

Digitális technológiák alkalmazása az egészségügyi hulladékok kezelésében az antimikrobás rezisztencia visszaszorítása érdekében

Application of digital technologies in healthcare waste management to mitigate antimicrobial resistance

Farkas Szilvia^{1,2} ✉, Aszalós Zoltán Albert^{1,2}, Lakatos Botond^{3,4}

¹Magyar Egészségügyi Menedzsment Társaság

²Semmelweis Egyetem Egészségügyi Közzolgálati Kar Egészségügyi Menedzserképző Központ

³Semmelweis Egyetem Belgyógyászati és Hematológiai Klinika, Infektológiai Tanszéki Csoport

⁴Dél-pesti Centrumkórház, Országos Hematológiai és Infektológiai Intézet

✉ farkas.szilvia@memt.hu

Az antimikrobás rezisztencia (AMR) világméretű és egyre fokozódó közegészségügyi probléma, naponta ezrek halnak meg kezelésre nem reagáló fertőzésekben. Az előrejelzések szerint 2050-re a rezisztens kórokozók több halálesetet okoznak majd, mint a hemato-onkológiai malignitások. Éppen ezért sürgős, hatékony fellépés szükséges, minden lehetséges módon és eszközzel.

Az egészségügyben hagyományosan az antimikrobás szerek megfelelő alkalmazása és annak felügyelete, az antimikrobás stewardship összpontosít az AMR kezelésére, de emellett az egészségügyi hulladék megfelelő kezelése is elősegíti az AMR terjedésének visszaszorítását. A kórházi hulladékokban található fertőző anyagok és rezisztens baktériumtörzsek kórházi eredetű (nosocomialis) fertőzések forrásai lehetnek, ha pedig kijutnak a természeti környezetbe, a környezeti mikrobák révén a rezisztenciagének tovább terjedhetnek, és a táplálkozási hálózaton keresztül rezisztens mikroorganizmusok jutnak vissza az emberekhez.

Még a szigorúan zárt rendszerben kezelt és égetéssel ártalmatlanított egészségügyi hulladék esetén is – a magyarországi jogszabályoknak megfelelő eljárások mellett – a digitális technológiák alkalmazása tovább növeli a biztonságot, javítja az átláthatóságot, biztosítja a nyomon követhetőséget, és hozzájárul a hatékony antimikrobás rezisztencia (AMR) elleni stratégiák megvalósításához. Ezek az eszközök nemcsak az adatkezelési és logisztikai folyamatokat támogatják, hanem a hulladékkezelés teljes életciklusa során segítenek az intézményi megfelelésben is.

Cikkünk célja, hogy bemutassa a jelenleg elérhető és fejlesztés alatt álló digitális technológiákat, valamint azok előnyeit az egészségügyi hulladék kezelésében.

A módszertan alapját szisztematikus szakirodalomkutatás képezte a PubMed adatbázisban, kiegészítve releváns iparági és intézményi dokumentumok elemzésével. A vizsgált források alapján három fő technológiai irány azonosítható: az IoT (Internet of Things – a dolgok internete: szenzorok és nyomon követés), a blokklánc (átláthatóság és adatbiztonság) és a mesterséges intelligencia (folyamatoptimalizálás és prediktív elemzések).

Magyarországon a digitális technológiák elsősorban a diagnosztika és a kezelés terén terjedtek el, míg a hulladékkezelés digitalizációjára eddig kevés példa van. Az általános hulladékgazdálkodásban azonban már elérhetők olyan megoldások (pl. okoskukák, RFID-alapú nyomon követés), amelyek adaptálhatók az egészségügy igényeire, és amelyekhez az EU Horizon Europe programja finanszírozási keretet is kínál.

Cikkünk az Európai Unió által szakmailag és anyagiilag támogatott AMR EDUCare projekt (www.amreducare.eu) „Antimikrobás hulladékok kezelése az egészségügyben” című kurzusára támaszkodik.

Kulcsszavak: antimikrobás rezisztencia (AMR), egészségügyi hulladékok kezelése, digitális technológiák

Antimicrobial resistance (AMR) is a global and increasingly severe public health issue, causing thousands of deaths daily due to infections that no longer respond to treatment. Projections indicate that by 2050, resistant pathogens will cause more deaths than haemato-oncologic malignancies. Therefore, urgent and effective action is required using all possible means and tools.

Traditionally, healthcare efforts to combat AMR focus on the appropriate use and supervision of antimicrobial agents, known as antimicrobial stewardship. However, the proper management of healthcare waste also plays a crucial role in limiting the spread of AMR. Infectious agents and resistant bacterial strains found in hospital waste can be sources of hospital-acquired (nosocomial) infections, and if released into the natural environment, resistance genes can be further spread via environmental microbes, and resistant microorganisms can be returned to humans through the food chain.

Even in the case of strictly contained and incinerated medical waste – in full compliance with Hungarian regulations – the use of digital technologies further enhances safety, improves transparency, ensures traceability, and contributes to the effective implementation of antimicrobial resistance (AMR) strategies. These tools not only support data management and logistics but also assist with institutional comp-

liance throughout the entire waste management life cycle.

