



Hidak életciklus fenntarthatóságának értékelése

Dema Ahmad¹, Bencze Zsolt², Gáspár László^{1,2}

¹: Széchenyi István Egyetem, Építőmérnöki Kar, Közlekedéscivilizációs és Vízgazdálkodási Tanszék

²: KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.

E-mail: ahmad.dema@hallgato.sze.hu, dr.bencze.zsolt@gmail.com,
gaspar.laszlo@kti.hu

DOI: [10.36246/UL.2025.1.01](https://doi.org/10.36246/UL.2025.1.01)

KIVONAT

A közúti infrastruktúra valamely ország gazdasági életének meghatározó jelentőségű elemét képezik. Azokon belül a hidak megfelelősége is kiemelt fontosságú a nemzetgazdaság szempontjából. Újabban világszerte egyre nagyobb szerephez jutnak a fenntarthatóság (sustainability) szempontjai. Jelen cikk azt tűzi ki céljául, hogy – főleg egy készülő PhD-értekezés iroda-lomkutatási eredményeire is támaszkodva – a közúti hidakkal kapcsolatos Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA) és az Épületinformációs Modellezés (Building Information Modeling, BIM) jelentőségét ezen a területen áttekinti. Bemutatják, hogy ezeken a területeken világszerte milyen fontosabb eredményeket értek el, illetve melyek a fő fejlesztési irányok, hol van még érdemleges kutatási hiány (research gap).

Kulcsszavak: közúti hidak, fenntarthatóság, kockázatelemzés, hídgazdálkodás, Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (LCSA), Épületinformációs Modellezés (BIM)

ABSTRACT

Road infrastructure can be considered as a major element of national economy; the suitability of bridges has of paramount significance. Sustainability aspects have recently gained increasing importance worldwide. The aim of this article is to review the significance of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) and Building Information Modeling (BIM) in this field, mainly based on the results of a literature review of a PhD thesis in progress. It presents the most important results achieved in these areas worldwide, the main development directions, and where there is still a significant research gap.

Keywords: highway bridges, sustainability, risk analysis, bridge management, Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), Building Information Modeling (BIM)

Dema Ahmad

Okl. építőmérnök, MSc-jét 2020-ban Lattakiában (Szíria) szerezte, az ottani Thisreen Egyetemen óraadó és belső auditor volt, 2022. óta a győri Széchenyi István Egyetemen PhD hallgató, készülő értekezése a fenntartható fejlődéssel foglalkozik.

dr. Bencze Zsolt

okl. építőmérnök, 2010-ben a Széchenyi István Egyetemen MSc-t, 2018-ban PhD fokozatot szerzett, 2005 és 2025 januárja között a KTI Non-Profit Kft.-ben tudományos munkatárs, laboratóriumvezető, igazgatóhelyettes, 75 publikációja jelent meg.

dr. habil. Gáspár László

Okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, az MTA doktora, a KTI Nonprofit Kft. kutató professzora, a Széchenyi István Egyetem emeritusz professzora. 489 publikációjára 1111 ismert, független hivatkozása van.

1. BEVEZETÉS

A közlekedési infrastruktúra-hálózatok alapvető fontosságúak a társadalmi és a gazdasági vitalitás szempontjából, és a fenntartható fejlődés gerincét képezik. A hidak, mint e hálózatok kritikus alkotóelemei, pedig az egyes körzetek összekapcsolhatósága és a mobilitás biztosításában játszanak kulcsszerepet. A közúti hidak gazdasági előnyei mellett, egyre inkább a különböző országok kutatóinak látókörébe került ezeknek a nagy jelentőségű, közlekedési infrastruktúra elemeknek a fenntarthatósági jellemzői, kitérve a gazdasági, a környezeti és a társadalmi fenntarthatóságra. Ezzel a kérdéscsoporttal foglalkozik egy olyan, kidolgozás alatt levő, PhD-disszertáció [1], amelynek számos megállapítása jelen cikkben felhasználásra került.

