredmények szerint a modellezett O_2 - és CO_2 -gradiensek – folyamatos vonalakkal ábrázolva – a reaktorkaszád gázterének mentén jó egyezést mutatnak Stenstrom (1990) adatpontjaival [24, p. 79.]. A CO_2 térfogatszázalékos értékei egy nagyságrenddel kisebbek, mint az O_2 esetében, így a szimulált értékek több számjegyet szolgáltatnak, mint a forrásadatok; és a koncentrációk a sorba kapcsolt reaktorcellák mentén kialakuló áramlásra (dugóáramlásra) jellemző trendet mutatják, hasonlóan az O_2 gázkoncentrációs adatpontokhoz.

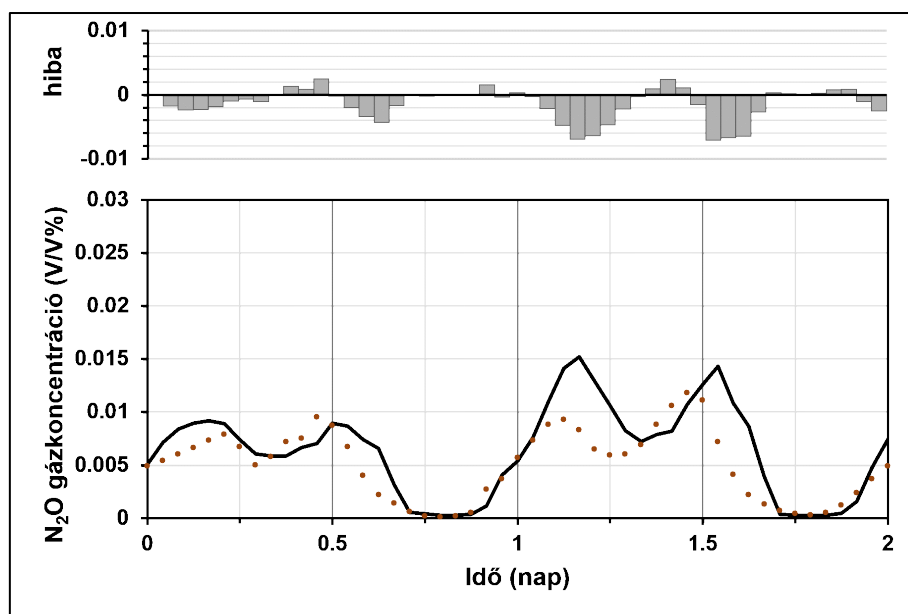


1. ábra: Modell verifikáció O₂-, CO₂-gradiens alapján (készítette a szerző, forrás: ld. [24])
 Üzemi körülmények – víz hőmérséklet: 19,5 °C, vízhozam: 144 m³/d, reaktortérfogat: 6,4 m³;
 befolyó szervesanyag-tartalom: 217 mg KOI/l⁶, összes nitrogén: 70 mg N/l; légbeviteli mód:
 felületi mechanikus levegőztetés, 97 V/V% bemenő O₂

Az időben változó (tranzien) gázfázis-modell ellenőrzésének referencialétesítménye egy teljes nitrogéneltávolítást biztosító eleveniszapos rendszer az új-zélandi Aucklandben. A biológiai reaktorok négy párhuzamos terhelési sora öt levegőztetés nélküli és hét levegőztetett cellából álló kaszkádkonfigurációban üzemel, amelyben a reaktorok alján elhelyezett finombuborékos levegőztető elemek szolgáltatják az oxigénbevitelt. A verifikációhoz az utolsó levegőztetett egységből mintázott folyamatos, szondával mért adatok a modell által előrejelzett N₂O gázkoncentrációkkal lettek összehasonlítva. A gázfázis koncentrációja a levegőztetett tartály felületére helyezett gázbúrák segítségével lett regisztrálva. A konfigurációban fontos volt a befolyó szennyvíz jellemzése annak érdekében, hogy az eleveniszap koncentrációja és oxigénigénye tükrözze a valós rendszerét, valamint a levegőztető elemek hatékonysági jellemzőinek beállítása és a levegőztetési modell finomhangolása a szennyeződési állapotuknak megfelelően, hogy az O₂-bevitel pontosan szimulálható legyen, és alapul szolgálhasson egyéb gázok sztrippelésének számításához.

A 2. ábra Nikolova-Kuscu és mtsai. (2024) által végzett N₂O mérések (pontokkal ábrázolva) és az N₂O számítások (folytonos vonalként ábrázolva) 2 napos napszakos profilját, valamint a kettő közötti abszolút hibát illusztrálja [25, p. 7.]. Az első napi mintavételezés szoros illeszkedést mutat, a hiba kisebb, mint 0,005 V/V%, és a második nap során is reprodukálhatóak a dinamikus trendek, de a terheléssel járó két csúcspont csak kevésbé pontosan sikerült kiszámítani, ugyanis a hiba elérte a 0,007 V/V%-ot. Feltételezhető, hogy a befolyó szennyvíz időbeli jellemzésére vonatkozó adatok felbontása nem volt elegendő – az ammóniumkoncentrációra vonatkozó mintavételek gyakorisága nem volt kellően nagy – a csúcsok pontos rögzítéséhez. Az utolsó levegőztetett cellában az oldottoxigén-koncentráció is ingadozott, így a nem optimális levegőztetés-szabályozás is okozhatta az N₂O-termelés változékonyságát. Az N₂O-koncentrációkat a folyadékfázisban egyidejűleg mérték, ami lehetővé tette a biológiai N₂O-termelés (a folyékony fázisban) és az N₂O-kibocsátás (gázfázisba való sztrippelés) jobb megértését. A regisztrált és a modellezett oldott N₂O-koncentrációk, amelyek a mintavétel napszakos időszakában hasonlóan illeszkedő tendenciát mutattak, lehetővé tették a kezelés során N₂O-termelést számszerűsítő modell ellenőrzését, és alátámasztották a gáz-folyadék átadási számítások érvényességét [25].

