

A konténerizált szennyvíztisztító telep anyagáramon alapuló modellezésének fejlesztése

A konténerizált szennyvíztisztítási technológiák fenntartható megoldást nyújtanak katonai bázisok számára, ahol szükséges a szennyvíz gyors és hatékony kezelése. Ezek a rendszerek gyakran mobilisak és könnyen telepíthetők, ami ideális a változó körülmények közötti alkalmazásokhoz. A konténerekben elhelyezett egységek biológiailag és fizikailag tisztítják a szennyvizet, ezáltal visszavezetik a környezetbe vagy újrahasznosítják. Nagy hatásfokú létesítményekre adaptált anyagárammodellekkel a rendszerben lejátszódó folyamatok leírhatók, segítségükkel a levegőztetési igény minimalizálható, energiamegtakarítás érhető el. A modellalkotás kiter a dinamikus oxigénbeoldódási hatékonyság paramétereinek becslésére és a változó befolyó szennyvízminőségre alkalmazható tervezési és üzemeltetési stratégiákra – áramlaskiegyenlítéssel és különböző folyamatirányítási technikákkal. A kutatás alkalmazhatósága az ilyen típusú létesítmények költséghatékonyságában mutatkozik meg.

Kulcsszavak: energiamegtakarítás, irányítástechnika, katonai táborok, szennyvízkezelés

DEVELOPMENT OF A CONTAINERIZED WASTEWATER TREATMENT PLANT MODEL CONFIGURATION BASED ON MASS BALANCE ANALYSIS

Package plants provide a sustainable solution for treating wastewater at military bases that require fast and efficient treatment. Such systems are convenient to mobilize and start up, ideal for applications where the environmental conditions change rapidly. Biological and physical treatment is implemented in modular units and the treated water is discharged into the environment or reused. Mass balance models adapted to these high-rate systems mathematically describe the plant-wide kinetic processes taking place and are useful for minimizing aeration demand, leading to energy savings. Model application efforts of this study rely on the dynamic prediction of oxygen transfer efficiency, linking to design and operational strategies applicable to variations in influent wastewater quality – using flow equalization and process control methods. Results of this study emphasize the achievable cost-efficiency of such small-scale systems by appropriate sizing and automation.

Keywords: control strategies, energy saving, military bases, wastewater treatment

Bevezetés

A biztonságos ivóvíz-szolgáltatás érdekében szükséges a városi vízciklus nyílt áramainak zárása és ezáltal a fenntartható vízgazdálkodás megvalósítása, amelynek egyik kulcsfontosságú eleme a szennyvíztisztítás.¹ A szennyvíz különféle vízhasználatokból származó, ásványi és szerves szennyeződésekkel tartalmazó hulladékvíz, amelyet általában a közüzemi csatornahálózaton keresztül, külön vagy a csapadékvízzel együtt vezetnek el. A szennyvízkezelés elsődleges célja a vízbázisok védelme és a környezeti elemek megóvása.² A szennyvíz eredete szerint megkülönböztethetünk lakossági (kommunális), ipari és mezőgazdasági szennyvizet. A szennyvízkezelő rendszerek két fő típusra oszthatók a szennyvíz-gyűjtési terület szerint: centralizált és decentralizált rendszerek.

A centralizált szennyvíztisztítás során a nagyobb településeken keletkező szennyvizet központi telepen tisztítják, amelyhez hosszú csatornahálózat kiépítése szükséges, mivel kis számban működnek nagy kapacitású telepek. A decentralizált szennyvíztisztítás esetében több kis léptékű technológiával vagy egyedi megoldásokkal helyben történik a szennyvíz kezelése, így elkerülhető a hosszú csatornahálózat kiépítése. Ennek hátránya lehet, hogy a lakosság közvetlen környezetében zajlik, ami panaszokat okozhat például a bűzképződés miatt, valamint nem mindig áll rendelkezésre megfelelően képzett személyzet az üzemeltetéshez. Mindkét esetben a szennyvíztisztítás alapfolyamatai azonosak, de a kialakításban és az üzemeltetésben lehetnek különbségek.³

A decentralizált szennyvíztisztító rendszerek különösen kis közösségek, falvak vagy elszigetelt ingatlanok esetében alkalmasak, ahol a központi szennyvíztisztítás nem gazdaságos, vagy technikailag nem kivitelezhető. A decentralizált rendszerek egyik legnagyobb előnye a rugalmasságuk, hiszen különböző méretekben és kialakításokban érhetők el, így alkalmazkodnak a helyi körülményekhez és igényekhez. Az ilyen rendszerekben a szennyvíz kezelése a helyszínen történik, ami minimalizálja a szállítási és kezelési költségeket, miközben megfelelő tisztítási hatékonyságot biztosít.

Az egyedi kis berendezések, mint például a kis létesítmények oldóaknával vagy szikkasztó mezővel, szintén a decentralizált szennyvíztisztítási rendszerek közé tartoznak. Az oldóakna egyszerű, de hatékony eszköz, amely mechanikai és biológiai tisztítást végez, miközben a szilárd anyagokat elválasztja a folyadéktól. Ezt követően a részben tisztított szennyvíz szikkasztó mezőbe kerül, ahol a talajon

¹ NOVOTNY 2008.

² OBAIDEEN et al. 2022.