2. A HIDAK ÉS A FENNTARTHATÓSÁG

Az ENSZ Brundtland Bizottsága úgy definiálja a fenntartható fejlődést, mint „a jelen szükségleteinek kielégítését anélkül, hogy azzal a jövő nemzedékek azon képességét veszélyeztetnék, hogy az akkori szükségleteiket kielégíthessék” [2]. Ez a meghatározás aláhúzza a gazdasági, a társadalmi és a környezeti szempontok integrálásának szükségességét, hangsúlyozva, hogy mind a közösségi élet, mind pedig a gazdasági tevékenységek eredendően a természettől függenek [3]. Az ENSZ Fenntartható Fejlődési Céljaihoz a fenntartható közlekedési infrastruktúra fejlesztése kulcsfontosságú a közösségek természeti kihívásokkal szembeni ellenállóképességének növelése szempontjából [4]. Ezekhez a célokhoz a hidak közvetlenül hozzájárulnak azáltal, hogy megbízható összeköttetést teremtenek és csökkentik a környezeti hatásokat. A globális trendek azt jelzik, hogy a hídépítés a gazdasági terjeszkedés és a városi urbanizáció következtében felpörög [5]. A kihívások azonban a fejlett és a fejlődő országok között egymástól eltérnek. A fejlett országokban az előregedő infrastruktúra és az összetett karbantartási követelmények fenntarthatósági aggályokat vetnek fel, míg a fejlődő országok a gyors urbanizációval és a fenntartható építkezéshez szükséges források korlátozottságával küzdenek. A mobilitásban és a gazdasági integrációban betöltött döntő szerepük ellenére, a hidak, életciklusuk során, hatalmas mennyiségű anyagot és energiát igényelnek, ami a környezet leromlásához jelentős mértékben hozzájárul [6].

A legújabb statisztikai adatok a fenntartható hídkezelés globális sürgősségét mutatják. Kínában 2010 és 2023 között 64%-kal nőtt a közúti hidak száma, ami elérte az 1,08 milliós darabszámot [7]. Az Egyesült Államokban a több mint 617 000 híd 42%-a legalább 50 éves, és 7,5%-a szerkezetileg hiányosnak minősül, ami napi 178 millió felhasználót érint [8]. Hasonlóképpen, Kanada [9] és Németország jelentése [10] szerint is, hídállományuk jelentős része azonnali beavatkozást igénylő, rossz állapotban van, ami tesz szükségessé. Ezek a statisztikák rávilágítanak arra, hogy sürgősen szükség van olyan fenntartható gazdálkodási megközelítésekre, amelyek foglalkoznak az életciklus-hatásokkal, és hasznosítják a feltörekvő technológiai megoldásokat [11], [12].

Történelmileg a gazdasági megfontolások háttérbe szorították a környezeti és társadalmi tényezőket a hídépítési döntésekben, annak ellenére, hogy a fenntarthatóságban szerves szerepük van [13]. A közlekedési infrastruktúrális beruházások továbbra is globális prioritást élveznek, az elmúlt években a Világbanki hitelek több mint 20%-át erre a szektorra fordították [14]. Mindazonáltal a hidak, életciklusuk során, a CO₂-kibocsátáshoz meglehetősen nagy mértékben hozzájárulnak, ezért – a fenntartható építési és karbantartási gyakorlatok elfogadásának elősegítése érdekében – szükség van az üvegházhatást okozó gázok (ÜHG) kibocsátásának mennyiségi értékelésére [15].

A feltörekvő térinformatikai technológiák, mint például az Épületinformációs Modellezés (Building Information Modeling, BIM), a Digitális Iker technológia, a Földrajzi Információs Rendszerek (Geographic Information System, GIS) és a Tárgyak Internete (Internet of Things, IoT) alapú, monitorozó rendszerek, újszerű lehetőségeket teremtettek az infrastrukturális projektek számára. Ezek a technológiák lehetővé teszik a valós idejű adatintegrációt, a prediktív (előre becsülő) karbantartást és a komplex életciklus-elemzést, ezáltal a fenntarthatóság szempontjait az eddigieknél nagyobb mértékig segítik érvényesíteni. Az előbbiek a hídgazdálkodásban azonban továbbra is gyakorlatilag kihasználatlanok maradtak, pedig alkalmazásukkal a teljes életciklusalatti létesítménykezelés korszerűsítésére, a környezeti hatások csökkentésére és a hatékonyabb, hosszú távú fenntarthatóságra nagy lehetőségek nyíl(ná)nak [16].

A projektek kiválasztása és a tervezési döntések a híd fenntarthatóságát, természetesen, jelentős mértékig befolyásolják. A hagyományos építési módszerekre való, túlzott mértékű ragaszkodás súlyosbít(hat)ja azokat a fenntarthatósági kihívásokat, amelyek a modern, technológia által vezérelt megoldásokkal mérsékelhetők. A hídtervezés és -építés bonyolult szerkezeti kialakításokkal és kihívást jelentő környezettel jár együtt, ami pedig – a hagyományos 2D műhelyrajzok használatával – a tervezési hibák előrejelzését megnehezíti. Ezenkívül a híd teljes életciklusa során tapasztalható, nem-folyamatos információátvitel a karbantartási költségeket és az időbeli csúszásokat növeli, végső soron pedig a fenntarthatósági célok elérésére irányuló globális erőfeszítéseket akadályozza [17].