⁶ Kémiai oxigénigény - KOI: a szennyvíz szervesanyag-tartalmának vegyszeres (kálium-dikromát alapú) oxidációjához szükséges O₂ mennyisége



2. ábra: Modell verifikáció N₂O-profil alapján (készítette a szerző, forrás: ld. [25])
 Üzemi körülmények – hőmérséklet: 19,8 °C, hozam: 67 392 m³/d, reaktortérfogat: 28 200 m³;
 befolyó szervesanyag-tartalom: 705 mg KOI/l, összes nitrogén: 59 mg N/l; légbeviteli mód:
 finombuborékos levegőztetés, 21 V/V% bemenő O₂

A kísérleti és üzemi reaktorokon alapuló gázfázis-modell verifikáció eredményei megerősítik, hogy a gáz-folyadék átviteli módszertan alkalmazható mind az O₂-beoldódásra, mind pedig más oldott gázok sztrippelésére a szennyvíztisztítás során. Myers és mtsai. (2021) szintén megerősítették, hogy a diffúziós képességen alapuló Higbie-elmélet megbízható becslést ad a gázok tömegátadási együtthatójára, összekapcsolva az ismert O₂ tömegátadási adatokkal adott keverési körülmények között [26, pp. 641-651.]. Jelen tanulmány igazolja, hogy a szennyvíz terhelési viszonyaival szinkronizált dinamikus oxigénátadási modell kompatibilis más gáznemű komponensek anyagforgalmának térbeli és időbeli előrejelzésére is.

2.4 Modellbeállítások

A VOC-eltávolítási modell alkalmazásainak bemutatása céljából a Nemzetközi Vízügyi Szövetség Benchmark Simulation Model 1⁷ (BSM1) tesztkonfigurációjának egy változata lett összeállítva a Sumo22 szimulációs szoftverben. A tanulmány az iszap tartózkodási idő és levegőellátás függvényében vizsgálja az energiafogyasztás csökkentésének és a vízminőség javításának lehetőségeit. Sort kerít egy kockázatelemzési esettanulmányra az üzemeltetés során fellépő lehetséges vészhelyzeti forgatókönyvek figyelembevételével. A kiválasztott technológiai séma egy szimulációs referenciatelep, amely viszonylag egyszerű, szabványos szennyvíztisztító létesítményt határoz meg a definiált befolyó terhelésekkel, és amelynek célja a rendszer teljesítményének értékelése egy adott kritériumrendszer szerint.

A BSM1 üzem egy öt részre tagolt eleveniszapreaktor-kaskádöt tartalmaz, amely a biológiai nitrogéneltávolítás eléréséhez széles körben elfogadott elrendezés, két levegőztetés nélküli (anoxikus) és három levegőztetett (aerob) zónából áll. A reaktorkaskád után utóülepítő látja el a fázisszétválasztást [27]. Az 1. táblázat foglalja össze a referencialétesítmény főbb jellemzőit, az átlagos száraz időjárási körülmények tekintetében.

⁷ Benchmark Simulation Model 1 - BSM1

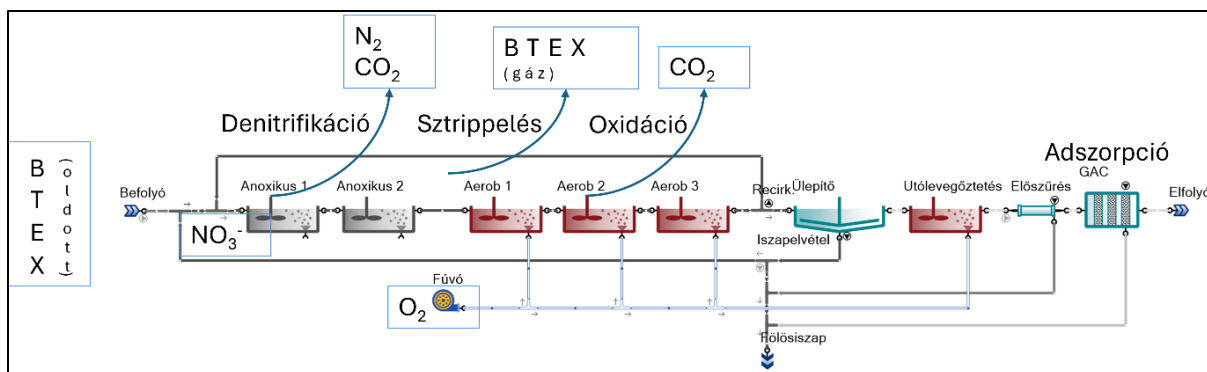
| Paraméter | Érték | Mértékegység |
|------------------------------|--------|-------------------|
| Nyers szennyvíz | | |
| Vízhozam | 18 446 | m ³ /d |
| Hőmérséklet | 20 | °C |
| Szervesanyag-tartalom | 360 | mg KOI/l |
| Oldott szervesanyag-tartalom | 144 | mg KOI/l |
| Összes nitrogén | 47 | mg N/l |
| Ammónium-nitrogén | 30 | mg N/l |
| Műtárgyak | | |
| Anoxikus 1 zóna térfogat | 1 000 | m ³ |
| Anoxikus 2 zóna térfogat | 1 000 | m ³ |
| Aerob 1 zóna térfogat | 1 333 | m ³ |
| Aerob 2 zóna térfogat | 1 333 | m ³ |
| Aerob 3 zóna térfogat | 1 333 | m ³ |
| Utóülepítő felület | 1 500 | m ³ |
| Utóülepítő vízmélység | 4 | m |

1. táblázat: BSM1 rendszer fő bemenő paramétereit (készítette a szerző, forrás: ld. [27])
A terhelési paraméterek Vanhooren és Nguyen (1996) által javasolt, a BSM1 szabványos bemeneteiként használt adatok. A referencia-adatbázis egy nagyléptékű eleveniszapos üzem mérései alapján szolgáltat adatokat különböző időjárási viszonyokra [28].