³ KARCHES–PAPP 2018.

keresztül történő természetes szűrés és lebontás révén további tisztítás történik. Az ilyen rendszerek ideálisak egyedi ingatlanok számára, mivel alacsony költséggel telepíthetők és karbantarthatók, ugyanakkor minimális környezeti hatást gyakorolnak, feltéve, hogy a talajviszonyok és a helyi szabályozások megfelelőek.⁴

A konténerizált szennyvíztisztító rendszerek hatékony megoldást nyújtanak speciális alkalmazásokban, többek között katonai táborok szennyvízkezelésében. Ezek a rendszerek moduláris felépítésüknek köszönhetően mobilisak, így könnyen szállíthatók és telepíthetők, ami különösen előnyös a gyakran változó helyszíneken történő alkalmazásoknál. Kompakt kivitelezésük miatt a konténerizált szennyvíztisztítók kis helyigénnyel rendelkeznek, továbbá telepítésük minimális infrastruktúrát igényel, így gyorsan üzembe helyezhetők olyan környezetekben, ahol a hagyományos szennyvíztisztító rendszerek kialakítása időigényes vagy költséges lenne. A rendszer moduláris jellege lehetővé teszi, hogy különféle tisztítási technológiákat kombináljanak egyetlen egységben, így a szennyvízkezelés az adott körülményekhez igazítható.⁵

Az ilyen típusú rendszerek kifejezetten hasznosak olyan katonai objektumok esetén, ahol a helyszín gyors megváltozása vagy a létszám növekedése rugalmas és biztonságos megoldásokat igényel. Emellett a konténerizált rendszerek minimalizálják a környezeti hatásokat, mivel a tisztított szennyvizet újrahasznosíthatják, például öntözési célokra, ami különösen fontos a vízhiányos területeken.⁶

Az anyagárammodellek továbbfejlesztése üzemszinten teszi lehetővé a szennyvíztisztító rendszerekben zajló folyamatok pontosabb és részletesebb leírását, ami kulcsfontosságú a rendszer hatékonyságának növelése érdekében. Az anyagárammodellek alapvetően olyan matematikai és számítógépes eszközök, amelyek segítségével értelmezhetők és nyomon követhetők a szennyvízkezelés során zajló fizikai, kémiai és biológiai folyamatok. Segítenek megérteni, hogy hogyan áramlanak, alakulnak át, és távolítódnak el különböző anyagok a rendszerben.

A továbbfejlesztett anyagárammodellek alkalmazása különösen fontos a levegőztetési műveletek optimalizálása szempontjából. A szennyvíztisztítás egyik leginkább energiaigényes folyamata a levegőztetés, amely a biológiai tisztítás során a mikroorganizmusok számára biztosít oxigént, amely szükséges a szennyező anyagok lebontásához. A levegőztetési igény minimalizálása nemcsak energia-megtakarítással jár, hanem a rendszer üzemeltetési költségeit is csökkenti.⁷

⁴ CZAKÓ–KARCHES 2019.

⁵ SALLAM et al. 2023.

⁶ MEDINA–WAISNER 2011.

⁷ RIEGER et al. 2006.

Az anyagárammodellek segítségével pontosan szimulálható a szennyvíz összetétele, a benne található szennyeződések jellege és mennyisége, valamint a lebontási folyamatok sebessége. Ez alapján meghatározható a levegőztetés optimális intenzitása és időbeli teljesítményszüksége; elkerülve a túlvegőztetést, amely felesleges energiafogyasztást vonna maga után. Továbbá, ezek a dinamikus modellek lehetővé teszik a rendszer különböző üzemállapotainak szimulálását, amely az üzemeltetők számára segítséget nyújt a legjobb gyakorlatok kialakításában.

Anyagforgalmi modellek

Biokinetikai modell

A biokinetikai modellek alapja a mikrobiális populációk viselkedésének leírása, beleértve a tápanyagfelvételt, a biológiai növekedést, a szerves szennyező anyagok és növényi tápanyagok lebontását, illetve a végtermékek képződését. Az ASM sorozat – különösen az ASM1 – az egyik legismertebb modelles család, amelyet széles körben alkalmaznak az eleveniszapos rendszerek modellezésében.⁸ Az ASM-ek különböző komponensekre (például oldott oxigén, szerves összetevők, ammónia) és különböző biológiai folyamatokra (nitrifikáció, denitrifikáció, szénlebontás stb.) osztják fel a szennyvízkezelést, lehetővé téve a folyamatok pontosabb elemzését.

A szennyvíztisztítás során a mikroorganizmusok fő feladata a szervesanyag- és tápanyag-eltávolítás. A biológiai növekedés és lebontás során a mikroorganizmusok a szerves összetevőket (például szénhidrátokat, fehérjéket) hasznosítják energiaforrásként, amelynek eredményeként új biomassa keletkezik, miközben a szennyező anyagok átalakulnak. Az ASM-ek ezeket az alapfolyamatokat részletesen leírják, figyelembe véve a mikroorganizmusok növekedési sebességét, a tápanyagok elérhetőségét és a környezeti feltételeket, például a hőmérsékletet és a pH-t.

A hidrolízis az a folyamat, amely során a szennyvízben található nagyobb szerves molekulák (például zsírok, fehérjék, poliszacharidok) kisebb molekulákká bomlanak le, amelyeket a mikroorganizmusok könnyebben fel tudnak venni, és le tudnak bontani. A hidrolízis sebessége kulcsfontosságú a szennyvíztisztítás hatékonyságában, amely meghatározza, hogy a szerves anyag mekkora sebességgel válik elérhetővé a mikrobiális lebontás számára.⁹ A nitrogén anyagforgalma

⁸ VAN LOOSDRECHT et al. 2015.

