

ECO-Matrix

2023/1



ECO-Matrix

8. évfolyam 1. szám 2023/1

A szerkesztőbizottság:

Tóthné Szita Klára

Mannheim Viktória

Sára Balázs

Gröller György

Karcagi-Kováts Andrea

Szerkesztő: Szilágyi Artúr

Felelős Kiadó: LCA Center, a Magyar Életciklus Elemzők Szakmai Egyesület

3519 Miskolctapolca, Iglói u. 2.

e-mail: info@lcacenter.hu

Az elektronikus folyóirat megjelenik félévente. 50 oldal terjedelemben.

ISSN 2061-344X

Kedves Olvasó!

Hosszabb kihagyás után örömmel adjuk közzé egyesületünk ECO-MATRIX folyóiratának legújabb számát, amelyben főként a novemberi konferenciánkon elhangzott előadások alapján készült néhány cikk található. Elmúlt évi konferenciánk „*Társadalmi-, gazdasági- és környezeti kihívások hatása az életciklus-elemzésekre*” címmel került megrendezésre, ebből kifolyólag a beérkezett előadások is az elméleti kérdésektől a konkrét esettanulmányok bemutatásáig terjedő széles palettán mozogtak. Ezúttal most 5 olyan esettanulmány kerül bemutatásra, amelyek a különböző ágazatokhoz tartozó környezeti elemzések tanulságaira világítanak rá. Elméleti megközelítésben olvashatnak az olvasók a gyártási folyamatokra felállított integrált energia- és LCA modellekről a mészke örlési folyamatát alapul véve, amelynek jelentősége abban rejlik, hogy mind a környezeti hatások csökkentésére, mind az energiahatékonyságra egyre nagyobb figyelem összpontosul, és a folyamatok optimalizálásánál az integrált modellek segítséget nyújthatnak. Az építőiparban elvárt a BIM alapú tervezés alkalmazása, és ma már egyre elterjedtebb, hogy a BIM-alapú tervezés életciklus-elemzésekkel van összekapcsolva. Ennek lehetőségeiről és előnyeiről szóló cikk is megtalálható ebben a számban. A fenntarthatóbb fogyasztói döntéseket befolyásoló karbonlábnyom jelentőségéről is olvashatnak Olvasóink, egyetlen étel 30 technológiai változatának életciklus vizsgálati eredményének közreadásán keresztül. Bemutatásra kerül a korszerű ipari lézertechnológiák autóiipari alkalmazásának életciklus-értékelése és annak tradicionális hegesztési technológiával történő összehasonlításának eredménye is. Ugyanakkor egy gyógyszerhatóanyag kétféle gyártási technológiájának (savas és lúgos eljárás) LCA módszerrel történő összehasonlító értékelése is szerepet kap a jelenlegi számunkban.

Fogadják szeretettel a közreadott írásokat!

Tóthné Szita Klára

az LCA Center Egyesület elnöke

Tartalomjegyzék

Előszó.....	1
Dr. Mannheim Viktória:	
Mésző nedves őrlési folyamatára felállított energia-LCA modell.....	3
Virókné Szilágyi Krisztina, dr. Terjék Anita:	
BIM-alapú életciklus-elemzések lehetőségei.....	11
DR. AVATÓ, Judit, DR. ERDÉLYI, Éva, DR. D. BABOS, Zsuzsánna:	
LCA a fenntarthatóbb fogyasztói döntésekért.....	19
GÁL Balázs Sándor, BODNÁRNÉ SÁNDOR Renáta:	
Lézeres felrakóhegesztés (LMD) életciklus szempontú vizsgálata.....	33
Mérőné dr. Nótás Erika, Horváth Kitti Rózsa:	
Egy gyógyszerhatóanyag gyártási technológiáinak vizsgálata az LCA módszerével.....	43

Mészke nedves őrlési folyamatára felállított energia-LCA modell

Dr. Mannheim Viktória

tudományos főmunkatárs, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Miskolci Egyetem, viktoriamannheim@uni-miskolc.hu