A kockázatalapú döntéshozatal elengedhetetlen a fenntartható hídkezeléshez, mivel a jelenlegi gyakorlat szerint, a kockázatoknak a híd teljes életciklusára vonatkozó értékelését gyakran nem tudják végrehajtani. Ez a hiányosság pedig nem várt költség-túllépésekhez, késedelmes karbantartáshoz és fokozott környezeti hatásokhoz vezet. Átfogó kockázatalapú módszerek alkalmazásával a sebezhetőségek korán azonosíthatók, lehetővé téve olyan proaktív stratégiákat, amelyek a rugalmasságot, a költség-hatékonyságot és a fenntarthatóságot érdemlegesen növelik [18]. A gazdasági kockázatok (költség-túllépések), a társadalmi kockázatok és a környezeti kockázatok (Üvegházhatású Gáz kibocsátása) egyaránt fenyegetik a hosszú távú fenntarthatósági célkitűzéseket. Az olyan digitális eszközök, mint a BIM és az olyan módszerek, mint az Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (lásd a 3. pontot) alkalmazása lehetővé teszi ezeknek a kockázatoknak a korai felismerését és mérséklését, a híd teljes életciklusa alatt [19]. A hidak karbantartása-felújítása önmagában a hidak teljes környezeti hatásának 66%-át teszi ki, elsősorban a forgalom elterelése (50%), a hídfelszerkezet felújítása (12%) és a szerkezeti megerősítés (4%) miatt [20].

Megállapítható, hogy világszerte meglehetősen kevés kutatási munka folyt az Életciklus Fenntarthatósági Értékelés és a kockázatalapú döntéshozatalnak a hídgazdálkodási rendszerekbe (Bridge Management, System, BMS) való tervezett beépítése kapcsán, különösen a hidak fenntartásával összefüggő, környezeti hatások tekintetében.

A gazdasági hatékonyság, a környezeti felelősség és a társadalmi méltányosság közötti egyensúly elérése érdekében, a hídprojektekre irányuló gazdálkodásban célszerű innovatív megközelítéseket alkalmazni. A fenntarthatóság biztosításához az életciklus minden szakaszában – a tervezéstől az építésig, az üzemeltetésig, a karbantartásig, a felújításig és leszerelésig – olyan holisztikus keretre van szükség, amely a modern technológiát, a kockázatértékelést és az LCSA alapú döntéshozatalt integrálja [1].

3. ÉLETCIKLUS FENNTARTHATÓSÁGI ÉRTÉKELÉS (LCSA)

3.1. AZ LCSA FOGALMA, ELŐNYEI ÉS KIHÍVÁSAI

Az ENSZ Környezetvédelmi Programja az 1992-es, Rio de Janeiro-i Föld-csúcstalálkozón a fenntarthatóságot a globális fejlődés alapvető politikai céljaként ismerte el. A fenntarthatóság három fő pillér – környezeti, gazdasági és társadalmi dimenzió – köré épül, amelyeket a termékfejlesztési és döntéshozatali folyamatok során indokolt figyelembe venni [21]. Az elmúlt évtizedekben az éghajlatváltozással, a biológiai sokféleség csökkenésével és az ipar technológiaátalakítási és/vagy

termelésvisszafogási kompromisszumaival kapcsolatos globális tudatosság még inkább előtérbe hozta az integrált fenntarthatósági értékelések szükségességét. Ez vezetett az Életciklus Fenntarthatósági Értékelés (LCSA) kidolgozásához; ez a keretrendszer a termékek és a folyamatok környezeti, gazdasági és társadalmi hatásait értékeli, azok teljes életciklusa során [22].

Az LCSA koncepciójával a szakirodalom már több mint 15 éve tárgyalja, és egyre több tanulmány javasol különféle értékelési módszereket. Kezdetben Klöpffer [23] az LCSA-t olyan megközelítésként vezette be, amely a következő három életciklus-értékelési technikát integrálja:

- Környezeti életciklus-értékelés (Environmental Life Cycle Assessment, E-LCA), amely a termék környezeti lábnyomára összpontosít, beleértve az erőforrás-felhasználást, a károsanyag-kibocsátást és a hulladéktermelést,
- Életciklus-költségszámítás (Life Cycle Costing, LCC), amely a termék gazdasági életképességét, valamint a termeléssel, valamint az életciklus végével és a selejtezéssel kapcsolatos költségeket méri fel;
- Társadalmi szintű életciklus-értékelés (Social Life Cycle Assessment, S-LCA), amely egy terméknek a munkavállalókra, a közösségekre és a fogyasztókra gyakorolt társadalmi hatásait vizsgálja, biztosítva az etikus termelést és a tisztességes munkavégzési gyakorlatot.

Ez a három módszer együttesen alkotja az LCSA keretrendszert, amely a fenntartható döntéshozatalhoz holisztikus megközelítést biztosít [24].