⁹ INSEL et al. 2002.

esetében az ammonifikáció a meghatározó folyamat a szerves nitrogéntartalmú tápanyagok ammónium-nitrogénné való átalakulásában. Az ASM-ekben a hidrolízis dinamikája külön figyelmet kap, mivel ez a folyamat gyakran a szerves szennyezők biológiai bontásának korlátozó tényezője.

A biokinetikai modellek, például az ASM típusú modellek, kulcsfontosságúak a szennyvíztisztítási technológiák tervezésében és üzemeltetésében. A tervezési folyamat során a modellek segítségével szimulálható és optimalizálható a szennyvíztisztító telep működése, például a levegőztetési rendszer hatékonysága, az iszap-visszatáplálás térfogatárama, valamint a tisztítási folyamat egyéb paraméterei. Ezáltal biztosítható, hogy a rendszer megfeleljen a szükséges kibocsátási határértékeknek, miközben minimális energia- és költségráfordítást igényel.

Az üzemeltetés során a modellek segíthetnek az üzemi paraméterek valós idejű finomhangolásában, a váratlan üzemi problémák előrejelzésében és az üzemeltetés hosszú távú optimalizálásában. Például ha egy szennyvíztisztító telepen a befolyó szennyvíz minősége hirtelen változik, a modellek segítségével gyorsan lehet számszerűsíteni, hogy milyen beavatkozásokra van szükség a rendszer stabilitásának fenntartásához.

Levegőztetési modell

Az oxigénbeoldódási modellek a levegőztető rendszerek működését írják le, főképpen az oxigén levegőből vízbe történő átadását. Az oxigén hatékony bevitele kritikus a biológiai szennyvíztisztítás szempontjából, mivel az aerob mikroorganizmusoknak oxigénre van szükségük a szennyezőanyag-lebontáshoz. Az oxigénbeoldódási sebességet befolyásoló legfontosabb tényezők közé tartozik a víz hőmérséklete, a szennyvíz összetétele, a levegőztető rendszer típusa és az alkalmazott diffúzorok tulajdonságai.¹⁰

A dinamikus modellek az időben változó folyamatokat írják le, így különösen hasznosak a szennyvíztisztító rendszerek valós idejű működésének szimulálásában és optimalizálásában. Ezek a modellek képesek figyelembe venni a szennyvíz összetételének, a hidraulikai feltételeknek és a környezeti tényezőknek az időbeli változásait, és ezáltal előrejelzéseket adni a rendszer teljesítményére vonatkozóan. Az oxigén beoldódásának dinamikus modellezése során például figyelembe vehetjük a szennyvízbe jutó szerves komponensek, felületaktív anyagok jelenlétét,

¹⁰ ASHLEY–MAVINIC–HALL 1992.

a mikroorganizmusok aktivitását, valamint a levegőztető rendszer beállításait. Az ilyen modellek lehetővé teszik az üzemeltetők számára, hogy gyorsan reagáljanak a változó körülményekre, például a hirtelen növekvő szennyezőanyagterhelésre, azáltal, hogy a körülményekhez adaptálva állítják be a levegőztetési intenzitást vagy a levegőztető berendezések működését.¹¹

A tervezés során az oxigénátadási modelleket a levegőztetési rendszer méretezésére és optimalizálására alkalmazzák, biztosítva, hogy a rendszer képes legyen a változó szennyvízterheléshez igazodni, eközben minimalizálva az energiafogyasztást.¹² Az üzemeltetés során ezek a modellek segítenek a rendszer monitorozásában és a beavatkozások időzítésében, hogy a szennyvíztisztítás – az üzembiztonságot is figyelembe véve – a leghatékonyabb módon valósuljon meg.

A vizsgált konténerrendszer bemutatása

Egy körülbelül 185 lakosegyenértéknek megfelelő terhelésű konténerrendszerre számítógépes modellt készítettünk, amely a Sumo1 üzemszintű biokinetikai modell felhasználásával részletesen körülírja a teljes szennyvíztisztítási folyamatot.¹³ Ez a konfiguráció szemléletesen ábrázolja az egyes műveleti egységeket, mint például a szennyvíz puffertartályát, a biológiai reaktorokat, az ülepítőt és az iszapvonalat. A 3.1. ábrán nyomon követhetők a különböző anyagáramok, beleértve a nyers szennyvíz beáramlását, az oxigénbevitelhez szükséges levegő bejuttatását, valamint a tisztított víz és a keletkező szennyvíziszap elvezetését.

Ezenkívül a matematikai modell lehetőséget biztosít a rendszer dinamikus viselkedésének elemzésére, például a terhelési csúcsok hatásának vizsgálatára vagy a különböző üzemeltetési stratégiák tesztelésére. Az anyagáramok pontos nyomon követése és a műveleti egységek közötti kapcsolatok részletes megjelenítése révén a modell lehetőséget ad az optimalizálási lehetőségek feltárására, ezáltal a rendszer teljesítményének intenzifikálására. Ez a modellkonfiguráció tehát kulcsfontosságú eszközként szolgálhat a konténerlétesítmény hatékony üzemeltetésének biztosításában, hozzájárulva a fenntartható és megbízható szennyvízkezeléshez. A modellkonfigurációt a Sumo22 szimulációs szoftverben fejlesztettük.