Summary

Fine grinding of limestone is a frequently used process in the pharmaceutical, chemical, construction, food, and cosmetic industries. The main goal of this research work was to establish an energy and life cycle assessment integration model for grinding processes and to develop its methodology. In the first step, I examined the main grinding parameters of limestone in addition to changing the grinding time and the degree of mill filling ratio in order to set up an empirical energy model. The dry and wet grinding tests aimed at this were carried out in a laboratory Bond mill and a laboratory stirred ball mill. In the second step, I investigated the environmental effects of wet limestone grinding with a life cycle assessment using GaBi software. As a result of research, the determination of an empirical energy model allowed to development of an estimated particle size distribution and a relationship between grinding fineness and specific grinding energy. Regarding the life cycle assessment, I examined the environmental impacts on the mass of the useful product at different levels of specific energy. This research work sets up a new and integrated energy-LCA model using mathematical equations, which can improve the energy and environmental efficiency of grinding systems. Research results facilitate the industry to make predictions for a production-scale plant using an LCA of pilot grinding processes.

Keywords: limestone, fine grinding, Bond mill, stirred ball mill, particle size distribution, specific grinding work, life cycle assessment, energy-model

Kivonat

A mészke finom őrlési folyamata gyakran alkalmazott eljárás a gyógyszeriparban, a vegyiparban, az építőiparban, az élelmiszeriparban és a kozmetikai iparban. E kutatómunka fő célja az őrlési folyamatokra vonatkozó energia- és életciklus-értékelés integrálási modell felállítása és annak módszertanának kidolgozása volt. Első lépésben a mészke fő őrlési paramétereit vizsgáltam az őrlési idő és a malomtöltési fok változtatása mellett egy empirikus energiamodell felállítása céljából. Az erre irányuló száraz és nedves őrlési vizsgálatokat egy laboratóriumi Bond-malomban és egy laboratóriumi kevert golyósmalomban végeztem. Második lépésben a nedves mészkeőrlés környezeti hatásait vizsgáltam GaBi szoftverrel történő életciklus-értékeléssel. Az őrlési kutatásaim eredményeképpen felállított empirikus energiamodell lehetővé tette a becsült szemcseméret-eloszlás, valamint az őrlési finomság és a fajlagos őrlési energia közötti kapcsolat felírását. Az életciklus-értékelés vonatkozásában, a hasznos termék tömegére gyakorolt környezeti hatásokat a fajlagos energia különböző szintjein vizsgáltam. Ez a kutatómunka egy olyan új és integrált energia-LCA modellt állít fel matematikai egyenletek segítségével, ami által az őrlőrendszerek energetikai és környezeti hatékonysága javítható. A kutatási eredmények megkönnyítik a fenntartható technológia- és terméktervezést azáltal, hogy a bemutatott módszertani fejlesztéssel energetikai- környezeti előrejelzéseket készíthetünk üzemi őrlési folyamatokra.

Kulcsszavak: mészke, finom őrlés, Bond malom, keverő golyósmalom, szemcseméret-eloszlás, fajlagos őrlési munka, életciklus-értékelés, energiamodell

1. Bevezetés

Az anyagok finom őrlése több iparágban alkalmazott technológiai folyamat az ásványi anyagok feldolgozásától kezdve a gyógyszeriparban,

a vegyiparban, az építőiparban és az élelmiszeriparban át a hulladékfeldolgozásig, melynek alapvető célja a fajlagos felület növelése melletti szemcseméret-csökkentés és a fizikai

feltárás. A 10 μm alatti őrlemények az ipari alkalmazások egyik legfontosabb specifikációi. Az anyagok 5 μm -nél kisebb szemcseméretre történő őrlése pedig lehetővé teszi olyan készítmények kifejlesztését is, amelyek nagyobb oldhatósággal bírnak.

A mészke őrlőmalmokban történő finom őrlése fontos szerepet játszik a jövőbeli termékek fejlesztésében azáltal, hogy az őrlemény anyagfelülete előnyös és optimális változásokon megy keresztül az őrlés során. A mészkeőrlemény a gyógyszeriparban savkötőanyagként és kalciumion-bevitelre szolgál, illetve széles körben használják a víztisztításban, a füstgáz kéntelenítésében és a gazdaság egyéb területein is. Ugyanakkor a mészke széles körben használt cement adalékanyag az építőiparban. A mészke kalcinált agyagcementet Pillai és munkatársai [1] ideális anyagnak tekintik az alacsony környezeti hatású tartós beton fejlesztéséhez. A mészke reaktivitását jelentősen befolyásolja a szemcseméret azáltal, hogy a kisebb részecskeméretre nagyobb fajlagos felület tartozik, mely sajátosság különösképpen a cementiparban előnyös a meghatározott részecskeméretű és felületű termékek előállítására kapcsán Touil és szerzőtársai [2] szerint. Oti és Kinuthia [3] azt vizsgálták, hogy a mészke milyen előnyöket kínál az egyetemleges teljesítménynövelésben a térfogat stabilitásával és az általános tartóssággal az építőiparban.