The aim of our article is to present the currently available and under development digital technologies and their benefits in healthcare waste management. A systematic literature search was performed primarily in the PubMed database, supplemented by an analysis of relevant industry and institutional documents.

The methodology was based on a systematic literature review conducted in the PubMed database, complemented by the analysis of relevant industrial and institutional documents. Based on the reviewed sources, three main technological directions were identified: IoT (sensors and tracking), blockchain (transparency and data security), and artificial intelligence (process optimization and predictive analytics).

In Hungary, digital technologies have spread primarily in the fields of diagnostics and treatment, while there are few examples of the digitalization of waste management. However, solutions already implemented in general waste management (e.g., smart bins, RFID-based tracking) could be adapted to the specific needs of healthcare. The EU Horizon Europe program also provides a funding framework for such innovative approaches.

Our article is based on the course “Antimicrobial waste minimisation and management”, developed within the EU-supported AMR EDUCare project (www.amredu-care.eu).

Keywords: antimicrobial resistance (AMR), healthcare waste management, digital technologies

BEVEZETÉS

Mi az AMR és miért jelent problémát?

Az antimikrobás rezisztencia (AMR) a mikrobák ellenállóképességét jelenti az ellenük kifejlesztett antimikrobás szerekkel szemben. A rezisztencia kialakulása és terjedése természetes folyamat, melyet csak lassítani lehet [1].

Az antibiotikum-kezelés szelekciós nyomást fejt ki a baktériumokra: a rezisztens törzsek túlélnek és tovább szaporodnak. A kialakult rezisztencia pedig a különböző mobilis genetikai elemeken keresztül terjedhet: a baktériumok át tudják adni egymásnak a rezisztenciagéneket horizontális géntranszfer révén [2].

A rezisztens baktériumok okozta fertőzések kezelése kihívást jelent az egészségügyi ellátórendszer számára, fokozott veszélyt jelent az immunszupprimált betegekre, újszülöttekre, vagy épp az idős személyekre. Súlyos egészségromlást, maradandó károsodásokat okozhat korábban egészséges életmódot folytató személyeknél is. Ez sokáig láthatatlanul zajlott a nagyközönség számára, mígnem a WHO 2024-ben elindította az „AMR is invisible, I am not” [Az AMR láthatatlan, én nem] kampányt, amelynek keretében túlélők, illetve elhunyt betegek hozzátartozói osztják meg személyes

tapasztalataikat [3]. A kezdeményezés célja a figyelemfelhívás és a társadalmi érzékenyítés, amely várhatóan hozzájárul a lakossági tudatosság erősödéséhez, és hosszú távon elősegítheti az egészségügyi erőforrások hatékonyabb, célzottabb felhasználását.

Hogyan járul hozzá az egészségügyi hulladék az AMR-hez?

A kórházi hulladékokban található fertőző anyagok és rezisztens baktériumtörzsek révén könnyen kialakulhatnak kórházi eredetű (nosocomialis) fertőzések, amelyek fokozott veszélyt jelentenek az érzékeny betegpopulációra. Az egészségügyi hulladékban található rezisztens baktériumok és antibiotikum-maradványok, ha nem megfelelően kezelik és ártalmatlanítják őket, kijuthatnak a természeti környezetbe, például a talajba és a felszíni vagy felszín alatti vizekbe is [4].

A környezetbe kikerülő rezisztens baktériumok képesek rezisztenciagénjeiket átadni a természetben élő mikrobaközösségek tagjainak horizontális géntranszfer révén, ami jelentős mértékben gyorsítja az antibiotikum-rezisztencia terjedését [4]. Az így létrejövő rezervoárokból származó rezisztens kórokozók különböző átviteli utak – például közvetlen érintkezés, víz, illetve az élelmiszerlánc – révén juthatnak el az emberhez [5].

Nem tartozik az egészségügyi hulladék kategóriájába, de fontos kiemelni, hogy az elfogyasztott antibiotikumok egy része változatlan (aktív) formában ürül ki a szervezetből a vizelettel [6], és a szennyvízrendszerbe, majd a szennyvíztisztítóba kerül. A jelenlegi szennyvíztisztító technológia nem képes teljesen eltávolítani az antibiotikum-rezisztens baktériumokat, így azok kijutnak az élővízbe [7]. Eerre speciális, kórházban működő szennyvízkezelő rendszerek jelenthetnek megoldást, melyek kifejezetten a gyógyszermaradványok – köztük az antibiotikumok – eltávolítására irányulnak. Az eljárás hagyományos biológiai tisztítási módszerek, aktívszenes szűrés, membrán bioreaktorok (MBR), ózonizáció és UV-kezelés kombinációjából áll [8].