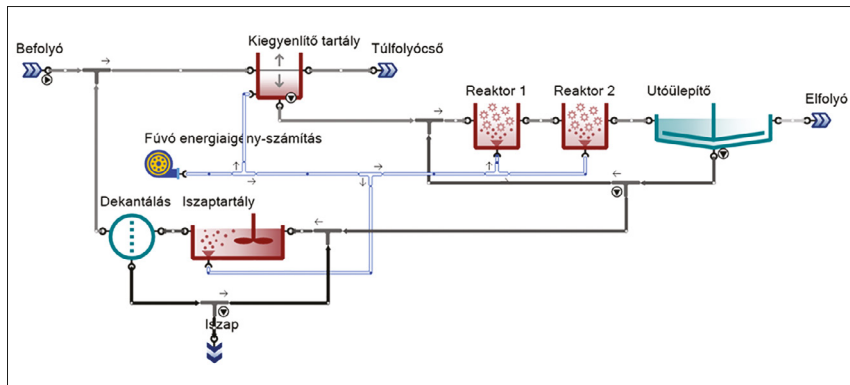
A technológiai séma a következő egységeket tartalmazza:

¹¹ BENCsik–TAKÁCS–ROSSO 2022.

¹² JIANG et al. 2017.

¹³ GAZSÓ et al. 2017.

1. *Befolyó*: a nyers szennyvizet betáplálják a rendszerbe, ahová egy befolyó vezetéken keresztül érkeznek.
2. *Kiegyenlítő tartály*: a beáramló szennyvíz először a kiegyenlítő tartályba kerül, amelynek szerepe az áramlás kiegyenlítése, azaz a hirtelen mennyiségi változások (például csúcsok) kiegyenlítése. Ezáltal biztosítja a stabilizált térfogatárammal való működtetést.
3. *Túlfolyócső*: biztonsági szempontból a kiegyenlítő tartályhoz túlfolyócső is kapcsolódik, amely megakadályozza a tartály túlsordulását abban az esetben, ha a befolyó szennyvíz mennyisége meghaladná a tartály kapacitását.
4. *Reaktor 1 és Reaktor 2*: a szennyvíz ezután a reaktorokba kerül, ahol a biológiai tisztítási folyamatok zajlanak. Bár a valóságban ez a művelet egy térben kialakított, a modellben a rendszert két külön teljesen elkevert biofilmes reaktorra osztjuk (Reaktor 1 és Reaktor 2). Ezekben a műveleti egységekben műanyag hordozók felületén megtelepedő mikroorganizmusok távolítják el a szennyvízben lévő szerves összetevőket és az ammóniát. A légbefúvást durva buborékos diffúzorok szolgáltatják.
5. *Utóülepítő*: a biológiai tisztítás után a szennyvíz az utóülepítőbe kerül, ahol a szilárd anyagok (iszap) leülepednek, és a megtisztított víz elfolyik a rendszerből. Ez a folyamat biztosítja, hogy az elfolyó víz lebegőanyagoktól mentesen kerüljön a környezetbe. A modellben ez egy egyszerűsített algebrai összefüggésre alapozott szeparátor, tehát a térfogatát és az iszap üledési tulajdonságait nem vesszük figyelembe.
6. *Iszaptartály dekantálással*: a rendszerben az iszapkezelést a kombinált iszapsűrítő egység biztosítja. Ez az iszaptartály fogadja a kiülepített fölösiszapot, és az aerob iszapstabilizációhoz levegőellátást igényel. A dekantálás során a fölösleges folyadékot elválasztja az iszaptól, a felülúszó iszapvizet pedig visszatáplálják a kiegyenlítő tartályba. A sűrített iszapot külön létesítményben tovább kezelik, például komposztálással vagy anaerob lebontással.
7. *A fűvő energiaigényének számítása*: a rendszer levegőztetése fűvő segítségével történik, amely biztosítja a szükséges oxigén bejuttatását a biológiai reaktorokba és az iszaptartályba, valamint pneumatikus keverés céljából a kiegyenlítő tartályba. Az energiaigény-kalkulátor a levegőztetési folyamat energiafogyasztásának meghatározását szolgálja, a rendszer működésének optimalizálhatósága céljából. A fűvőmodell ugyan képes összesíteni a teljes rendszer levegőszükségletét, de a tanulmány csak a vízvonalai fűvőkapa-citást veszi figyelembe.



3.1. ábra. A vizsgált konténertelep folyamatábrája

Forrás: a szerzők szerkesztése

A 3.1. táblázat a főbb műveleti egységek méreteit tartalmazza. A mozgóágyas, fixfilmes technológiát alkalmazó biológiai fokozatot a 2 reaktor együtteseként értelmezzük. A biofilmet hordozó töltet kitöltöttsége határozza meg, hogy a teljes egység térfogatát milyen arányban képviseli a hordozó, vagyis jelen esetben ez a hasznos térfogat 60%-ának felel meg.

3.1. táblázat. A vizsgált konténertelep
főbb tervezési paraméterei

	Kiegészítő medence	Reaktor 1	Reaktor 2	Iszaptartály	Mértékegység
Térfogat	21,9	11	11	11	m ³
Mélység	2	2	2	2	m
Biofilmhordozó- kitöltöttség		0,6	0,6		m ³ /m ³

Forrás: a szerzők szerkesztése

A tanulmány időben dinamikus modellkísérleteit úgynevezett *steady-state* állapotból futtatjuk, ami időben állandósult állapotot feltételez; a rendszer álfolyamatai stabilan működnek, változatlan bemeneti és kimeneti feltételekkel. Ez elméletben azt jelenti, hogy a szennyvízkezelés során a koncentrációk és az anyagáramok nem változnak az idő múlásával; ami lehetővé teszi a rendszer hosszú távú viselkedésének elemzését kvázi stabilizált üzemállapotból kiindulva.