A BSM1 elrendezés mellett a Sumo22 empirikus fúvó- és szivattyúmodelljei is alkalmazhatóak a levegőztetéssel és szivattyúzással kapcsolatos energiaigény és -költségek meghatározására. Üzemeltetési stratégiai szempontból a folyamatmodellezés költségcsökkentési lehetőségeket tárhat fel a szabályozási stratégiák kikísérletezésével, és rámutathat a környezetvédelmi előírások betartásához szükséges beavatkozásokra. A Sumo22 egy nyílt forráskódú környezet, amelyet dinamikus környezeti modellezésre fejlesztettek ki, különös tekintettel a települési és ipari szennyvíztisztító telepekre [19].

A 3. ábra alapján a tanulmány az eredeti BSM1 konfigurációt granulált aktív szén⁸ (GAC) eljárással és ezt megelőzően mikroszűrővel egészíti ki. Utóbbira azért van szükség, hogy mechanikai védelmet nyújtson a GAC-oszlopok előtt, leválasztva a túlfolyó lebegő anyagokat az ülepítés után. A GAC-egység folyamatmodellje a kimerült ágy cseréjének gyakoriságát a közeg szerves-szénadszorpciós kapacitása és az eltávolított oldott szerves anyagok terhelése alapján határozza meg, követve az aktív-szén-fogyasztásra. A tanulmányban a teljes ágytérfogat 50 m³; a BSM1 rendszerhez kapcsolódó szennyvíz-minőség és -mennyiség mellett ez körülbelül havonta egy ágycserét tesz szükségessé, feltételezve, hogy az ágy sűrűsége 450 kg/m³, és hogy az oldott szerves-szénadszorpciós kapacitása 0,18 g C/g GAC, üzemeltetési tapasztalatok alapján. A mikroszűrőket és a GAC-egységeket félórás, illetve napi ciklusokban iparbiztonsági okokból vissza kell mosni, hogy a lebegő komponensek ne okozzanak eltömődést a szűrőn és a szemcsés közegen. A Sumo22 programban az ágy cseréje automatikusan számítható a megkötött szerves vegyületek tömegárama alapján, szimulálva, ahogy egy kezelőműben karbantartáskor időszakosan eltávolítanak a kimerült töltetet és telepítenének új töltetet, amikor a közeg áttörési pontját eléri. Az ülepítés után egy további, 0,3 óra hidraulikus tartózkodási idejű utólevegőztető zóna biztosítja a szennyvíz minőségéhez szükséges oldott-nitrogén-szint fenntartását. A befolyó víz a BTEX-összetétel tekintetében – a kommunális szennyvízben tipikus koncentrációknak megfelelően – 303 µg/l benzolt, 290 µg/l toluolt, 249 µg/l etilbenzolt és 933 µg/l xilolt tartalmaz [29, pp. 197-206.].

⁸ Granular activated carbon - GAC: granulált aktív szén



3. ábra: Tanulmány modellkonfigurációja, BTEX-eltávolítási folyamatok (készítette a szerző)

A Sumo22 forgatókönyv-elemzési funkciójának használatával az iszap tartózkodási idő és az utólevegőztető tartályok léghozama bemeneti paraméterekként lettek meghatározva, amelyeket az állandósult állapotú szimulációk között vagy a dinamikus futtatások során módosítani lehetett. Így hatékonyan kiértékelhető a fúvó energiaigény, az éves aktívszén-szükséglet és az eltávolított BTEX-szennyezőanyagok mennyiségének változásai. A BSM1 iránymutatása szerint az iszap tartózkodási idő⁹ (SRT) szabályozása érdekében a Sumo22 automatikusan állítja a fölősiszap elvételét. A BSM1 előírásain túlmenően az aerob reaktortérben az oldottoxigén-koncentráció az elfolyó ammónium-célérték alapján kerül szabályozásra, amelynek beállítása 0,6 mg N/l; 0,5 és 2 mg/l minimális és maximális megengedett oxigénkoncentráció mellett – a megfelelő keveredés biztosítása és a túllegeztetés elkerülése érdekében.

2.5 Számítógépes szimulációk kiértékelése

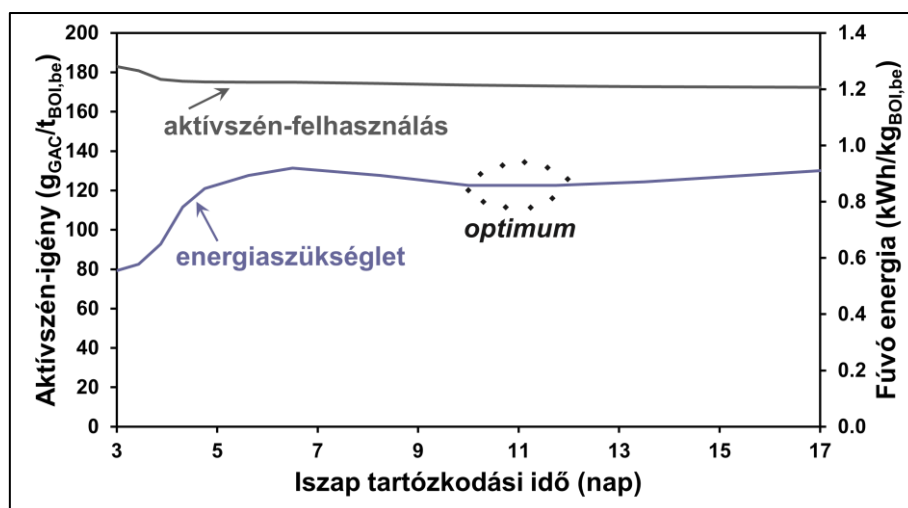
A szimulációs eredmények értelmezéséhez a modell kimeneti beállításai a szennyezőanyag-terhelésre, a szennyvíz-összetételei profilokra és a tisztítottvíz-minőségre vonatkoznak. Emellett kimeneti változóként lettek specifikálva az erőforrásokkal kapcsolatos számítások is, különös tekintettel a levegőztetési igényre és az aktívszén-fogyasztásra. A Sumo22 matematikai szolver algoritmusai látják el az üzemszintű modellezéshez szükséges differenciálegyenletek megoldását. Az esettanulmányok az iszap tartózkodási időre épülő érzékenységvizsgálatot és a haváriaesemény-elhárítás egy felhasználási esetét mutatják be. Ez utóbbi levegőztetés általi sztrippelésen keresztül biztosította a vízminőség stabilizációját.