Az egészségügyi hulladékok kezelésének kihívásai

Az egészségügyi hulladékok kezelése összetett, több szakterületet átfogó feladat, amely számos környezeti, egészségügyi és jogi kockázatot rejt magában. Az egyik legnagyobb kihívást a hulladék útjának nyomon követése jelenti a keletkezési ponttól az ártalmatlanításig. A transzparens és hiteles nyilvántartás hiánya fokozza az illegális lerakás és a nem megfelelő kezelés kockázatát [9].

A hulladék megfelelő szeparációja kulcsfontosságú, hiszen a különböző típusú hulladékok – például fertőző, vegyi vagy gyógyszermaradványokat tartalmazó anyagok – eltérő kezelési eljárásokat igényelnek. A nem megfelelő osztályozás csökkenti a kezelés hatékonyságát, valamint közegészségügyi és környezeti veszélyforrás lehet [10].

További kihívás a szabályozási környezethez való alkalmazkodás: az Európai Unióban a tagállamoknak harmonizálniuk kell saját hulladékgazdálkodási rendszerüket az uniós előírásokkal [11].

Forrás	Keresőszavak, kulcsszavak	Megjegyzések
PubMed	"digital" AND "waste management" AND "health"	Absztraktok elemzése, releváns cikkek kiválasztása
Google Scholar	"digital waste management"	Tudományos közlemények keresése
Google	"digital waste management"	Szürke irodalom és multidiszciplináris források
Egyetemi források	Semmelweis Egyetem hulladékkezelési utasítása	Intézményi előírások
Iparági weboldalak	Chainway Hungary, MOL Hulladékgazdálkodási Zrt.	Digitális technológiák és szolgáltatók bemutatása
EU jogszabályok	Az EU hulladékgazdálkodási keretirányelve és kapcsolódó jogszabályok	Jogszabályi háttér elemzése

1. táblázat
Szakirodalom-keresési stratégia (saját szerkesztés)

Az infrastruktúra fejlesztését igényli a keletkező egészségügyi hulladék mennyiségének növekedése is, járványhelyzet esetén (pl. COVID-19) ez különösen nagy terhet jelenthet a hulladékgazdálkodási rendszerek számára.

E kihívások együttesen sürgetik a modern, digitális megoldások alkalmazását, amelyek javíthatják a hulladékgazdálkodás megfelelőségét, hatékonyságát, átláthatóságát.

CÉLKITŰZÉS

Célunk az olyan digitális technológiák és innovatív megoldások feltérképezése és összefoglalása, amelyek az egészségügyi eredetű – antibiotikum-rezisztens kórokozókat is tartalmazó – hulladékkezelés hatékonyságát növelhetik. Vizsgálatunk arra irányult, hogy azonosítsuk ezen technológiák fejlettségi szintjét, gyakorlati alkalmazhatóságát, példákat kerestünk azokra az egészségügyi intézményekre, akik ezeket már bevezették. A cél, hogy képet kapjunk arról, miként járulhatnak hozzá a digitális technológiák a hulladékgazdálkodás hatékonyságához, átláthatóságához és biztonságához.

ADATOK ÉS MÓDSZEREK

A szakirodalom keresését 2025.05.01. és 2025.06.30. között végeztük különböző adatbázisokban és forrásokban az 1. táblázatban látható stratégia szerint.

EREDMÉNYEK

A PubMed szakirodalom-adatbázisban a „digital” AND „waste management” keresőszavakkal 151 találat jelent meg. Keresésünket a „health” kulcsszóra szűkítve 27 találat absztraktját tanulmányoztuk, ezek közül a kutatáshoz szorosan kapcsolódó 4 cikket dolgoztuk fel részletesen.

Ezzel szemben a Google keresőben és a Google Scholar adatbázisban a keresésünk a fenti keresőszavakra jelentősen több találatot eredményezett, azonban a pontos találat-szám nem volt elérhető vagy nem volt egyértelműen értel-

mezhető a találatok sokfélesége miatt. Ezért a további források esetében csak a szigorúan releváns dokumentumokat válogattuk be az elemzésbe.

MEGBESZÉLÉS

Kutatásunk során az alábbi technológiákat azonosítottuk, amelyek megfelelő felhasználása előremozdíthatja a helyes és fenntartható korszerű hulladékkezelési technológiákat: IoT eszközök (Internet of Things), blokklánc-technológia és mesterséges intelligencia által vezérelt eszközök (2. táblázat).

Az egészségügyi hulladékok kezelésében alkalmazható digitális technológiák

Internet of Things – IoT-eszközök – A dolgok internete – Eszközök internetes hálózata

Az IoT egy olyan összetett rendszer, amelyben különböző – fizikai vagy virtuális eszközök – képesek adatokat gyűjteni, megosztani és intelligens módon reagálni hálózaton keresztül [12].

Ez a technológia az egészségügyi hulladékok kezelésében is hasznosítható, hiszen lehetővé teszi azok nyomon követését és állapotuk valós idejű ellenőrzését. Az IoT-alapú technológia révén azonosíthatók a hulladékok jellemzői, valamint kialakíthatók a hulladék és az informatikai rendszerek közötti kommunikációs csatornák [13].