Az LCSA módszertanát folyamatosan finomítják, és gyakorlatban való alkalmazhatóságát is javítják [25]. Az eljárás széles körben elterjedt a különböző iparágakban, beleértve az építőipart, a szállítást, az energetikát, a gyártást, a mezőgazdaságot és a hulladékgazdálkodást [26]. Az LCSA egyik legjelentősebb alkalmazása a körforgásos gazdaság (Circular Economy, CE) népszerűsítése olyan fenntartható, termelési és fogyasztási modell révén, amely az anyagok újra felhasználását, állapotjavítását, felújítását és újra hasznosítását helyezi előtérbe, a hulladékmennyiségnek és az üvegházhatású gázok kibocsátásának minimalizálása érdekében [27]. Nemzetközi szinten, az LCSA módszertanok globális szabványok előírásait követik, biztosítva a fenntarthatósági értékelések következetességét [28]. Az LCA-t eredetileg a termékek környezeti (karbon)lábnyomának felmérésére fejlesztették ki, felmérve az erőforrás-áramlásokat és a károsanyag-kibocsátást meghatározott rendszerhatárok között. Idővel a gazdasági fenntarthatóság fontosságának köszönhetően, az LCC került előtérbe, vizsgálva a cash flow-t (pénzforgalmat), a költségstruktúrát és az életciklus alatti költségeket. Az utolsó komponenst, az S-LCA-t a különböző iparágak társadalmi hatásainak mérésére vezették be, helyi, nemzeti és globális szinten, ebben olyan szempontokat értékelnek, mint a munkakörülmények, az emberi jogok és a közösségi jólét [29]. Bár az LCSA komplex fenntarthatósági értékelési eszköz, azonban számos kihívás is jelentkezik. Ezek közül a legfontosabbak az adatgyűjtési nehézségek, a készletelosztási problémák, a módszertani ellentmondások, valamint a kockázatértékelésnek az LCA-számításokba való integrálása [30]. Az LCC módszerek a gazdasági modellezés tekintetében meglehetősen bizonytalanok, míg az S-LCA esetében, a társadalmi mutatók egységesített számszerűsítése okoz nehézségeket. Az 1. táblázat az LCA legfontosabb előnyeit és kihívásait foglalja össze.

1. táblázat: Az LCSA előnyei és kihívásai [4], [6], [29], [30], [31], [32].

Előnyök	Kihívások
Az LCA segítségével kiválaszthatók egy szervezet környezeti viselkedésének fő mutatói, beleértve a környezetállapot felmérésével kapcsolatos mérési és értékelési eljárások	Az LCA alkalmazását jelentős mértékben akadályozhatja a megfelelő és megbízható adatok gyűjtésének nehézségei.
Az LCA olyan iparági vagy kormányzati szervezeti döntéseket feltételez, amelyek meghatározzák a stratégiai tervezési prioritásokat és irányt, a termék- vagy folyamattervezést és ezeken a területeken az esetleges változásokat.	Az LCA-nak nehézségei vannak az adatleltár létrehozásával, beleértve az allokációt és a késleltetett károsanyag-kibocsátásokat.

Az LCC fontos felhasználási területe az egyes változatok gazdasági jövedelmezőségének és tőkebefektetésének összehasonlítása.	Az LCA-nak a hatásvizsgálatban gyakori problémája, például, a földhasználat és a keletkező szagok figyelembevétele.
Az LCC számos olyan költséget mutat ki, amelyek a különböző típusú eszközök egész élettartamuk alatti birtoklásából és használatából származnak.	Az LCA-nak jelentős nehézségei származnak a kockázatértékelési elemeknek a számításba integrálása során.
Az S-LCA bevonja az érdekelt feleket a célok és a vizsgálati tárgykör meghatározásába, az adatgyűjtésbe és az értékelésbe.	Az LCC-nek egyes iparágakba való bevezetése problematikus lehet, mert módszertana gyakran ütközik más olyan kapcsolódó elképzelésekkel, mint, például, a "teljes költségelszámolás".
Az S-LCA társadalmi információkat nyújt a döntéshozóknak, megkönnyíti a társadalom egyes területein élő emberek számára a termelésről és a fogyasztásról alkotott elképzelések megismerését, hatékonyabbá teszi a munkájukat, és végül, minden érdekelt félnek próbál segíteni.	Az LCSA-megközelítés bonyolultsága, amely állítólag a fenntarthatósági teljesítmény megbízható mérését lehetővé teszi, a döntéshozók számára, kihívást jelent.
Az S-LCA segíti a döntéshozókat az erőforrások fontossági sorrendjének meghatározásában és azok felhasználásában ott, ahol a jó eredményeknek és a kisebb negatív eredményeknek nagyobb a valószínűsége.	Vita van arról, hogy az LCC-nek a költségszinten kell-e maradnia, vagy a hagyományos LCC-keretet meg kell-e változtatni, hogy a gazdaság tágabb szemléletét részesíti előnyben.
Az S-LCA innovációra ösztönzi a vállalati és az értéklánc szereplőit.	Az S-LCA jelentős problémája a társadalmi mutatók hatáskategóriákhoz és kedvezőtlen kimenetekhez való viszonyítása.
Az átlátható S-LCA információs kommunikáció segíti a cégeket bizalmuk növelésében.	Az S-LCA jelzéseket számszerűsített értékekké konvertálni nehéz, ami az eredmények értékelését túl bonyolulttá teszi.
Az S-LCA segít a szakembereknek a bonyolult, környezeti, gazdasági és társadalmi tények és adatok rendszerezésében.	Az S-LCA további továbbfejlesztést igényel ahhoz, hogy a társadalmi mutatók pontosabban tudja megállapítani.
Az S-LCA felhívja az értéklánc szereplőinek figyelmét a fenntarthatósággal kapcsolatos kérdésekre felhívja.	Az S-LCA-tól eltérően, az LCC-ből hiányoznak az ok-okozati ciklust követő hatásútvonalak.