2.5.1 Érzékenységvizsgálat az iszap tartózkodási idő alapján

Az első modellkísérletben a tesztkonfiguráció állandósult állapotban, száraz időszakra jellemző konstans beállításokkal futott a Sumo22 kombinált szolvereinek használatával. Az érzékenységvizsgálat futtatások sorozatát jelentette változó SRT-vel, számszerűsítve a fúvó teljesítményfelvételét és az időszakos GAC-ágycseréhez szükséges aktív szén tömegáramát. Ezekből a változókból és a BSM1 specifikációkra vonatkozó nyers szennyvíz befolyó jellemzőiből kiindulva a 4. ábra szemlélteti a befolyó biokémiai oxigénigényre¹⁰ (BOI) vonatkoztatott levegőztetési energiafogyasztást és aktívszén-igényt, hogy általánosabb eredményeket kapjunk a referenciatelep kapacitásától függetlenül.

⁹ Sludge retention time - SRT: iszap tartózkodási idő

¹⁰ Biokémiai oxigénigény - BOI: a szennyvíz szervesanyag-tartalmának mikroorganizmusok általi oxidációjához szükséges O₂ mennyisége

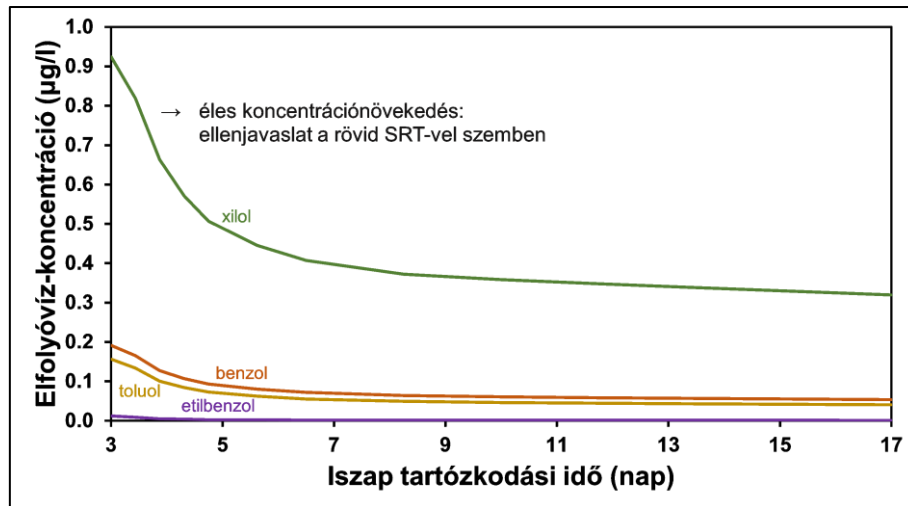


4. ábra: Szimulált erőforrásigény az SRT függvényében (készítette a szerző)

20 °C szennyvízhőmérséklet mellett az eredmények azt mutatják, hogy az aktívszén-szükséglet csökkenése a 3-6 nap SRT-tartományban a legjelentősebb, ugyanakkor a fűvő arányosan sokkal nagyobb teljesítményt igényel a megnövelt biomassza-koncentrációval járó oldottoxigén-igény kielégítéséhez. Ez az SRT-tartomány azonban nem jellemző szennyvíz-újrahasznosító rendszerekre, ugyanis magas vízhőmérsékleten is hosszabb tartózkodási időre van szükség a megfelelő tápanyag-eltávolításhoz, például a teljes nitrogéneltávolításhoz általában 10-15 nap szükséges. Ha az SRT e tartomány alá esik, a folyamat csak részleges eltávolítást biztosít. Ezzel szemben, ha az SRT meghaladja ezt a tartományt, a telep energiahatékonyságának veszteségével járhat [30, pp. 1-6.]. 6 nap felett az aktívszén-igény további csökkenése már kevésbé jelentős.

Ennek az az oka, hogy a GAC-oszlopok által kezelt szervesanyag-terhelés nagy része oldott, biológiailag nem lebomló szerves anyagokból áll, amelyek lebontása nem fokozható a biomassza tartózkodási idejének növelésével. Azonban az ammóniumkoncentráció visszacsatolásának bevezetésével, az oxigénellátás hatékony szabályozása érdekében, az SRT 6 nap fölé emelése bizonyos mértékig csökkenti a levegőztetési energiaszükségletet, mivel így az ammóniumoxidáló baktériumok számára kevesebb O_2 is elegendő a kívánt ammónium-célérték eléréséhez. A szükségtelenül magas SRT specifikáció rontja az energiahatékonyságot, mivel a koncentrált iszap oxigénbevitelének összességében megnő. A BSM1 rendszer optimális SRT tartománya 10-12 nap az ammónia-vezérelt hatékony levegőellátás-szabályozással.