Ma már számos kutatási eredmény áll rendelkezésünkre az őrlési folyamatok modellezésére vonatkozóan, sokszor szembe állítva a nedves és száraz őrlés eredményeit. Azonban nem találkoztam olyan szakirodalommal, ami a fajlagos őrlési energia és az őrlemény életciklusa között állítana fel összefüggést, javítva ezáltal az őrlési technológiák energetikai és környezeti hatékonyságát. Ebben a kutatómunkában az őrlési folyamatokra vonatkozó energiamodellek és életciklus-értékelési modellek integrálásának kutatási módszertanát dolgoztam ki és írtam fel matematikai egyenletek segítségével.

2. Kutatási előzmények

Az őrléstechnikai folyamatokat alapvetően több tanulmány jellemzi és írja le különböző modellezési módszereken keresztül. Az őrlési folyamatok modellezésének célja elsősorban a száraz és nedves őrlési folyamatok optimalizálásához kapcsolódik. Ugyanakkor rendelkezésre állnak olyan tudományos eredmények, amelyek az őrlés hatékonyságára és az alacsonyabb energiafogyasztásra összpontosítottak. Shin és munkatársai [4] az őrlőgolyó méretének és a porterhelésnek az őrlési hatékonyságra gyakorolt hatását vizsgálták. Az őrlési finomság és a fajlagos őrlési munka közötti kapcsolatot nedves őrlésre először 2011-ben írtam fel [5] matematikai egyenletek segítségével ércbányászati meddőhányóra. Kwade [6] tudományos megközelítései szerint az adott őrlési folyamat során megkülönböztethetők a malomhoz és a termékhez kötődő feszültségmodellek. Az anyagok finom őrlésében fontos szempont az elérhető végső részecskeméret. Karbstein és munkatársai [7] szerint a szemcseméret-eloszlást a geometriai és az üzemi jellemzők, az őrlőközeg sajátosságai (átmérő, sűrűség, keménység, töltési fok), valamint a feladott alapanyag tulajdonságai (keménység, koncentráció, sűrűség) befolyásolhatják.

A keverő golyósmalmok folyamatos vagy szakaszos üzemmódban működhetnek és változatos méretben léteznek. Parker és társai [8] a keverési sebesség és az őrlőtestek-terhelés energiafelhasználásra gyakorló hatását, Guner és munkatársai [9] pedig e paraméterek részecskéaprításra történő befolyását determinálták nedves őrlésre keverő-golyósmalomban kinetikus és mikrohidrodinamikai modelleken keresztül. Flach és Kwade [10] azt fogalmazták meg, hogy a keverő golyósmalmok fajlagos energiafogyasztásának csökkenése elsősorban a kisebb őrlőközeg alkalmazásának és a nagy energiaintenzitásnak köszönhető.

Alapvetően mind száraz, mind pedig nedves őrlési folyamatokra kidolgozhatók olyan értékelési modellek, melyek több szempont alapján tanulmányozzák az őrléstechnikai rendszereket.