Az 1. táblázatban feltüntetett kihívások ellenére, az LCSA továbbra is alapvető fontosságú eszköz ahhoz, hogy a fenntarthatóságot a döntéshozatalba integrálják; az adatgyűjtés, a hatásvizsgálat és a digitális modellezés terén történő, folyamatos fejlesztések a fenntartható fejlődés irányításának hatékonyságát egyre inkább fokozzák [24], [30].

3.2. AZ LCSA ALKALMAZÁSA A HÍDGAZDÁLKODÁSBAN

Az Életciklus Fenntarthatósági Értékelést (LCSA) a különböző építőipari ágazatokban széles körben alkalmazzák, de a hídprojektekben továbbra is korlátozottan kerül előtérbe. Általában az LCSA minden egyes összetevőjét (E-LCA, LCC és S-LCA) külön-külön alkalmazzák, nem pedig integráltan. Kezdetben a hídépítés során használt anyagok környezeti hatásának értékelésére életciklus-értékelést (LCA) alkalmaztak. Az egyik legkorábbi tanulmány [33] szerzői általános LCA-módszert dolgoztak ki az új közlekedési infrastruktúra értékelésére. Tanulmányukban a hagyományos felépítésű hidak élettartamát hasonlították össze egy minimális tartómeretűhíddal, acél tartóssági vizsgálatok eredményeit hasznosítva szerkezeti élettartamuk felmérésekor. Másik vizsgálat során, két hídpályarendszer életciklus-teljesítményét elemezték 60 éves élettartamuk alatt, ezek közül az egyik hagyományos anyagokat, a másik pedig cement kötésű kompozitokat tartalmazott. Modelljük célja a hídpálya élettartamának meghosszabbítása volt, a karbantartási költségek és a környezeti hatások minimalizálása mellett [34].

Du és Karoumi [6] a vasúti hidak környezeti hatásának felmérésére, rendszerszemléleten alapuló LCA-modellt vezettek be. Arra a következtetésre jutottak, hogy az anyaggyártás a legnagyobb környezetterhelésért felelős, míg az építőipari gépek ez irányú hatása csekély. Emellett öt nagy fesztávú híd tervét hasonlították össze, 20 környezeti hatásmutató segítségével, különös figyelemmel a

betontípusokra, az acél újra hasznosítási arányára és az anyagválasztásra, mint a környezeti teljesítményt meghatározó kulcstényezőkre.

A hídprojektekben végzett LCA-alkalmazásokkal kapcsolatos kiterjedt kutatás ellenére, az LCC-t továbbra sem alkalmazzák sűrűn, és az S-LCA-t is ritkán építik be a fenntarthatósági értékelésekbe. A jelenlegi tanulmányok elsősorban a környezeti hatásokra és a költségértékelésekre összpontosítanak, de a társadalmi fenntarthatósági szempontokat (pl. közösségi hatás, munkakörülmények) gyakran figyelmen kívül hagyják. A jövőbeli kutatásnak előtérbe kellene helyeznie a teljesen integrált LCSA-modelleket, biztosítva a környezeti, gazdasági és társadalmi dimenziók kiegyensúlyozott megközelítését. A holisztikus fenntarthatósági keretrendszerek kidolgozásával, elérhető lehet, hogy a hídgazdálkodás az életciklus-hatékonyságot javíthatja, a környezeti lábnyomokat csökkentheti, és a hosszú távú költségeket optimalizálhatja.

Hazai viszonylatban az amerikai PONTIS hídgazdálkodási rendszer (BMS) magyar viszonyokra történő adaptációja a hídfenntartási és a vagyonkezelési stratégiák korszerűsítésében jelentős szerepet játszott [35]. A magyar ötéves hídfenntartási és -rehabilitációs program alkalmazásával tovább fejlesztették a hídkezelési modellt, korszerű értékelési eszközök és indikátorok rendszerbe történő integrálásával [36]. Ezek a kezdeményezések rávilágítanak a BMS folyamatos frissítésének fontosságára, a fejlődő infrastrukturális igények és a technológiai fejlesztések nyomon követése érdekében.