Az üzemeltetési költségek mellett a mikroszennyező anyagok eltávolításának mértéke szintén kiemelten fontos szempont a szennyvíz-újrahasznosításban. Ennek szemléltetése érdekében az 5. ábra a tisztított víz BTEX-koncentrációit mutatja az SRT függvényében. A BTEX-eltávolításban mutatkozó különbség a 3-6 nap SRT-tartományban a legjelentősebb, mivel a GAC-ágyon keresztül nagyobb mennyiségű szennyezőanyag kerül át, hiszen nem jutott elegendő idő a biomassza általi lebontásra. Következésképpen fontos kiemelni, hogy az eleveniszapos technológiát mindig felelősségteljesen szükséges üzemeltetni, nem engedve, hogy az SRT a tápanyag-eltávolításhoz szükséges szint alá csökkenjen, mivel a GAC-kezelés a felhasználási esettől függően (például mezőgazdasági célú újrafelhasználás, ivóvízellátás) nem biztos, hogy a terhelésben lévő többletet kellőképpen adszorbeálja a hatósági előírásoknak megfelelően [21]. Benstoem és mtsai. (2017) a mikroszennyező anyagok eltávolításának hatékonyság-csökkenését figyelték meg egy rosszul működő utóülepítőben, amelyben a fázisszétválasztás üzemzavara eleveniszap-elúszáshoz és biomassza-vesztéshez vezetett [31, pp. 105-118.].



5. ábra: Szimulált elfolyó BTEX-koncentrációk az SRT függvényében (készítette a szerző)

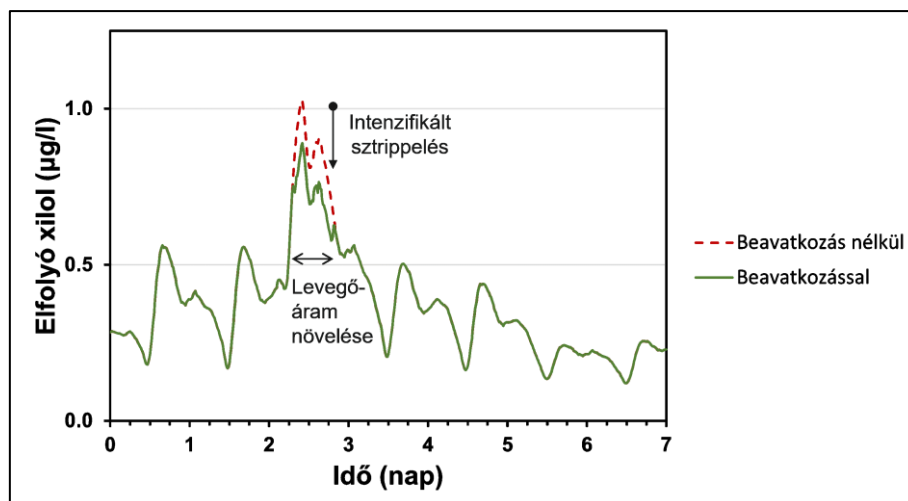
A 4. ábra eredményeiből következtetve, a GAC-egység terhelése nagyrészt oldott, nem biodegradálható vegyületek formájában van jelen; ezért csak korlátozott mértékben lehet csökkenteni a karbantartási költségeket az ágycsere gyakoriságának minimalizálásával, az eleveniszapos folyamat intenzifikálásán keresztül. Az 5. ábra alapján viszont megállapítható, hogy minél hatékonyabb a tápanyag-eltávolítás, annál jobb a szennyvíz minősége, beleértve az alacsonyabb BTEX-koncentrációkat is. A szennyvízből történő széneltávolítást célzó ultrarövid SRT-eljárások (<4 nap) nagy hatékonyságot mutatnak a szervesanyag-leválasztásban és a szennyvíztisztító telepek energia-visszanyerési arányának növelésében [32]. Mivel a szennyvíz-újrahasznosítás során a környezetbiztonságot is feltétlenül szükséges előtérbe helyezni, az ammónium-célértéken alapuló levegőztetés-szabályozás megvalósítása segíthet az SRT optimum meghatározásában az energiahatékonyság érdekében; ugyanakkor elkerülve a rövid SRT-hez köthető veszélyes üzemállapotokat, amelyek exponenciálisan növekvő mikroszennyező-koncentrációkhoz vezetnének.

2.5.2 Havária-elhárítási szcenárió

A második esettanulmány a létesítményszintű modellt dinamikus szimulációk keretében vizsgálta, időben változó befolyó terhelés mellett, a BSM1 szabványos vízmennyiségi és vízminőségi paramétereinek felhasználásával. Az előző szimulációs tanulmány szerinti átlagos száraz időszaki terhelési feltételek alapján elvégzett állandósult állapotú számítást követően a modell az egyhetes üzemidőnek megfelelő napi ingadozásokat szimulálta, vízhozam és nyers szennyvíz-koncentrációk tekintetében. A hét közepén egy további csapadékvíz-terhelés lett betáplálva, amely megduplázta a befolyó vízhozam-csúcsot. Ezzel egyidejűleg, a szervesanyag-terheléssel együtt a nitrogéntartalom is változott a csapadék megjelenésével [33, pp. 295-299.]. A 6. ábra a tisztított víz előrejelzett xilol-koncentrációjának két különböző heti profilját hasonlítja össze, ezek közül az egyik modellfuttatás a viharesemény alatt a hét többi részével összhangban lévő üzemállapotot tükrözte, a másik pedig vészhelyzeti reagálást iktatott be az esővíz által befolyásolt vízminőség stabilizálására.

Az előbbi eset eredményei működési változtatások nélkül: a szaggatott piros vonal azt jelzi, hogy a lehulló csapadék által okozott terhelési csúcsot követően a szennyvíz-kibocsátás xilolkoncentrációja meghaladta volna az 1 µg/l-t. Az utóbbi dinamikus modellfuttatás az utólevégőztető tartályok levegőellátásának növelésére irányuló üzemeltetői beavatkozást szimulálta. Az egyesített befolyó szennyvíz-terhelés hirtelen növekedésének idővonalához igazodva, 2,3 nap üzemidő elteltével a tartályfelületre vonatkoztatott léghezam 12-ről 48 m³/m²/h-ra módosult és ez a változtatás fél napig tartott.