A biológiai tisztítást a műanyag töltetek mentén kialakuló hártya felületén valósítják meg. A modellséma ugyan lehetőséget ad az ülepített iszap visszatáplálására is, azonban a folyamat tervezése alapján nincsen szükség eleveniszap fenntartására a reaktorokban, így a tanulmány is tükrözi ezt. A medencék levegőztetettek, így az aerob mikrobák számára szükséges oxigén biztosított, a megfelelő biodegradáció érdekében. Ugyanakkor a biofilm belső rétegeiben oxigénhiányos, vagyis anoxikus körülmények alakulhatnak ki, ami lehetőséget teremt szimultán denitrifikációra. Ez a folyamat lehetővé teszi a nitrácionok biológiai eltávolítását, amely a nitrifikáció mellékterméke, így hozzájárul a nitrogén eltávolításához a rendszerből.

Az iszaptartály kombinált dekantáló egységként is funkcionál, az iszap nagy hatásfokú kezelésére szolgál. Az aerob iszapstabilizáció érdekében a tartályban 2 mg/l oldott oxigén (DO) -koncentrációt tartanak fenn. Ez a koncentráció elegendő ahhoz, hogy a mikroorganizmusok hatékonyan stabilizálják az iszapot, miközben minimális szintre csökkenti a lebomlás során keletkező szagokat és egyéb problémákat. Megjegyzendő azonban, hogy a cikk nem foglalkozik részletesen az iszapvonalai levegőztetés tanulmányozásával, ehhez kapcsolódóan az oxigénellátás hatékonysága és optimalizálása egyéb források alapján vizsgálandó.

Eredmények

A vizsgált rendszer átlagos hidraulikai terhelése $38 \text{ m}^3/\text{d}$. A befolyó szerves- és növényitápanyag-terhelést – amely jellegzetes közép-európai szennyvízösszetételnek felel meg – a 3.2. táblázat foglalja össze. A konténerrendszer körülbelül 90%-os szervesanyag-eltávolítást és teljes nitrifikációt biztosít. Azonban az összes nitrogén koncentrációja csak mérsékelten csökken, a denitrifikáció csak részlegesen valósul meg, szimultán denitrifikáció útján, a biofilm belső rétegeiben. Az elemzések során átlagosan 15°C -os szennyvízhőmérséklettel számoltunk.

A 3.2. táblázat összegzi a tanulmány első modellkísérletének eredményeit is. Kiegyenlítő tartály alkalmazása nélkül közel 8%-kal nagyobb kapacitású fúvóra van szükség, ami nagyobb beruházási költséggel járhat. Az adatokat egy centralizált telep esetével hasonlítottuk össze; amelynél a stabilabb befolyó vízminőség és -mennyiség miatt kisebb a levegőigény ingadozása és az óracsúcs is. Az eloszlásokat a Sumo22 szoftver nyersszennyvíz-kalkulátorával generáltuk.

Megjegyezzük, hogy a 3.2. táblázatban szereplő értékek a nyers szennyvízre értelmezettek, nem tartalmazzák a koncentrációk változását a kiegyenlítő medencében. A centralizált telepre való fajlagosításnál nem növeltük meg a medence

3.2. táblázat. A nyers szennyvíz paraméterei,
az áramláskiegyenlítés hatása a szükséges fűvókacapacitásra

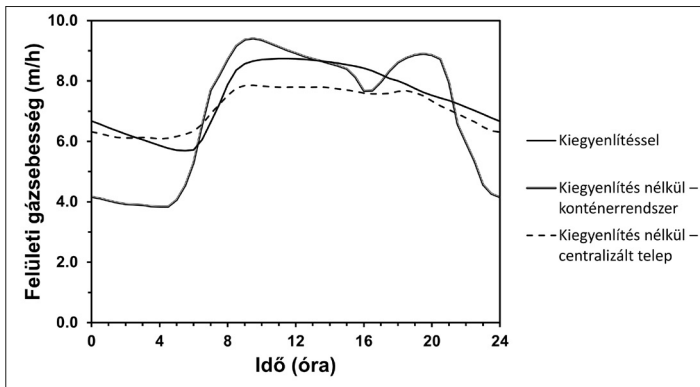
Paraméter	Kiegyenlítéssel			Kiegyenlítés nélkül – konténer			Kiegyenlítés nélkül – centralizált			Mértékegység
	Átlag	Min.	Max.	Átlag	Min.	Max.	Átlag	Min.	Max.	
Térfogat- áram	37,9			37,9	2,3	96,4	37854	33408	45166	m ³ /d
Kémiai oxigénigény	675	435	1052	675	435	1052	675	504	944	mg/l
Biokémiai oxigénigény	294	190	459	294	190	459	294	220	412	mg/l
Összes nitrogén	45	28	78	45	28	78	45	32	70	mg/l
Összes foszfor	5	3,1	7,2	5	3,1	7,2	5	4,5	5,6	mg/l
Fűvókapa- citás-igény			1,2			1,29			1076	kW
Fajlagos fűvókacapacitás			2,6			2,8			2,3	kWh/kg _{BOI}

Forrás: a szerzők szerkesztése

mélységét, illetve konstans fűvóteljesítményt feltételeztünk, nem foglalkoztunk a léptéknöveléssel járó teljesítmény-jelleggörbe eltéréseivel.