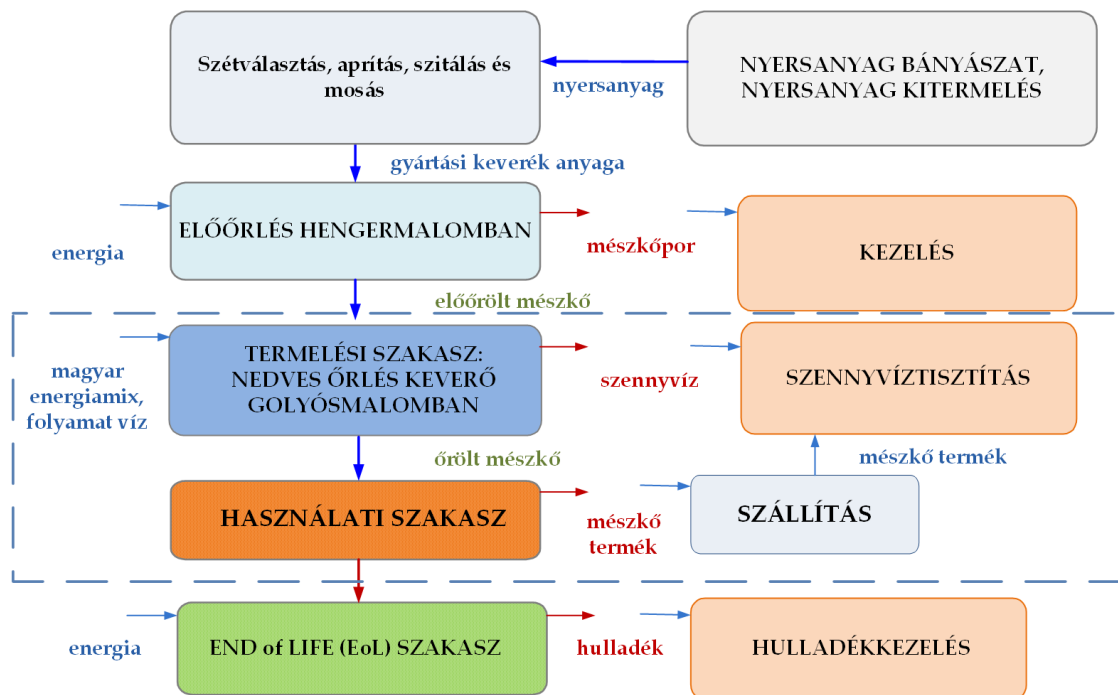
A különböző őrlési technológiákra felírt értékelési modelleknek egyértelműen jelezniük kell azokat az innovatív megoldásokat, amelyek megfelelnek a fenntartható fejlődés céljainak is. A jól kidolgozott értékelési modellek alapvetően teszik lehetővé a különböző technológiai megoldások összehasonlítását a gazdaságosság és energiahatékonyság szemszögéből a környezeti terhelések csökkentése mellett. Példaképpen, Kruszelnicka kutatómunkatársaival [11,12] környezeti hatékonysági mutatót, anyagenergia-hatékonysági mutatót és fenntartható emissziós indexet javasol az őrlési folyamatok környezeti értékelésére. Ugyanakkor egy ellenőrzési módszertant is kidolgoztak [12] az őrlés paramétereinek javítása érdekében, beleértve az energiafelhasználás csökkentését, a termékminőség javítását és az őrlési folyamat hatékonyságát is.

Az őrlési folyamatokra felírt értékelési modellek felállítására hatékonyan alkalmazható az életciklus-értékelés módszere. Az életciklus-megközelítés maximálisan alkalmazható száraz és nedves őrlési folyamatokra is. Van Leeuwen és kutatótársai [13] a mészkeve szemcseméretének a mechanikai tulajdonságokra és az életciklus-értékelésre gyakorolt hatását elemezték. Az őrlési folyamatok termékeinek teljes életciklusát három életciklus-szakasszal (gyártás, használat és életciklus-vége) jellemezhetjük, melynek során maga az őrlési folyamat vagy a gyártási szakaszban, vagy a hulladékká-válás szakaszában, vagy pedig mindkét életciklus-szakaszban megjelenik. Amíg a technológiai fejlesztések során elsősorban a gyártási szakaszt vesszük figyelembe (különös tekintettel a nyersanyagok életciklusára), addig a fizikai-mechanikai hulladékkezelési eljárásokat illetően, az életciklus-vége szakasz kerül előtérbe azáltal, hogy itt az eljárások megfelelő kiválasztására helyezük a hangsúlyt.