4. ÉPÜLETINFORMÁCIÓS MODELLEZÉS (BIM) A HÍDÜGYBEN

Az Épületinformációs Modellezés (BIM) viszonylag új technológia a hídépítésben, de – a szerkezeti elemek pontos, numerikus ábrázolását biztosító 3D modellek használatával – a tervezési pontosságot, az együttműködést és a megépíthetőséget jelentős mértékben javíthatja [37]. Számos tanulmány igazolta, hogy a BIM képes javítani az infrastruktúrát, különösen a nagy mértékű részletességet és összetettséget igénylő hídprojekteket. A több életciklus-fázis közötti interoperabilitás elősegítése érdekében bővíthető hídinformációs sémát fejlesztettek ki, amely a tervezési, építési és fenntartási folyamatokat javítja [38].

Amerikai kutatók bevezették a BrIM (Bridge Information Modeling, Híd Információs Modellezés) keretrendszert, amely integrálja a Bridge Management System (BMS), Hídgazdálkodási Rendszer olyan funkcionális elemeit kapcsolja össze, mint az adatbázisok, az ellenőrzési modulok és az állapotértékelési eszközök. Később automatizált költség- és időgazdálkodási rendszert is fejlesztettek ki a hidakhoz; ez lehetővé teszi teljesítményük nyomon követését, a költségbecslést és a projekt valós idejű megfigyelését előre meghatározott vagy pedig a felhasználó által beállítható paraméterek segítségével [39].

Dawood az elvi és a részletes hídtervezés optimalizálásához, az építkezések sorrendjéhez, az építésmenedzsmenthez, az ütemezéshez és a valós idejű folyamatfigyeléshez BIM-alapú megoldásokat vezetett be annak érdekében, hogy a projekt teljes életciklusa alatt jobb hatékonyságot érjenek el. A BIM és a modern képalkotási és -számítási technológiák integrálásával újszerű keretrendszert javasoltak a híd vagyonkezelésének javítására, különösen pedig a lézeres szkennelés és a modern textúrafelismerés felhasználásával a szerkezeti hibák, például repedés, süllyedés és korrózió kimutatására. Ezeken túlmenően, a BIM-et a hídfenntartási és -javítási programok fejlesztésére is használják. Vizuális keretrendszert dolgoztak ki a betonhídelemek állapotának nyomon követésére, az Excel segítségével a számszerű elemzéshez és a Revit alkalmazásával a vizualizációhoz, automatizált valós idejű információcsere-platformot hoztak létre az egyes hídelemek romlási arányainak nyomon követésére és a karbantartási ütemezés optimalizálására [40].

Kínai kutatók egyesítették a BIM-et és a GIS-t (Térinformatikai Rendszert), döntéstámogató platformot biztosítva a hídkarbantartáshoz. Megközelítésük abból állt, hogy az IFC formátumú BIM modelleket térinformatikai modellekké alakították át. Ezt a megközelítést aztán webalapú, térinformatikai rendszerbe integrált, hídkezelő rendszerbe alkalmazták, amelyekkel a BIM-modellek valós hídfelületei alkalmazásokhoz módosíthatók [41].

A biztonsági ellenőrzés és a fenntartási döntéshozatal javítása érdekében, a hídinformáció-kezelés integrált keretrendszerét is javasolták, biztosítva a szerkezet biztonsági előírásainak betartását. Ennek

továbbfejlesztéseként, intelligens hídkezelési és -karbantartási rendszert vezettek be, amely, a szerkezeti problémák proaktív észlelésére és megoldására, valós idejű megfigyelő eszközöket használ, csökkentve ezzel a leromló hidakon a balesetek bekövetkezésének valószínűségét [42].

Újabban BIM alapú Bridge Maintenance System (BMS) rendszert fejlesztettek ki a hibakezelés digitalizálására. Módszerük 3D-s hídhiba-könyvtár (BIM3D) létrehozását, a hibainformációk osztályozását és kódolását, és ezen adatok átfogó vizsgálati adatbázisba történő integrálását foglalta magában. Ez a digitalizált megközelítés lehetővé teszi a gyorsabb hibaazonosítást, a strukturált karbantartási tervezést és – végeredményben – a híd hosszabb élettartamát [43].

Míg számos tanulmány tárta fel a BIM-alkalmazásokat a hídkezelésben, még további kutatásokra van szükség a gyakorlati megvalósítási stratégiák finomítása, a BIM és más digitális eszközök közötti interoperabilitás javítása, valamint a BIM hídprojektekben történő alkalmazásakor, a hosszú távú költséghatékonyság felmérése érdekében. E területek kezelése hozzájárul a BIM technológia fejlesztéséhez és a fenntartható infrastruktúra-fejlesztésben betöltött szerepének optimalizálásához.