A csapadékvíz-esemény bekövetkezésével a hirtelen terhelésnövekedés figyelmeztetheti az üzemeltetőket, hogy arra reagálva változtassák meg az utólevegőztető tartályok léghozamát. A folytonos zöld vonal szemlélteti, ahogyan a kiugró xilolkoncentráció hatékonyan csökken ezzel a módosítással – tehát az idejében történő beavatkozásnak köszönhető intenzívebb VOC-sztrippeléssel a szennyvíz minősége stabilizálható.



6. ábra: Havária-tervezési scenárió, elfolyó xilolkoncentráció példáján (készítette a szerző)

Az átlevégőztetés általi sztrippelés elősegíti a biológiai kezelést követően fennmaradó BTEX-szennyezők eltávolítását, amelyek koncentrációja sokkal kisebb, mint a többi fennmaradó szerves szennyezőanyag; így érdemben nem képes az aktív szén-igény minimalizálására, de potenciálisan hasznos a vízminőség stabilizációjára, biztonságos alternatívaként szolgál a kibocsátási előírások betartására üzemzavarok esetén.

A sztrippelés intenzifikálásának a VOC-koncentrációkra gyakorolt hatása rávilágít az üzemszintű modellek kockázatértékelésben való felhasználására. Egy vízbiztonsági terv szerinti megfelelő üzemeltetői felkészültséggel ez egy viszonylag gyors beavatkozással megvalósítható módszer lehet a vízminőség helyreállítására [34, pp. 87-96.], illékony mikroszennyező anyagok tekintetében. A hirtelenszerű csapadékvíz-terhelés esete alapján – amely a GAC-oszlopokra táplált xilol kiugró mennyiségét eredményezte –, a tisztított víz szervesszén-koncentrációjának vagy a befolyó víz hozamának folyamatos nyomon követése visszajelzőként vagy előrejelzőként szolgálhat az üzemeltetésben (helyszíni felügyeleti rendszerekkel összekapcsolva). Így időben változtathatnak a levegőellátáson a hatékonyabb VOC-sztrippelés érdekében, biztosítva az utókezelésből származó víz minőségi határértékeinek betartását.

3. KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány az üzemszintű modellezés által nyújtott lehetőségeket tárta fel a szennyvíztisztítás és -újrahasznosítás területén, illékony szerves mikroszennyezők eltávolításának kérdéseinek vizsgálatával. A sztrippelést és a biodegradációt leíró kinetikai modellek matematikai szimulációs programban futtathatók, és ígéretes eszközként szolgálnak a szennyvíz-minőség becslésére, valamint az üzemek optimalizálására költség- és erőforrás-hatékonyság szempontjából.

A tanulmány modellkísérletei rámutattak a dinamikus modellezés lehetőségeire a környezetbiztonsági és -mérnöki területeken. Vizsgálták az eleveniszapos technológia üzemeltetési paramétereinek hatását bizonyos VOC-vegyületek eltávolítására, valamint a granulált aktív szén fogyasztására az utókezelés során.

Bár számos újonnan felmerülő veszélyes szennyezőanyag létezik, például gyógyszermaradványok, mikroműanyagok, nehézfémek, e tanulmánynak nem volt célja, hogy átfogó elemzést nyújtson az összes lehetséges mikroszennyezőről, amely a szennyvíztisztítás és -újrafelhasználás során keletkezhet.

A tanulmány verifikációs lépése a gázkibocsátások ellenőrzésével megerősítette, hogy az üzemszintű modell a várt módon működik – amely O_2 - és CO_2 -koncentrációkkal és az N_2O -kibocsátás előrejelzésével valósult meg. A módosított BSM1 telepkonfiguráció esetére – kombinált biológiai és aktív szén-alapú kezeléssel – a modell 99% feletti összesített eltávolítási hatásfokot számít a BTEX-komponensek nagyságrendi csökkenésére, Mello és mtsai. (2019) kísérleti megfigyeléseivel hasonlóan [7]. Azonban további kutatások keretében fontos előrelépést jelentene a modell validálása valós szennyvízkezelő üzemben mért BTEX gázkoncentráció adatok alapján.

Az első esettanulmányból kiderült, hogy az iszap tartózkodási idő 3 és 6 nap közötti növelése csökkenti az aktív szén-igényt (20 °C hőmérsékleten). Az SRT 6 nap alatti csökkentése azonban a vizsgált BTEX-mikroszennyezők kibocsátásának exponenciális növekedéséhez vezetett. Az SRT 6 nap fölötti növelése kevésbé segítette elő a GAC-szükséglet további csökkentését, viszont ebben a tartományban az ammónia-alapú oldott oxigén-szabályozás – a biomassza ideális levegőellátásával – minimalizálta az energiaigényt. Az SRT 15 nap fölötti beállítása viszont határozottan az energiahatékonyság rovására ment. Az SRT optimális tartománya a vizsgált konfiguráció alapján 10 és 12 nap között határozható meg.

Mivel a BTEX-vegyületek csak kis koncentrációban fordulnak elő települési szennyvizekben, a GAC karbantartási költségcsökkentése a szennyvíztechnológia optimalizálásával korlátozottan bizonyult, hiszen a GAC-oszlopokra táplált többségében nem biodegradálható és nem illékony anyagok lebontással vagy sztrippeléssel nem távolíthatók el.

A második felhasználási esetben, egyhetes dinamikus szimulációk során, a konfigurációt napi terhelési mintázatok és csapadékos, illetve szárazidei időszakok is jellemezték. Haváriászerű csapadékeseményeknél az intenzív átlevégtetés általi VOC-sztrippelés hasznos beavatkozásnak mutatkozott a szennyvíz-minőség romlásának megelőzésére a GAC-eljárás előtt. A modellkísérlet rámutatott, hogy szennyvíz-újrahasznosítási üzemzavarok időszzerű elhárítása érdekében az intenzifikált sztrippelés hatékony megközelítés lehet az illékony mikroszennyezők eltávolításának stabilizációjára. Emellett kiemelte a létesítményszintű modellek szerepét a vészhelyzeti tervezés és a kockázatértékelés területén, amelyek elősegíthetik az üzemeltetők felkészültségét túlterhelés vagy berendezés-meghibásodás esetén.