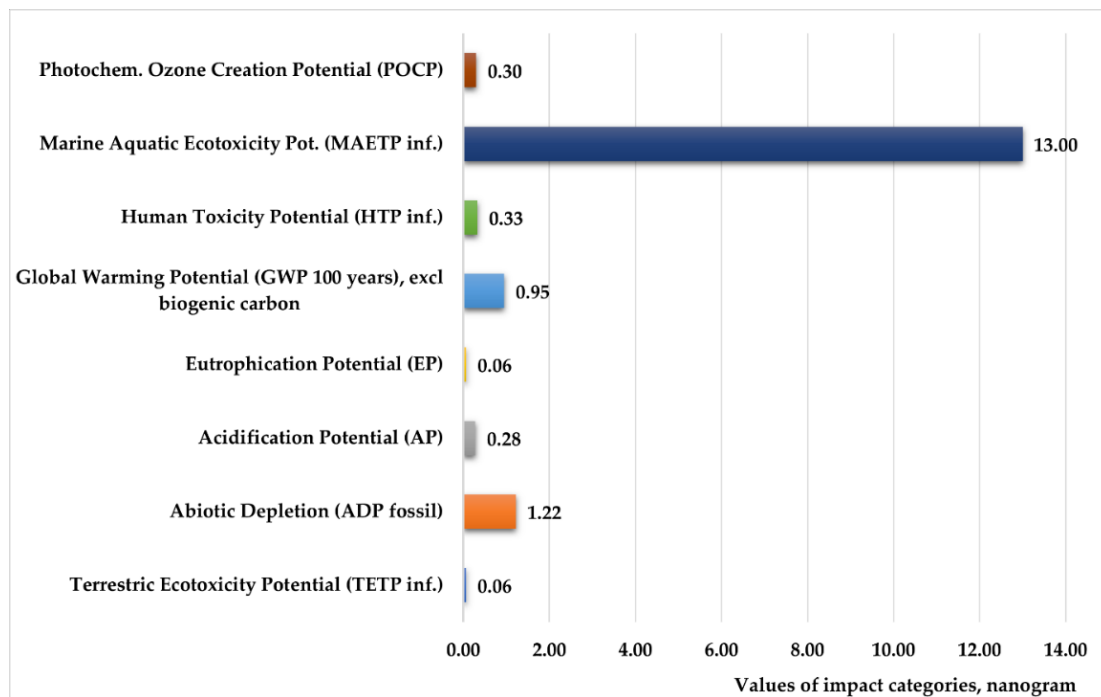
3. Őrlési vizsgálatok és életciklus-értékelés

Ez a kutatómunka elsősorban a mészkeve őrlési paramétereinek száraz és nedves finom őrlési eljárásokkal történő hatásainak vizsgálatára

irányult. Az elérhető részecskeméretet az őrlőmalmok geometriai és működési paraméterei, valamint az anyagtulajdonságok határozták meg. Az energiamodell felállítását hosszan tartó laboratóriumi száraz és nedves őrlési vizsgálatok előzték meg, melyek kapcsán az őrlési jellemzők (Bond-munkaindex, Hardgrove-index, Hardgrove-indexből számított Bond-munkaindex és fajlagos őrlési munka) száraz laboratóriumi Bond malomban történő meghatározását követően, empirikus úton írtam le a mészkeve-őrlemény viselkedését (becsült szemcseméret-eloszlási függvény, eloszlási kitevők változása az őrlési idő függvényében, termék medián és maximális szemcsemérete) nedves, laboratóriumi keverő-golyósmalomban. Ezután dimenzióanalízissel határoztam meg az energiafelhasználás értékeit és matematikailag körülírtam az őrlési finomság-őrlési idő és őrlési finomság-fajlagos őrlési munka közötti kapcsolatokat. Az életciklus-értékelési modelleket kizárólag nedves őrlési folyamatra állítottam fel GaBi szoftveres elemzéssel, ahol az őrlés környezeti hatásainak kiértékelésére hosszabb időt fordítottam. A funkcionális egységet 1 kg output mészkeve terméként határoztam meg. A konzisztens életciklus-leltárelemzés magában foglalta és számszerűsítette a vizsgált nedves őrlési folyamat input-output anyagáramlását és energiaellátását. A vizsgált őrlőrendszerek modellezéséhez termékspecifikus bemeneti információkat használtam és hazai energiamixet állítottam fel. A vizsgált LCA-modelleket bölcsőtől-kapuig állítottam fel, ami magába foglalta a nyersanyag ki-termelést, a laboratóriumi nedves őrlési folyamatot gyártási szakaszként, a keletkezett szennyvíz kezelését és az őrlemény szállítását is [14]. Példaképpen az *1. ábra* egy ilyen LCA-modelt mutat be mészkeve nedves őrlésére vonatkozóan. A nedves őrlési folyamatokra nyolc fő környezeti hatáskategóriát vizsgáltam GaBi 8.0 szoftver segítségével. Az alkalmazott normalizálási és súlyozási módszerek a vizsgált modellekre azonosak voltak CML 2016 hatásértékelési módszer alkalmazása mellett [15-17]. A laboratóriumi nedves mészkeve-őrlemény környezeti hatásait a *2. ábra* szemlélteti.