5. NÉHÁNY ÖSSZEFOGLALÓ MEGJEGYZÉS

Az előbbieken a fenntarthatóságnak egyik lényeges és időszerű alkalmazási területével, a közúti hidakkal foglalkoztunk. A közlekedési infrastruktúrának ezen nagy jelentőségű eleme sok kutatási munka témáját adta, rámutatva a nemzetgazdaságban betöltött szerepére, az általa nyújtott gazdasági előnyökre, valamint azokra a veszteségekre, amelyekkel a forgalomból való időleges kiesése vagy funkcióinak kényszerű korlátozása esetében kell számolnunk. Újabban világszerte egyre sokasodnak azok a vizsgálatok, illetve azok eredményei alapján kifejlesztett modellek, amelyek a jelen gazdasági előnyeivel esetenként akár szembe állítva, a fenntarthatóság olyan kérdéseit vetik fel, mint az utánunk következő nemzedékek irányában megnyilvánuló társadalmi felelősségérzetet.

6. IRODALOM

- [1]: Ahmad, D.M. (2025). Development of a Sustainable Bridge Management Model (SBMM) integrating Risk Management, BIM, and LCSA. PhD Thesis. Doctoral School of Multidisciplinary Engineering Sciences, Széchenyi István University, Győr (under review)
- [2]: United Nations. 1989. Report of the World Commission on Environment and Development: resolution / adopted by the General Assembly. 42nd session (1987-1988). <https://www.un.org/en/ga/cpc/dec/42450.pdf>
- [3]: Llatas, C., Quiñones, R., et al. 2022. Environmental Impact Assessment of Construction Waste Recycling versus Disposal Scenarios Using an LCA-BIM Tool during the Design Stage. *Recycling*, 7(6), 82. <https://doi.org/10.3390/recycling7060082>
- [4]: United Nations. 2015. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations General Assembly. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [5]: Zhao, Z., et al. 2019. Integrating BIM and IoT for smart bridge management. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science* 371 (022034), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/371/2/022034>
- [6]: Du, G., Karoumi, R. 2013. Life cycle assessment of a railway bridge: comparison of two superstructure designs. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9:11, 1149-1160, <https://doi.org/10.1080/15732479.2012.670250>
- [7]: Statista.2024.
- [8]: American Infrastructure Report Card, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2021. <https://infrastructurereportcard.org/>
- [9]: Canadian Infrastructure Report Card, Monitoring the State of Canada's Core Public Infrastructure, 2019. <http://canadianinfrastructure.ca/en/municipal-roads.html>
- [10]: Federal Statistical Office of Germany (Statistisches Bundesamt), 2021. https://www.destatis.de/EN/Press/2021/07/PE21_N048_61.html
- [11]: Fegghi, M., Khedmatgozar Dolati, S. S., et al. 2024. A New Framework for Condition and Risk Assessment for Sustainable Management of PT Bridges. *Sustainability*, 16(22), 9703. <https://doi.org/10.3390/su16229703>