Az IoT-rendszerek képesek valós időben érzékelni és nyomon követni a keletkező egészségügyi hulladék mennyiségét, típusát és tárolási állapotát. Az intelligens szenzorok – például ultrahangos érzékelők – a hulladékgyűjtő edények töltöttségi szintjét mérik, és automatikus értesítéseket küldenek, amikor azok elérik a meghatározott kapacitási küszöbértéket [13-15], így lehetővé teszik a túlsordulás megelőzését.

Az IoT-technológia az automatizált hulladékosztályozást is lehetővé teszi. Színkódolt kukák használatát (pl. sárga: műanyag, piros: veszélyes, kék: újrahasznosítható anyagok) kameramodulokkal és képfelismerő rendszerekkel kombi-

Digitális technológia	Alkalmazási terület az egészségügyi hulladék kezelésében	Előnyök
IoT (Internet of Things)	Szenzorokkal ellátott hulladékgyűjtő konténerek valós idejű monitorozása, hulladékgyűjtés ütemezésének optimalizálása	Hatékonyabb és biztonságosabb hulladékgyűjtés, átláthatóság, követhetőség
Blokklánc	Hulladék nyomon követése a teljes életciklus során, átláthatóság és elszámoltathatóság biztosítása	Biztonságos, megmásíthatatlan adatkezelés, átláthatóság, csalásmegelőzés
(MI) Mesterséges Intelligencia	Prediktív modellezés a hulladék mennyiségének előrejelzésére, hulladéktípusok azonosítása, folyamatok optimalizálása, döntéstámogatás	Hatékony erőforrás-kiosztás, költségsökkentés, hulladék mennyiségének csökkentése, adminisztratív feladatok egyszerűsítése

2. táblázat

Az új, innovatív technológiák alkalmazási lehetőségei és előnyei (saját szerkesztés)

nálva lehetséges automatikusan azonosítani és a megfelelő kategóriába sorolni a hulladékot [14,15].

Az IoT-rendszerek képesek valós időben érzékelni a hulladék tárolási állapotát, hőmérsékletét, esetleges károsodását vagy pl. veszélyes gázok jelenlétét. A beépített gázérzékelők és riasztások segítségével időben megelőzhetők a balesetek [14,16]. A GSM-modulok révén akár SMS-értesítések is küldhetők a karbantartó személyzetnek [14].

A hulladék életciklusának követése szintén megvalósítható RFID- (Radio Frequency Identification – rádiófrekvenciás azonosítás) technológiával. Az RFID-címkével ellátott hulladékzsákok lehetővé teszik a hulladék útjának dokumentálását a keletkezés helyétől egészen az ártalmatlanításig [14,15]. Ez nemcsak a nyomon követhetőséget biztosítja, hanem elősegíti az egészségügyi és környezetvédelmi szabályozások betartását is [14,15].

Az IoT-alapú rendszerek továbbá integrálhatók felhőplatformokkal, ahol a szenzoroktól érkező adatokat tárolják, feldolgozzák és vizualizálják. Ez lehetővé teszi az adatok valós idejű elemzését és a hulladékkezelés hatékonyságának értékelését [15].

Blockchain (blokklánc) technológia

A blockchain technológia elsődleges alkalmazási területe a kriptovaluták, különösen a Bitcoin volt. A Bitcoin 2009-es megjelenése óta a blockchain mint decentralizált főkönyv lehetővé tette a biztonságos, átlátható tranzakciókat. Azonban számos más területen is használható, például az egészségügyben, ahol lehetőséget biztosít a betegadatok biztonságos tárolására és megosztására [17]. Alkalmazzák a logisztikában is, ahol nyomon követhetőséget és átláthatóságot biztosít a szállítmányozási folyamatokban [18].

A blokkláncban minden blokk tartalmaz egy kriptográfiai hash-t, amely az adott blokk adatainak lenyomataként szolgál. Ezek matematikai algoritmusok, amelyek egy tetszőleges hosszúságú adatot egy rögzített méretű karakterláncá alakítanak át. Ez a hash érték biztosítja az adatok integritását és hitelességét, mivel bármilyen változtatás a bemeneti adaton megváltoztatja a kimeneti hash-t is. Ezen kívül minden blokk hivatkozik az előző blokk hash-ére is, így létrejön a blokkok láncolata. Ez a struktúra garantálja, hogy ha valaki

megpróbálja módosítani az egyik blokk adatait, az összes következő blokk érvénytelenné válik [19].

Az IoT-rendszerekből származó adatok a blokklánc-technológiával párosítva biztonságos, átlátható és megváltoztathatatlan nyilvántartást nyújtanak a hulladékot termelő tevékenységekről. Az egészségügyi hulladék életciklusa a keletkezéstől a végső ártalmatlanításig nyomon követhető, biztosítva a szabályozásnak való megfelelést. Az egészségügyi szakemberek egy digitális platformot használhatnak a hulladékkezelési tevékenységek naplózására, amelyeket aztán biztonságosan tárolnak egy főkönyvblokkban [20,21].