1. ábra: Bölcsőtől-kapuiig életciklus-értékelési modell rendszerhatárokkal mészkeő nedves őrlésére [14].



2. ábra. Mészkeő nedves laboratóriumi őrlésének környezeti hatása - normalizált és súlyozott hatáskategória értékek nanogrammban [14].

4. Energia-LCA integrációs modell felírása matematikai egyenletekkel

A kutatómunka befejező lépéseként energia-LCA integrálási modell került felállításra a környezeti hatások és a hasznos termék tömegére vonatkozó fajlagos energia közötti matematikai összefüggések által. Az alábbi matematikai egyenlet az őrlés által igényelt szemcseméretű termék tömegét (m_{xi}), azaz a hasznos terméktömeget írja le a termék becsült szemcseméret-eloszlása ($F(xi)$) és az őrlési folyamat teljes output tömegének (m_p) szorzataként:

$$\begin{aligned} m_{xi} &= m_p \cdot F(xi) \\ &= m_p \cdot \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{xi}{a}\right)^n\right] \right] \end{aligned} \quad (4.1)$$

A hasznos terméktömeg és az őrlési idő hányadosából (t_r) megkapjuk a hasznos termékre jutó fajlagos kapacitást:

$$Q_{xi} = \frac{m_{xi}}{t_r} = \frac{m_p \cdot F(xi)}{t_r} = \frac{m_p \cdot \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{xi}{a}\right)^n\right] \right]}{t_r} \quad (4.2)$$

A teljes output tömegről vonatkozó energiafelhasználást (EC) az őrlési finomság-fajlagos őrlési munka függvényből származtatott fajlagos őrlési munka (W_f) segítségével határoztam meg. Mészke nedves őrlésére vonatkozóan a matematikai egyenlet az alábbi:

$$EC = W_f \cdot m_p = \sqrt[0.19]{\frac{C_{mix}}{x_{50}}} \cdot m_p = m_p \cdot \sqrt[0.19]{\frac{C_{mix}}{a \ln(2)^n}} \quad (4.3)$$

A hasznos terméktömegre jutó fajlagos energiaszükséglet az alábbi egyenletekkel írható fel:

$$SEC_{xi} = \frac{EC}{m_{xi}} = \frac{Q_{xi}}{P} \quad (4.4)$$

$$SEC_{xi} = \frac{EC}{m_{xi}} = \frac{m_p \cdot \sqrt[0.19]{\frac{C_{mix}}{a \ln(2)^n}}}{m_p \cdot F(xi)} = \frac{\sqrt[0.19]{\frac{C_{mix}}{a \ln(2)^n}}}{1 - \exp\left[-\left(\frac{xi}{a}\right)^n\right]} \quad (4.5)$$

Amennyiben feltételezzük azt, hogy az életciklus-értékelés során a funkcionális egység meg-egyezik a hasznos terméktömeggel, akkor modellezhetjük a környezeti hatások változását a hasznos termékre jutó fajlagos energiára vonatkozóan. Következésképpen, megkaphatjuk a hasznos terméktömegre vonatkozó környezeti hatásokat a különböző fajlagos energiaszintekhez. E célból olyan közelítő függvényt is illeszthetünk, amellyel megkaphatjuk például a széndioxid kibocsátási potenciál/kg hasznos termék függvényt a fajlagos energia függvényében.