A szennyvíztelepek levegőztető rendszereinél a felületi gázsebesség kulcsfontosságú paraméter, mivel közvetlen hatással van az oxigénátadás hatékonyságára, a szennyvíztisztítás eredményességére és a rendszer energiafogyasztására. Az oxigénátadás hatékonysága nagyban függ a gázsebességtől, mivel, ha az túl alacsony, a rendszer nem képes elegendő oxigént bejuttatni a szennyvízbe, ami rontja a tisztítási folyamatot. Emellett az optimális felületi gázsebesség csökkenti az energiafogyasztást, hiszen megfelelő beállítás mellett kevesebb energia szükséges az ideális oxigénellátás biztosításához.¹⁴ Továbbá, a túl nagy értékű gázsebességek habképződéshez vezethetnek, ami problémákat okozhat a rendszer működésében, például szivattyúk eltömődésével vagy túlfolyásokkal. A megfelelő gázsebesség fenntartása segít minimalizálni a habképződést, biztosítja a megfelelő keveredést és megelőzi az iszap leülepedését, ezáltal stabilabbá téve a szennyvízkezelési folyamatot.

¹⁴ ZHANG et al. 2023.

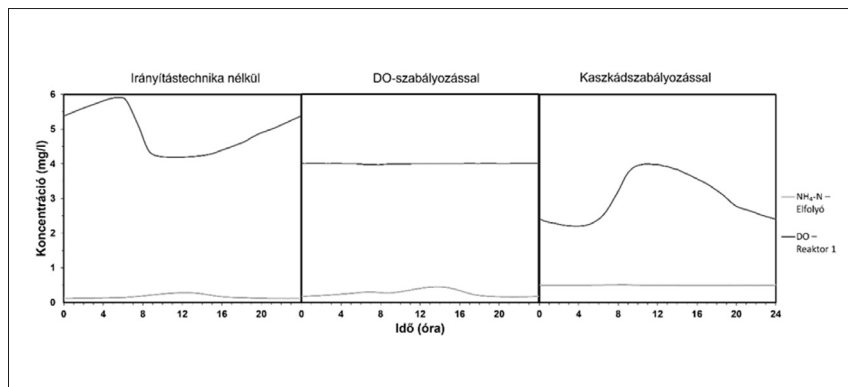


3.2. ábra. A felületi gázsebesség változása a nap folyamán

Forrás: a szerzők szerkesztése

Három szimulációs scenáriót futtattunk, amelyek során vizsgáltuk a felületi gázsebesség változását a konténertelepen, kiegyenlítő medence alkalmazásával és anélkül, valamint összevetettük ezeket egy kiegyenlítés nélküli centralizált teleppel (3.2. ábra). A napi terhelésingadozás függvényében előre jeleztük a levegőfogyasztási profilokat (az 1. reaktorcella oldottoxigén-koncentrációjának szabályozása mellett). A reggeli csúcsvízfogyasztási időszakban mindhárom esetben hirtelen megemelkedik a felületi gázsebesség. A kiegyenlítő medence használatával a csúcsok valamelyest mérsékelhetők, azonban a konténertelep mint decentralizált megoldás nagyobb ingadozásoknak van kitéve; fajlagosan nagyobb maximális teljesítményű fűvót igényel. A 3.2. táblázatra visszatekintve, a puffertartály hiánya akár 8%-kal növelheti a maximális teljesítményszükségletet. Az esti órákban hasonló trend szerint a görbe jobban visszaesik.

A szennyvíztisztításban a DO (*dissolved oxygen*, azaz oldott oxigén) -szabályozású levegőztetés alapvető módszer az oxigénkoncentráció fenntartására a biológiai folyamatok megfelelő hatékonyságának biztosítása érdekében. Az oldottoxigén-szint megfelelő szabályozása kulcsfontosságú, mivel a mikroorganizmusok optimális működéséhez szükséges oxigénellátást biztosítja, ami a szén- és nitrogénvegyületek aerob lebontásához elengedhetetlen. A kaszkádszabályozás fejlettebb megközelítés, amely a hagyományos DO-szabályozásnál precízebb vezérlést tesz lehetővé. Ebben a folyamatirányítási rendszerben a levegőztetést több lépcsőben, egymásra épülő szabályozók segítségével vezérlik, gyorsabban és pontosabban reagálva a rendszer dinamikus változásaira, például terhelésbeli ingadozásaira.



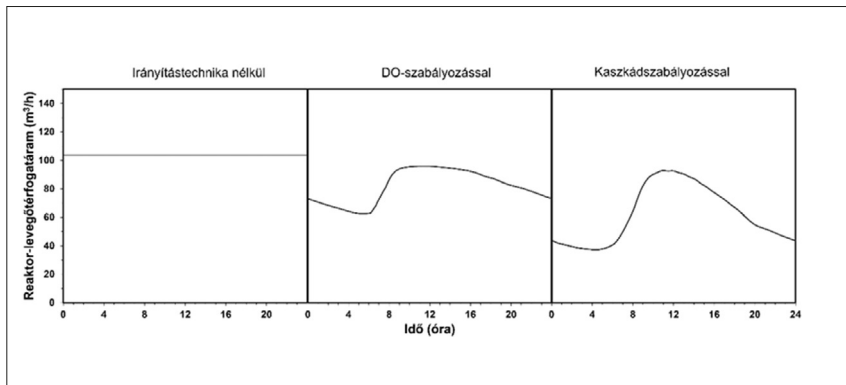
3.3. ábra. Levegőtérfigatáram-profilok különböző levegőztetési stratégiák alkalmazásával

Forrás: a szerzők szerkesztése

Az ammóniavezérelt szabályozás a fentebb említett DO-szabályozás továbbfejlesztett változata, amely a biológiai folyamatokat nemcsak az oldott oxigén szintjének, hanem az ammóniakoncentrációnak a figyelembevételével is optimalizálja. Ez a megközelítés lehetővé teszi a nitrifikációs folyamat pontosabb ellenőrzését, mivel az ammóniaszint közvetlenül befolyásolja a nitrifikáló baktériumok aktivitását.¹⁵ Ammóniavezérelt kaszkádkapcsolás esetében a rendszer képes automatikusan változtatni a DO-célértéket annak érdekében, hogy az ammónia koncentrációja a kívánt tartományban maradjon, hatékonyabbá téve a szennyvízkezelést és csökkentve az energiafogyasztást. Ez a módszer különösen hasznos a nagyobb ammóniaterhelésű rendszerekben, ahol a hagyományos DO-szabályozás önmagában nem lenne elég hatékony.