A blokkláncalapú rendszerek alkalmazása jelentősen hozzájárulhat az egészségügyi hulladék hatékony kezeléséhez olyan helyzetekben is, amikor annak mennyisége hirtelen megnövekszik, pl. járványhelyzet esetén [22].

Mesterséges intelligencia által vezérelt rendszerek

Az egészségügyi hulladékok kezelésében a mesterséges intelligencia (MI) alkalmazása több területen is előrelépést jelent. Az MI-technológiák olyan új megoldásokat biztosítanak, amelyekkel optimalizálható a hulladékgazdálkodás teljes folyamata – a keletkezéstől az ártalmatlanításig.

Az MI-alapú rendszerek valós idejű adatokat gyűjtenek a hulladék keletkezéséről, gyűjtéséről és feldolgozásáról, majd ezeket elemezve előrejelzéseket készítenek. Ennek segítségével pontosabban becsülhető a keletkező hulladék típusa és mennyisége, ami elősegíti a hulladékkezelési folyamatok optimalizálását [23,24].

A mesterséges intelligenciával támogatott rendszerek könnyen integrálhatók blokklánc- és IoT-technológiákkal, amelyek biztosítják a hulladékgazdálkodás adatainak integritását, átláthatóságát és visszakövethetőségét. Ez különösen kritikus az egészségügyi hulladék esetén, ahol a betegadatok és fertőző anyagok kezelése szigorú biztonsági előírásokat követel meg [24].

Digitális technológiák alkalmazása – nemzetközi példák

A digitális technológiák jelentős potenciállal bírnak az egészségügyi hulladékkezelés hatékonyságának, biztonságának és fenntarthatóságának növelésében. Egyes megoldások, mint pl. az IoT-eszközök már működnek, mások, mint a blokklánc, még főként koncepcionális és pilot szinten léteznek.

Az IoT-technológiát több európai kórházban sikeresen alkalmazták a hulladékkezelési folyamatok racionalizálására, jelentősen növelve ezzel a hatékonyságot. Az egyik példa Svájcban származik, ahol az Università della Svizzera Italiana vezetésével egy projektszervezet egy korszerű egészségügyi hulladék nyomon követő rendszert dolgozott ki. A rendszer célja a klinikai hulladék valós idejű monitorozása, hogy biztosítsa a megfelelő ártalmatlanítást és optimalizálja a folyamatot a hatékony információgyűjtés révén [25].

Egy thaiföldi kórház olyan irányítópultot fejlesztett ki, amely az IoT-eszközökkel integrálva valós idejű adatkövetést, szabályozási megfelelőségi riasztásokat és trendalapú elemzéseket tesz lehetővé. A rendszer segítségével a hulladék mennyisége és kezelése folyamatosan nyomon követhető, osztályonkénti bontásban is [26].

Az IoT-rendszereket blokklánc-technológiával kombinálva a COVID-19 pandémia alatt Vietnámban alkalmazták a jelentősen megnövekedett egészségügyi hulladék kezelésének javítására és nyomon követhetőségének biztosítására [22]. Európai kórházi hulladékkezelésben a nemzetközi szakirodalomban nem találtunk konkrét, működő vagy pilot jellegű blokkláncbevezetést, inkább a technológia alkalmazási lehetőségeit és fejlesztési irányait [27].

MI-alapú rendszerekre a hulladék keletkezésének előrejelzésében és a hulladékgyűjtési útvonalak optimalizálásában az Egyesült Államokban találhatunk példát. Afrikában az MI-t szenzorokkal ellátott okos hulladékgyűjtőkbe és mobilalkalmazásokba integrálják, amelyek a hulladékszint mérésével és az adatok továbbításával segítik a hulladékfelügyelet munkáját, így optimalizálhatóvá válnak a hulladékgyűjtő útvonalak. A mobilalkalmazások lehetővé teszik a közösség tagjainak, hogy problémákat jelentsenek vagy koordinálják a hulladékkezelési tevékenységeket, ezáltal növelve a társadalmi részvételt és a hulladékgazdálkodás hatékonyságát. Az MI-rendszerek decentralizáltak, vagyis nem egyetlen központi kontrollra támaszkodnak, hanem a helyi közösségek bevonását, a kistérségi koordinációt és az önszerveződést helyezik előtérbe, alkalmazkodva a térség sajátos kihívásaihoz, mint például az infrastruktúra hiányosságai, a forráshiány és a gyors urbanizáció [28].