A bemutatott modellek betekintést nyújtanak nehezen vagy költségesen mérhető változókba, ezzel segítve a szakembereket a folyamatok mélyebb megértésében. A szimulációk akár valós időben is kapcsolódhatnak a létesítményekhez, hasznos eszközt nyújtva a szennyvíztisztítás optimalizálására [35, pp. 2840-2853.].

Fontos megjegyezni, hogy a tanulmány az üzemszintű folyamatszimuláció gyakorlati alkalmazásaira összpontosít, a VOC-k biológiai szennyvíztisztításban betöltött szerepét és a fizikai-kémiai kezelés lehetőségeit vizsgálva. Az eredmények a BSM1 referencialétesítményen alapulnak, ezért nem általánosíthatók egyéb szennyvízminőségre.

Jövőbeli kutatási célok között szerepel a modellek kiterjesztése további műveleti egységekre, például membránokra, valamint egyéb VOC-k eltávolításának vizsgálatára. További hangsúlyt kell fektetni a kibocsátott gázok kezelésének modellezésére, különösen az egészségügyi kockázatok szempontjából, például a benzol esetében. Továbbá, a kutatások irányulhatnak magas BTEX-koncentrációjú ipari szennyvizekre, például a petrokémiai szektor szennyvízkezelésére.

4. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] S. M. Scheierling, C. R. Bartone, D. D. Mara, és P. Drechsel, Improving Wastewater Use in Agriculture: An Emerging Priority. *World Bank Policy Research Working Paper Series*, 5412, Washington, DC, USA: The World Bank, 2010, <https://doi.org/10.1596/1813-9450-5412>
- [2] S.M. Scheierling, C. R. Bartone, D. D. Mara, és P. Drechsel, “Towards an agenda for improving wastewater use in agriculture”, *Water International*, vol. 36, no. 4, pp. 420–440, 2011, <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.594527>
- [3] S. Ofori, A. Puškáčová, I. Růžičková, és J. Wanner, “Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons”, *Science of The Total Environment*, vol. 760, 144026, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>
- [4] Z. Sheikholeslami, D. Y. Kebria, és F. Qaderi, “Nanoparticle for degradation of BTEX in produced water; an experimental procedure”, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 264, pp. 476–482, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.096>
- [5] C. J. Davidson, J. H. Hannigan, és S. E. Bowen, “Effects of inhaled combined Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX): Toward an environmental exposure model”, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 81, 103518, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103518>
- [6] P. Jiang, C.-J. Tzeng, C.-C. Hsieh, és M. K. Stenstrom, “Modeling VOC Emissions in the High-Purity Oxygen Activated Sludge Process”, *Journal of Environmental Engineering*, vol. 136, no. 11, pp. 1189–1196, 2010, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000273](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000273)
- [7] J. M. M. Mello, H. L. Brandao, A. Valerio, A. A. U. de Souza, D. de Oliveira, és A. da Silva, “Biodegradation of BTEX compounds from petrochemical wastewater: Kinetic and toxicity”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 32, 100914, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100914>
- [8] A. Trusek-Holownia és A. Noworyta, “Advanced treatment of wastewater with BTEX”, *Desalination and Water Treatment*, vol. 50, pp. 440–445, 2012, <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.705089>
- [9] A. Takáčová, M. Smolinská, M. Semerád, és P. Matuš, “Degradation of BTEX by microalgae *Parachlorella kessleri*”, *Petroleum & Coal*, vol. 57, no. 2, pp. 101-107, 2015 [Online]. Elérhetőség: https://www.vurup.sk/wp-content/uploads/dlm_uploads/2017/07/pc_2_2015_takacova_317.pdf (2024.12.30.)
- [10] H. Anjum, K. Johari, N. Gnanasundaram, M. Ganesapillai, A. Arunagiri, I. Regupathi, és M. Thanabalan, “A review on adsorptive removal of oil pollutants (BTEX) from wastewater using carbon nanotubes”, *Journal of Molecular Liquids*, vol. 277, pp. 1005–1025, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.105>
- [11] K. C. Lee, B. E. Rittmann, J. Shi, és D. McAvoy, “Advanced steady-state model for the fate of hydrophobic and volatile compounds in activated sludge”, *Water Environment Research*, vol. 70, no. 6, pp. 1118–1131, 1998, <https://doi.org/10.2175/106143098X123480>
- [12] M. Pomiès, C. Wisniewski, J. M. Choubert, és M. Coquery, “Modelling of micropollutant removal in biological wastewater treatments: A review”, *Science of The Total Environment*, vol. 443, pp. 733–748, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.037>
- [13] D. Orhon és E. U. Çoçgör, “COD fractionation in wastewater characterization—The state of the art”, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 68, no. 3, pp. 283–293, 1999, [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199703\)68:3<283::AID-JCTB633>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199703)68:3<283::AID-JCTB633>3.0.CO;2-X)