A tanulmány másik vizsgált modellkísérlete alapján a 3.3. ábra azt szemlélteti, hogy a reaktor levegőztetéséhez mekkora léghozam szükséges (kiegyenlített vízhozammal történő terhelés esetén). Ha a fűvő nincsen ellátva frekvenciaszabályozással, nincs kiépítve irányítástechnika, akkor a napi terhelésingadozástól függetlenül konstans frekvenciaértéken üzemel a kompresszor; azaz méretezés szerinti maximális teljesítményen, hogy a napi csúcsgigényt is fedezze. Az első reaktorcella végén elhelyezett DO-szonda felhasználásával oldotttoxigénszint-szabályozással csupán a csúcsterheléses időszakban növekszik meg a levegőigény,

¹⁵ LIU–Yoo 2016.



3.4. ábra. Ammónium- és DO-koncentráció különböző levegőztetési stratégiák alkalmazásával
 Forrás: a szerzők szerkesztése

de akkor sem annyira, mint az irányítástechnika nélküli modellváltozatban. A tisztított vízben monitorozott ammóniakoncentráción alapuló kaskádkapcsolással tovább lehet finomítani a levegőztetési stratégiát, és főleg csak akkor szükséges növelni az alkalmazott levegőmennyiséget, amikor a nitrifikációhoz szükséges oxigénigény növekszik – ehhez képest a másik két scenárió bizonyos mértékű túlvegőztetéssel jár. A görbe alatti területek arányosak a levegőztetéshez szükséges energiamennyiséggel, és a 3.3. ábrán megfigyelhető, hogy a legnagyobb megtakarítás a kaskádszabályozással érhető el.

Ha ezzel párhuzamosan az ammónium- és oldottoxigén-koncentrációkat tanulmányozzuk (3.4. ábra), akkor láthatjuk, hogy a legnagyobb minőségbeli ingadozással az irányítástechnika nélküli változat jár. Csúcsterheléses időszakban jelentősen lecsökkenhet a rendelkezésre álló oldott oxigén, a DO csökkenésével viszont az oxigéntranszport sebessége az oldott fázis és a mikroorganizmus-sejtek között csökken, ezért az elfolyó ammóniumkoncentráció is növekszik. Az elfolyó vízben szükségtelenül magas 4–6 mg/l DO-koncentrációt tapasztalunk. DO-szabályozással 4 mg/l koncentrációjú elfolyó DO mellett jóval kevesebb, mint 1 mg/l ammóniumkoncentrációt mérhetünk. Emellett a kaskádszabályozás – az ammónium-nitrogén 4 mg/l koncentrációjú célértéken tartásával – lehetővé teszi a stabil üzemeltetést, és kisebb energiaigénnyel is jár. A megvalósításhoz fontos a matematikai szabályzó tagok finomhangolása, azonban a helytelen hangolás hatása jelen kutatás tárgyát nem képezte.

3.3. táblázat. Az egyes szabályozási stratégiák főbb paramétereit

Paraméter	Irányítás- technika nélkül	DO-szabályozással	Kaskád- szabályozással	Mértékegység
Átlagos DO – Reaktor 1	4,9	4	3	mg/l
Átlagos elfolyó NH ₄ -N	0,17	0,27	0,5	mg/l
Átlagos vízvonali léghozam	103,7	81,7	62	m ³ /h
A fűtő energia- szükséglete	31,1	24,5	18,6	kWh
Energiaköltség- megtakarítás		21%	40%	

Forrás: a szerzők szerkesztése

Összesítve tehát irányítástechnika nélkül nincsen frekvenciaszabályozás, maximális teljesítményen üzemeltetjük a fűtőt, és ez jelentősen túllegeőzteti a biológiát. Ezzel szemben DO-szabályozással megtakarítható 21% levegőztetéssel járó energiaköltség a vízvonalon, kaskádszabályozással pedig célértéken tartjuk a tisztított víz ammóniakoncentrációját, és ez optimális oxigénszint-szabályozás által akár 40% költségmegtakarítást jelent (3.3. táblázat).

Összefoglalás

A konténerizált szennyvíztisztító rendszerek hasznos infrastruktúra-elemeit képezhetik katonai táboroknak, ahol a gyors és hatékony szennyvízkezelés elengedhetetlen. Ezek a mobilis, könnyen telepíthető rendszerek lehetővé teszik a szennyvíz nagy hatásfokú tisztítását, majd annak visszavezetését a környezetbe. Az ilyen rendszerek folyamatainak méretezése és optimalizálása érdekében anyagáram-modelleket állítanak össze, amelyekkel a levegőztetési igény minimalizálható. A modellek képesek figyelembe venni a dinamikus oxigénbeoldódási hatékonyságot és szimulálni a változó szennyvízminőséghez alkalmazkodó stratégiákat, amelyek végső soron a telepek költséghatékonyságát növelik.