Magyarországi példák és lehetőségek

Az utóbbi években – számos más országhoz hasonlóan – Magyarországon is emelkedő tendenciát mutat a multirezisztens kórokozók által okozott fertőzések előfordulása, valamint a rezisztenciaarányok növekedése [29,30]. Ennek következtében egyre sürgetőbbé válik a megoldási lehetőségek keresése. A 12/2017. EMMI rendelet előírásai szerint azok az egészségügyi hulladékok, amelyek a beteg vérével, váladékával vagy testnedveivel szennyeződtek, speciális egészségügyi hulladéknak minősülnek, ideértve azokat az eseteket is, amikor ismert multirezisztens kórokozó van jelen. E hulladékok gyűjtése szigorúan szabályozott módon, zárt és szivárgásmentes rendszerben történik, ártalmatlanításuk pedig égetéssel valósul meg. Ugyanakkor a modern digitális technológiák – mint az IoT, a különféle szenzorok, a blockchain vagy a mes-

terséges intelligencia – alkalmazása további lehetőségeket nyújthat az antimikrobás rezisztencia (AMR) elleni küzdelemben, még a speciális módon kezelt és égetéssel ártalmatlanított egészségügyi hulladék esetében is, mivel fokozzák a biztonságot, javítják az átláthatóságot, és biztosítják a nyomon követhetőséget a hulladékkezelés teljes folyamatában.

Magyarországon a digitális technológiák elsősorban a diagnosztika és a kezelés terén terjedtek el, valamint teret nyertek egészségügyi informatikai rendszerek és digitális betegportálok is [31]. Ezzel szemben az egészségügyi hulladékkezelés digitalizációjára vonatkozó konkrét példákról nem találtunk információt.

Ugyanakkor az általános hulladékgazdálkodás területén már megjelentek digitális megoldások, amelyek potenciálisan adaptálhatók lehetnek az egészségügy speciális igényeire. A MOHU (Mol Hulladékgazdálkodási Zrt.) például országos mintaprojektet indított, melyben társasházak pályázhatnak ingyenes, nagyméretű, elektronikus zármechanizmussal és telítettségérzékelő szenzorokkal ellátott okoskukákra [32].

Az ipari szegmensben a Chainway Hungary kínál RFID-alapú megoldásokat az egészségügyi hulladék azonosítására és nyomon követésére, amely digitális módon segíti a hulladékkezelési folyamatok automatizálását és pontos dokumentálását. A technológia révén javítható az egészségügyi hulladékkezelés átláthatósága, hatékonysága és biztonsága [33].

Az Európai Unió is támogatja az egészségügyi hulladékgazdálkodás fejlesztését. A Horizon Europe 2025-ös egészségügyi munkaprogramja kiemelt célként kezeli a fenntartható egészségügyi rendszerek kialakítását és a digitális transzformáció előmozdítását. A program keretében lehetőség nyílik olyan innovatív adatvezérelt megoldások fejlesztésére és finanszírozására, amelyek javítják a hulladék nyomon követését [34].

KÖVETKEZTETÉS

Összefoglalónkban áttekintettük a digitális technológiák alkalmazási lehetőségeit az egészségügyi hulladékok adekvát feldolgozásának hatékonyabbá tétele kapcsán. A digitális megoldások innovatív megközelítéseket kínálnak az egészségügyi hulladék kezelésére. Az új technológiák – köztük a mesterséges intelligencia (AI), az internetalapú eszközök (IoT) és a blokklánc – beépítése a hulladékkezelésbe lehetővé teszi a folyamatok hatékonyabbá tételét, a nyomon követhetőség javítását, valamint a környezeti és egészségügyi kockázatok csökkentését. Ezek a technológiák hozzájárulhatnak a fenntarthatóbb működéshez, és elősegítik az egészségügyi intézmények szabályozásoknak való megfelelését is.

A hulladékkezelés digitalizálása az antimikrobás rezisztencia elleni küzdelemhez is hozzájárulhat. Az antibiotikum-maradványokat vagy rezisztens baktériumokat tartalmazó hulladék nem megfelelő kezelése hozzájárul az AMR terjedéséhez. A digitális technológiák – például az automatizált nyomon követési rendszerek – alkalmazása révén a kockázatok csökkenthetők, és az egészségügyi hulladék biztonságosabb módon kezelhető.

A digitális rendszerek széles körű elterjedése előtt kihívások és akadályok is állnak. Az egyik legnagyobb korlát a magas kezdeti beruházási költség: az IoT-eszközök, érzéklők, adatfeldolgozó szoftverek és az infrastruktúra kiépítése jelentős anyagi ráfordítást igényel. Emellett a rendszerek működtetése és fenntartása gyakran speciális műszaki szak tudást kíván, amelynek hiánya akadályozhatja a bevezetést és a hosszú távú működést. Fontos szempont az új digitális rendszerek integrálhatósága is. A meglévő egészségügyi informatikai rendszerekkel való összehangolás sok esetben

összetett, időigényes folyamat, amely külön tervezést és interdiszciplináris együttműködést igényel.