- [12]: Shivam, S. 2024. Efficient Bridge Management System: A Comprehensive Approach for Sustainability of Bridge. *Journal of Chemical Health Risks*, 14(3), 1831-1845. <https://www.jchr.org/index.php/JCHR/article/view/4842>
- [13]: Penadés-Plà, V., García-Segura, T., et al. 2016. A Review of Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied to the Sustainable Bridge Design. *Sustainability*, 8, 1295. <https://doi.org/10.3390/su8121295>
- [14]: Navarro, I., Yepes, V., et al. 2021. Sustainability life cycle design of bridges in aggressive environments considering social impacts. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 9(2) 93-107. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V9-N2-93-107>
- [15]: Milić, I., & Bleiziffer, J. 2024. Life cycle assessment of the sustainability of bridges: methodology, literature review and knowledge gaps. *Frontiers in Built Environment*, 10. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1410798>
- [16]: Pelden, S., Banihashemi, S., et al. 2025. Enhancing infrastructure planning and design through BIM-GIS integration. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2025.2461629>
- [17]: Saback de Freitas Bello, V., Popescu, C., et al. 2022. Framework for Bridge Management Systems (BMS) Using Digital Twins. In: Pellegrino, C., Faleschini, F., et al. (eds) Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures. *EUROSTRUCT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 200. 687–694. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_78
- [18]: Lee SH, An LS, et al. 2025. Risk-based bridge life cycle cost and environmental impact assessment considering climate change effects. *Sci Rep*. 3;15(1):725. PMID: 39753640; PMCID: PMC11698832, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82568-4>
- [19]: Raeisi, F., Algoi, B., et al. 2021. Reducing carbon dioxide emissions through structural health monitoring of bridges. *J Civil Struct Health Monit*, 11, 679–689. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00474-z>
- [20]: Pang, B., Yang, D., et al. 2015. Life cycle environmental impact assessment of a bridge with different strengthening schemes. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(9) 1300-1311. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0936-1>
- [21]: Klopffer, W. 2008. Life cycle sustainability assessment of products. *Int J Life Cycle Assess* 13, 89. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>
- [22]: Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., et al. 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment – our contribution to Rio+20. *Int J Life Cycle Assess* vol. 18, 1673–1685. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1>
- [23]: Schramm, A., Richter, F., et al. (2020). Life Cycle Sustainability Assessment for manufacturing – analysis of existing approaches. *Procedia Manufacturing*, vol. 43, 712-719. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.115>
- [24]: Larsen, V. G., Tollin, N., et al. 2022. What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, LCSA. *Journal of Building Engineering*, 50, 104203 <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104203>
- [25]: Pradip P. K., Deepjyoti D. 2020. Advancing Life Cycle Sustainability Assessment Using Multiple Criteria Decision Making, Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making, *ScienceDirect* In the book: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making 205-224. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818355-7.00010-5>
- [26]: Mondello, G., Salomone, R. 2020. Assessing green processes through life cycle assessment and other LCA related methods. *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 179, 159-185. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64337-7.00010-0>
- [27]: Anastasiades, K., Blom, J. et al. 2020. Translating the circular economy to bridge construction: Lessons learnt from a critical literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109522>
- [28]: Balasbaneh, A.T., Marsono, A.K.B. 2020. Applying multi-criteria decision-making on alternatives for earthretaining walls: LCA, LCC, and S-LCA. *Int J Life Cycle Assess* 25, 2140–2153. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01825-6>
- [29]: Finkbeiner, M. 2014. The International Standards as the Constitution of Life Cycle Assessment: The ISO 14040 Series and its Offspring. In: Klöpffer, W. (eds) Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment. *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3>
- [30]: Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., et al. 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment – our contribution to Rio+20. *Int J Life Cycle Assess* vol. 18, 1673–1685. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0529-1>

- [31]: Finkbeiner M, Schau EM, et al. 2010. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability*. vol. 2(10) 3309-3322. <https://doi.org/10.3390/su2103309>
- [32]: Chang, Y. J., Neugebauer, S., et al. 2017. Life cycle sustainability assessment approaches for manufacturing. In the book: *Sustainable Manufacturing*, 221-237. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48514-0_14
- [33]: Itoh, Y., Kitagawa, T. (2003). Using CO₂ emission quantities in bridge lifecycle analysis. *Engineering Structures*, vol. 25, 565-577. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00167-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00167-0)
- [34]: Keoleian, G., Kendall, A., et al. 2005. Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design: Comparison of Engineered Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints. *Journal of Infrastructure System*, vol. 11. ASCE. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(51))
- [35]: Agárdy, G., Gáspár, L., et al. 2000. Adaptation of PONTIS BMS to Hungarian conditions. *4th Bridge Engineering Conference*, Adelaide, Australia. 61-70.
- [36]: Molnár, I., Gáspár, L., et al. 2002. Hungarian 5-year Bridge Maintenance and Rehabilitation Program, as a part of Asset Management. *IABSE Symposium Report*. Vol. 86. 34-42. <https://doi.org/10.2749/222137802796336180>
- [37]: Rolfsen, C. N., Lassen, A. K., et al. 2021. In the book: ECPPM 2021 - eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, Chapter: The use of the BIM-model and scanning quality assurance of bridge constructions. 1st edition, Taylor & Francis Group. 4 p.
- [38]: Shim, C., Yun, N., et al. 2011. Application of 3D Bridge Information Modeling to Design and Construction of Bridges. *Procedia Engineering*, vol. 14, 95-99. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.010>
- [39]: Marzouk, M. M., Hisham, M. 2014. Implementing earned value management using bridge information modeling. *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 18, 1302–1313. <https://doi.org/10.1007/s12205014-0455-9>
- [40]: Dawood, M. 2018. BIM Based Bridge Management System. In: Şahin, S. (eds) 8th International Conference on Engineering, Project, and Product Management (EPPM 2017). EPPM 2017. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74123-917>
- [41]: Wan, C., Zhou, Z., et al. 2019. Development of a Bridge Management System Based on the Building Information Modeling Technology. *Sustainability*, 11, 4583. <https://doi.org/10.3390/su11174583>
- [42]: Zhou, Z. 2022. An Intelligent Bridge Management and Maintenance Model Using BIM Technology. *Mobile Information Systems*, vol. 2022, Article ID 7130546, 9 p. <https://doi.org/10.1155/2022/7130546>
- [43]: Li, S., Zhang, Z., et al. 2023. Development of a BIM-based bridge maintenance system (BMS) for managing defect data. *Sci Rep* 13, 846. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27924-6>