A modellezési tanulmány során a szerzők három különböző számítási szcenáriót vizsgáltak, hogy meghatározzák a felületi gázsebesség változásait egy

konténertelepen, mind kiegyenlítő medence használatával, mind anélkül. Az eredmények azt mutatták, hogy a reggeli csúcsvízfogyasztás idején mindhárom esetben hirtelen megemelkedik a felületi gázsebesség, de kiegyenlítő medence alkalmazásával a csúcsok mérsékelhetők. Ugyanakkor a konténertelep mint decentralizált megoldás nagyobb ingadozásoknak van kitéve, különösen az esti órákban, amikor a léghezamprofil szintén jobban visszaesik. A puffertartály hiánya akár 8%-kal növelheti a maximális teljesítményszükségletet, amely potenciálisan nagyobb beruházási költséget von maga után.

A második modellkísérlet rámutat, hogy a reaktor levegőztetéséhez szükséges térfogatáram dinamikus beállításához a DO-szabályozás jelentős előnyökkel jár. Ha a levegőztető rendszer nem rendelkezik frekvenciaváltókkal és irányítástechnikával, akkor a kompresszort állandó teljesítményértékre állítják be, amely lefedi a napi csúcsterhelést, ez viszont energiaigényes. DO-szabályozás alkalmazásával a levegőigény csak a csúcsterhelés idején növekszik, és akkor sem olyan mértékben, mint irányítástechnika nélküli esetben. A kaszkádszabályozás tovább finomítja ezt a stratégiát, biztosítva, hogy a levegő mennyiségét főként akkor növeljék, amikor a nitrifikációhoz szükséges oxigénigény megemelkedik, ami stabilabb üzemeltetést és kevesebb energiafelhasználást eredményez. A szimulációk alapján DO-szabályozással megtakarítható 21% levegőztetéssel járó energiaköltség a vízvonalon, kaszkádszabályozással pedig céltérteken tartható a tisztított víz ammóniakoncentrációja, és ez optimális oxigénszint-szabályozás által akár 40% költségmegtakarítást jelent. Az ilyen rendszerek hatékonyságát meghatározza a szabályozó paraméterek szakszerű finomhangolása, amely azonban még további kutatást igényel. Ezen túlmenően a szerzők membrán-bioreaktor típusú, valamint kötöttágyas és mozgótöltetes technológiák energetikai összehasonlítását is tervezik megvalósítani jövőbeli tanulmányok keretében.

Felhasznált irodalom

- ASHLEY, Kenneth I. – MAVINIC, Donald S. – HALL, Kenneth J. (1992): Bench-Scale Study of Oxygen Transfer in Coarse Bubble Diffused Aeration. *Water Research*, 26(10), 1289–1295. Online: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(92\)90123-L](https://doi.org/10.1016/0043-1354(92)90123-L)
- BENCsik, Dániel – TAKÁCS, Imre – ROSSO, Diego (2022): Dynamic Alpha Factors: Prediction in Time and Evolution Along Reactors. *Water Research*, 216, 118339. Online: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118339>
- CZAKÓ Levente – KARCHES Tamás (2019): Decentralizált szennyvíztisztítás szerepe a települési vízgazdálkodásban. *Hadmérnök*, 14(1), 72–79. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.1.7>

- 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>
- INSEL, Güçlü et al. (2002): Important Limitations in the Modeling of Activated Sludge: Biased Calibration of the Hydrolysis Process. *Water Science and Technology*, 45(12), 23–36. Online: <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0406>
- JIANG, Lu-Man et al. (2017): Modelling Oxygen Transfer Using Dynamic Alpha Factors. *Water Research*, 124, 139–148. Online: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.032>
- KARCHES Tamás – PAPP Tamás (2018): Egyedi szennyvíztisztító kisberendezés alkalmazhatóságának bemutatása. *Műszaki Katonai Közlöny*, 28(4), 158–163. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/1536>
- LIU, Hongbin – Yoo, ChangKyoo (2016): Cascade Control of Effluent Nitrate and Ammonium in an Activated Sludge Process. *Desalination and Water Treatment*, 57(45), 21253–21263. Online: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1119741>
- MEDINA, Victor F. – WAISNER, Scott A. (2011): Chapter 25: Military Solid and Hazardous Wastes – Assessment of Issues at Military Facilities and Base Camps. In LETCHER, Trevor M. – VALLERO, Daniel A. (szerk.): *Waste. A Handbook for Management*. Amsterdam – Boston – Heidelberg – London – New York – Oxford – Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo: Academic Press, 357–376. Online: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381475-3.10025-7>
- NOVOTNY, Vladimir (2008): Sustainable Urban Water Management. In FEYEN, Jan – SHANNON, Kelly – NEVILLE, Matthew (szerk.): *Water and Urban Development Paradigms*. London: CRC Press, 19–31.
- OBAIDEEN, Khaled et al. (2022): The Role of Wastewater Treatment in Achieving Sustainable Development Goals (SDGs) and Sustainability Guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. Online: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- RIEGER, Leiv et al. (2006): Modelling of Aeration Systems at Wastewater Treatment Plants. *Water Science and Technology*, 53(4–5), 439–447. Online: <https://doi.org/10.2166/wst.2006.100>
- VAN LOOSDRECHT, Mark C. M. et al. (2015): Twenty-Five Years of ASM1: Past, Present and Future of Wastewater Treatment Modelling. *Journal of Hydroinformatics*, 17(5), 697–718. Online: <https://doi.org/10.2166/hydro.2015.006>
- ZHANG, Bing et al. (2023): Effect of Superficial Gas Velocity on Membrane Fouling Behavior and Evolution During Municipal Wastewater Treatment. *Separation and Purification Technology*, 315, 123665. Online: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123665>