Bár jelenleg nincs ismert hazai példa az egészségügyi szektorban megvalósult digitális hulladékkezelési megoldásokra, a rendelkezésre álló technológiák és EU által kínált finanszírozási lehetőségek megfelelő alapot teremthetnek a jövőbeli projektek elindításához. A magyarországi innovációs környezet és az egyre nagyobb hangsúlyt kapó fenntarthatósági célok révén megérett az idő egy átfogó, digitálisan támogatott egészségügyi hulladékkezelési modell kidolgozására.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Davies J, Davies D. Origins and evolution of antibiotic resistance. *Microbiol Mol Biol Rev.* 2010;74(3):417-433. doi:10.1128/MMBR.00016-10
- [2] Tokuda M, Shintani M. Microbial evolution through horizontal gene transfer by mobile genetic elements. *Microb Biotechnol.* 2024;17(1):e14408. doi:10.1111/1751-7915.14408
- [3] World Health Organization: World AMR Awareness Week 2024: AMR is invisible. I am not. Available at: <https://www.who.int/campaigns/world-amr-awareness-week/2024/amr-is-invisible-i-am-not> (Accessed May 16, 2025)
- [4] Delgado-Blas JF, Agüi CV, Rodriguez E et al. Dissemination Routes of Carbapenem and Pan-Aminoglycoside Resistance Mechanisms in Hospital and Urban Wastewater Canalizations of Ghana. *MSystems.* 2022;7(1), e01019-21. doi:10.1128/msystems.01019-21
- [5] Serna C, Gonzalez-Zorn B. Antimicrobial resistance and One Health. *Rev Esp Quimioter.* 2022;35(3):37-40. doi:10.37201/req/s03.09.2022.
- [6] Zhou X, Cuasquer GJP, Li Z et al. Occurrence of typical antibiotics, representative antibiotic-resistant bacteria, and genes in fresh and stored source-separated human urine. *Environ Int.* 2021;146:106280. doi:10.1016/j.envint.2020.106280.
- [7] HUN-REN Szegedi Biológiai Kutatóközpont: A HUN-REN SZBK munkatársai antibiotikum rezisztencia gének előfordulását és kifejeződési mintázatait vizsgálták ipari méretű biogáz üzemekben. Elérhető: <https://www.brc.hu/hu/blog/2024/10/31/a-hun-ren-szbk-munkatarsai-antibiotikum-rezisztencia-genek-elofordulasat-es-kifejezodesi-mintazatait-vizsgaltak-ipari-meretu-biogaz-uezemekben> (Megtekintve: 2025. május 16.)
- [8] Wang L, Chen Y, Wang Y et al. Review on the Prevalence and Treatment of Antibiotic Resistance Genes in Hospital Wastewater. *Toxics.* 2025 Mar 31; 13(4):263. doi:10.3390/toxics13040263
- [9] A növekvő mennyiségű veszélyes hulladék kezelésére irányuló uniós fellépések. Elérhető: https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/rw23_02/rw_hazardous_waste_hu.pdf. (Megtekintve: 2025. május 16.)
- [10] A Semmelweis Egyetem Hulladékkezelési utasítása. Elérhető: https://semmelweis.hu/biztonsag/files/2020/06/HKU_2020_sablon.docx (Megtekintve: 2025. május 16.)
- [11] Az Európai Unió hulladékgazdálkodási keretirányelve és az ahhoz kapcsolódó jogszabályok. Elérhető: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=celex:32008L0098> (Megtekintve: 2025. május 16.)
- [12] Overview of the Internet of things: Az ITU (International Telecommunication Union) ajánlása: ITU-T Y.2060 számú dokumentum. Elérhető: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=Y.2060> (Megtekintve: 2025. május 23.)
- [13] Mohamed NH, Khan S, Jagtap S. Modernizing Medical Waste Management: Unleashing the Power of the Internet of Things (IoT). *Sustainability* 2023; 15(13):9909. doi:10.3390/su15139909
- [14] Intelligent IoT systems for managing hazardous medical waste. Elérhető: <https://iarjset.com/wp-content/uploads/2024/07/IARJSET.2024.11707.pdf> (Megtekintve: 2025. május 23.)
- [15] Ishaq A, Mohammad SJ, Bello AD et al. Smart waste bin monitoring using IoT for sustainable biomedical waste management. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2025;32(32): 19434-19449. doi:10.1007/s11356-023-30240-1
- [16] Kumar AK, Ali Y, Kumar RR et al. Artificial Intelligent and Internet of Things framework for sustainable hazardous waste management in hospitals. *Waste Management.* 2025;203,114816. doi: 10.1016/j.wasman.2025.114816
- [17] Le HT, Quoc KL, Nguyen TA et al. Medical-Waste Chain: A Medical Waste Collection, Classification and Treatment Management by Blockchain Technology. *Computers.* 2022; 11(7):113. doi:10.3390/computers11070113
- [18] Lányi Márton: Blokklánc technológia a logisztika szolgáltatásban, BÁNKI KÖZLEMÉNYEK 1. ÉVFOLYAM 1. SZÁM. Elérhető: <https://bk.bkg.uni-obuda.hu/index.php/BK/article/view/13/3> (Megtekintve: 2025. május 23.)
- [19] Satoshi N. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Elérhető: https://www.ussc.gov/sites/default/files/pdf/training/annual-national-training-seminar/2018/Emerging_Tech_Bitcoin_Crypto.pdf (Megtekintve: 2025. május 23.)
- [20] Ahmad RW, Salah K, Jayaraman R et al. Blockchain-Based Forward Supply Chain and Waste Management for COVID-19 Medical Equipment and Supplies. *IEEE*