- [14] G. G. Patry és I. Takács, “Settling of flocculent suspensions in secondary clarifiers”, *Water Research*, vol. 26, no. 4, pp. 473–479, 1992, [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90048-9](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90048-9)
- [15] M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel, G. v. R. Marais, és M. C. M. Van Loosdrecht, “Activated Sludge Model No.2d, ASM2D”, *Water Science & Technology*, vol. 39, no. 1, pp. 165–182, 1999, <https://doi.org/10.2166/wst.1999.0036>
- [16] M. Arnell, M. Ahlström, C. Wärff, R. Saagi, és U. Jeppsson, “Plant-wide modelling and analysis of WWTP temperature dynamics for sustainable heat recovery from wastewater”, *Water Science & Technology*, vol. 84, no. 4, pp. 1023–1036, 2021, <https://doi.org/10.2166/wst.2021.277>
- [17] L. Rieger, S. Gillot, G. Langergraber, T. Ohtsuki, A. Shaw, és I. Takács, *Guidelines for Using Activated Sludge Models*. London, UK: IWA Publishing, 2012.
- [18] M. Henze, L. Grady, Jr. W. Gujer, G. v. R. Marais, és T. Matsuo, *Activated Sludge Model No 1*. London, UK: IAWPRC Publishing, 1987 [Online]. Elérhetőség: https://www.researchgate.net/publication/243624144_Activated_Sludge_Model_No_1#fullTextFileContent (2024.12.30.)
- [19] Dynamita, *Sumo22 User Manual*. Sigale, France: Dynamita SARL, 2022 [Online]. Elérhetőség: <https://wiki.dynamita.com/en/introduction> (2024.12.30.)
- [20] M. Kasi, T. Wadhawan, J. McEvoy, G. Padmanabhan, és E. Khan, “Effect of carbon source during enrichment on BTEX degradation by anaerobic mixed bacterial cultures”, *Biodegradation*, vol. 24, pp. 279–293, 2013, <https://doi.org/10.1007/s10532-012-9586-1>
- [21] D. Bencsik, T. Wadhawan, F. Házi, és T. Karches, “Plant-Wide Models for Optimizing the Operation and Maintenance of BTEX-Contaminated Wastewater Treatment and Reuse”, *Environments*, vol. 11, no. 5, 88, 2024, <https://doi.org/10.3390/environments11050088>
- [22] R. Higbie, “The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure”, *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, vol. 31, pp. 365–388, 1935.
- [23] R. Sander, “Compilation of Henry’s law constants (version 4.0) for water as solvent”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 15, no. 8, 4399–4981, 2015, <https://doi.org/10.5194/acp-15-4399-2015>
- [24] M. K. Stenstrom, *Westpoint Treatment Plant oxygen process modeling*. UCLA-ENG 90-17, Los Angeles, California: UCLA School of Engineering and Applied Science, 1990 [Online]. Elérhetőség: https://www.researchgate.net/publication/267549420_WESTPOINT_TREATMENT_PLANT_OXYGEN_PROCESS_MODELING#fullTextFileContent (2024.12.30.)
- [25] R. Nikolova-Kuscu, L. Fonseca, D. Hume, és S. Bungay, “Using mechanistic models for predicting nitrous oxide emissions from the activated sludge process”, Előadás: *Water New Zealand Conference & Expo 2024*, Claudelands, Kirikiriroa Hamilton: Water New Zealand, 2024.09.25. [Online]. Elérhetőség: https://www.waternz.org.nz/Article?Action=View&Article_id=2895 (2024.12.30.)
- [26] S. Myers, A. Mikola, K. Blomberg, A. Kuokkanen, és D. Rosso, “Comparison of methods for nitrous oxide emission estimation in full-scale activated sludge”, *Water Science & Technology*, vol. 83, no. 3, pp. 641–651, 2021, <https://doi.org/10.2166/wst.2021.033> (2024.12.30.)
- [27] J. Alex, L. Benedetti, J. B. Copp, K. V. Gernaey, U. Jeppsson, I. Nopens, M.-N. Pons, L. Rieger, C. Rosen, J.P. Steyer, P. Vanrolleghem, és S. Winkler, *Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1)*. Lund, Sweden: Lund University, 2008 [Online]. Elérhetőség: https://www.researchgate.net/publication/284618938_Benchmark_Simulation_Model_no

[_1_BSM1_IWA_Taskgroup_on_benchmarking_of_control_strategies_for_WWTPs#fullTextFileContent](#) (2024.12.30.)

- [28] H. Vanhooren és K. Nguyen, *Development of a simulation protocol for evaluation of respirometry-based control strategies*. Report University of Gent, Belgium and University of Ottawa, Canada, 1996.
- [29] B. Mrowiec, “Effect of BTX on Biological Treatment of Sewage”, *Environment Protection Engineering*, vol. 35, no. 2, 197–206, 2009 [Online]. Elérhetőség: https://epe.pwr.edu.pl/2009/Mrowiec_2-2009b.pdf (2024.12.30.)
- [30] R. C. Smith, S. O. Elger, és S. Mleziva, “Implementation of solids retention time (SRT) control in wastewater treatment”, *Xylem Anal*, vol. 20, pp. 1–6, 2015.
- [31] F. Benstoem, A. Nahrstedt, M. Boehler, G. Knopp, D. Montag, H. Siegrist, és J. Pinnekamp, “Performance of granular activated carbon to remove micropollutants from municipal wastewater—A meta-analysis of pilot- and large-scale studies”, *Chemosphere*, vol. 185, pp. 105–118, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.118>
- [32] Y. Zha, Y. Wang, S Liu, S. Liu, Y. Yang, H. Jiang, Y. Zhang, L. Qi, és H. Wang, “Adsorption characteristics of organics in the effluent of ultra-short SRT wastewater treatment by single-walled, multi-walled, and graphitized multi-walled carbon nanotubes”, *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, 17245, 2018, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35374-8>
- [33] L. Li, C. Yin, Q. He, és L. Kong, “First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China”, *Journal of Environmental Sciences*, vol. 19, no. 3, pp. 295–299, 2007, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60048-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60048-5)
- [34] L. Földi, T. Berek, és J. Padányi. (2022) “Hungary’s Energy and Water Security Countermeasures as Answers to the Challenges of Global Climate Change”, *AARMS – Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, vol. 20, no. 2, pp. 87–96, 2022, <https://doi.org/10.32565/aarms.2021.2.7>
- [35] E. Torfs, N. Nicolai, S. Daneshgar, J. B. Copp, H. Haimi, D. Ikumi, B. Johnson, B. B. Plósz, S. Snowling, L. R. Townley, B. Valverde-Pérez, P. A. Vanrolleghem, L. Vezzaro, és I. Nopens, “The Transition of WRRF Models to Digital Twin Applications”, *Water Science & Technology*, vol. 85, no. 10, pp. 2840–2853, 2022, <https://doi.org/10.2166/wst.2022.107>