- Access. 2021; 17(9):44905-44927.
doi:10.1109/ACCESS.2021.3066503
- [21] World Economic Forum. Building blockchains: A framework for decentralized and digitalized economies. 2024. Available at: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Building-Blockchains.pdf (Megtekintve: 2025. május 23.)
- [22] Nguyen TD, Nakakubo T, Kawai K. Analysis of COVID-19 waste management in Vietnam and recommendations to adapt to the 'new normal' period. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2023;25(2):835-850. doi:10.1007/s10163-022-01563-x
- [23] Olawade DB, Fapohunda O, Wada OZ et al. Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence. *Waste Management Bulletin*, 2024;2(2): 244–263. doi:10.1016/j.wmb.2024.05.001
- [24] Fang B, Yu, J, Chen Z et al. Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. *Environ Chem Lett*. 2023;21:1959–1989. doi:10.1007/s10311-023-01604-3
- [25] AMR EDUCare kurzus: Waste management: Digital Solutions that Reduce Antimicrobial Waste and Improve its Management. Elérhető: <https://amr-educare.lecturio.com/> (Megtekintve: 2025. május 30.)
- [26] Chimpoklang S, Wibuloutai J, Seedaket S et al. Transforming Infectious Waste Management Through Digital Dashboards: The Napalai Hospital Experience, Thailand. *Stud Health Technol Inform*. 2025;Apr 24; 324:63-68. doi:10.3233/SHTI250162
- [27] Bułkowska K, Zielińska M, Bułkowski M: Implementation of Blockchain Technology in Waste Management. *Energies*. 2023;16(23),7742. doi:10.3390/en16237742
- [28] Nwokediegwu ZKS, Ugwuanyi ED, Dada MA et al. AI-driven waste management systems: a comparative review of innovations in the USA and Africa, *Engineering Science & Technology Journal*. 2024;5(2):507-516. doi:10.51594/estj.v5i2.828
- [29] Az antimikrobiális rezisztencia (AMR) terhe Magyarországon – Egészségügyi Metrika és Értékelés Intézete. Elérhető: https://www.healthdata.org/sites/default/files/2025-08/Hungary_hu.pdf (Megtekintve: 2025. szeptember 22.)
- [30] A hazai antimikrobiális rezisztencia (AMR) helyzet elemzése, célkitűzések megfogalmazása (EFOP-1.8.0-VEKOP-17-2017-0001 eredménytermék) Elérhető: https://info.nevesforum.hu/wp-content/uploads/2021/03/AMR-szakpolitikai-program_AMR_helyzetelemzes.pdf (Megtekintve: 2025. szeptember 22.)
- [31] Medical Online. Eredményezhet jobb egészségügyi ellátást a digitális forradalom? Elérhető: https://medicalonline.hu/eu_gazdasag/cikk/eredmenyezhetjobb_egessegugyi_ellatast_a_digitalis_forradalom (Megtekintve 2025. június 6.)
- [32] MOHU. Ingyenes, intelligens óriáskukákra pályázhatnak a társasházak a MOHU-nál. Elérhető: <https://mohu.hu/hu/ingyenes-intelligens-oriaszukakra-palyazhatnak-a-tarsashazak-a-mohu-nal>. (Megtekintve: 2025. június 6.)
- [33] Chainway Hungary. (Magyar „Internet of Things” vállalat). Egészségügyi hulladékkezelés. Elérhető: <https://chainwayhungary.hu/industry/medical-waste-management/>. (Megtekintve: 2025. június 6.)
- [34] Horizon Europe Work Programme 2025: Elérhető: https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2025/wp-4-health_horizon-2025_en.pdf (Megtekintve: 2025. június 6.)

A SZERZŐK BEMUTATÁSA



Farkas Szilvia biológus, mikrobiológus és ökológus, a Semmelweis Egyetem Egészségügyi Menedzserképző Központ Betegbiztonsági Tanszékének munkatársa, a „NEVES Egyesület a betegbiztonságért” alapító tagja.



Lakatos Botond trópusi betegségek szakorvosa és infektológus, egyetemi docens, a Dél-pesti Centrumkórház főorvosa, a Semmelweis Egyetem Infektológiai Tanszéki Csoport és a Semmelweis Egyetem Globális Egészségügy Trópusi Medicina Munkacsoport tagja, jelenleg a Magyar Infektológiai és Klinikai Mikrobiológiai Társaság elnöke.



Aszalós Zoltán Albert a Semmelweis Egyetemen 2012 óta az Egészségügyi Menedzserképző Központ munkatársa. Nemzetközi projekteken munkacsoportokat vezet projektmenedzserként. Az AMR EDUCare projektben az oktatási anyagok fejlesztését koordinálja. Közgazdasági, jogi, MBA, adattudomány és egészségmenedzsment területen szerzett végzettséget.