5. Összefoglalás

Az őrléstechnika egy nagyon aktuális fejlesztési terület számos iparágban, melynek innovációja az Európai Unió versenyképességét segítheti. Az őrlési technológiák és az őrlémények innovatív fejlesztése által, egyrészt, csökken a felhasznált anyag- és energiaigény, másrészt pedig az őrlési folyamatokat alapvetően egy kisebb környezetterhelés jellemzi. Ebből kifolyólag, az alapvetően költséges, de ugyanakkor a környezetterhelés és energiafelhasználás redukálásával járó őrléstechnológiai innováció érdeke kell, hogy legyen minden gazdasági szereplőnek. Ez a kutatómunka egy olyan új energia-LCA integrálási modellt állít fel, amely lehetővé teszi az egyes iparágak számára azt, hogy előrejelzéseket készíthessünk üzemi őrlési folyamatokra az őrlőrendszerek energetikai és környezeti hatékonyságának javítása mellett.

References

1. R.G. Pillai, G. Ravindra, M. Santhanam, S. Rengaraju, Y. Dhandapani, S. Rathnarajan, A.S. Basavaraj: Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3). *Cement and Concrete Research* 2019, 118, 111-119. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.11.019
2. D. Touil, S. Belaadi, C. Frances: The specific selection function effect on clinker grinding efficiency in a dry batch ball mill. *International Journal of Mineral Processing* 2008, 87, 141-145. doi: 10.1016/j.minpro.2008.02.003
3. J. E. Oti, J. Kinuthia: The Development of Stabilised Clay-Hemp Building Material for Sustainability and Low Carbon Use. *Journal of Civil Engineering and Construction* 2020, 9 (4), 205-214. doi: 10.32732/jceec.2020.9.4.205
4. H. Shin, S. Lee, H.S. Jung, J-B. Kim: Effect of ball size and powder loading on the milling efficiency of a laboratory-scale wet ball mill. *Ceramamics International* 2013, 39, 8963-8968. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.04.093
5. V. Mannheim: Empirical and scale-up modelling in stirred ball mills. *Chemical Engineering Research and Design* 2011, 89/4, 405-409. doi: 10.1016/j.cherd.2010.08.002
6. A. Kwade: Mill selection and process optimization using a physical grinding model. *International Journal of Mineral Processing* 2004, 74, 93-101. doi: 10.1016/j.minpro.2004.07.027
7. H. Karbstein, F. Müller, R. Polke: Scale-up for grinding in stirred ball mills. *Aufbereitungs-Technik* 1996, 37 (10), 469-479.
8. N. Parker, M. Rahman, E. Bilgili: Impact of media material and process parameters on breakage kinetics-energy consumption during wet media milling of drugs. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 2020, 153, 52-67. doi: 10.1016/j.ejpb.2020.05.024
9. G. Guner, D. Yilmaz, E. Bilgili: Kinetic and Microhydrodynamic Modeling of Fenofibrate Nanosuspension Production in a Wet Stirred Media Mill. *Pharmaceutics* 2021, 13, 1055. doi: 10.3390/pharmaceutics13071055
10. F. Flach, S. Breitung-Faes, A. Kwade: Scaling Wet Fine Grinding Processes of Organic Particles Using Stirred Media Mills. *Chemie Ingenieur Technik* 2017, 89, 1051-1059. doi: 10.1002/cite.201600148
11. W. Kruszelnicka, J. Hlostá, J. Diviš, L. Gierz: Study of the Relationships between Multi-Hole, Multi-Disc Mill Performance Parameters and Comminution Indicators. *Sustainability* 2021, 13, 8260. <https://doi.org/10.3390/su13158260>
12. W. Kruszelnicka, R. Kasner, P. Baldowska-Witos, J. Flizikowski, A. Tomporowski: The Integrated Energy Consumption Index for Energy Biomass Grinding Technology Assessment. *Energies* 2020, 13, 1417. doi: 10.3390/en13061417
13. R. van Leeuwen, Y-J. Kim, V. Sriraman: The Effects of Limestone Powder Particle Size on the Mechanical Properties and the Life Cycle Assessment of Concrete. *Journal of Civil Engineering Research* 2016, 6(4), 104-113. doi: 10.5923/j.jce.20160604.03
14. V. Mannheim, W. Kruszelnicka: Energy-Model and Life Cycle-Model for Grinding Processes of Limestone Products. *Energies* 2022, 15, 3816. doi: 10.3390/en15103816
15. [CML] Institute of Environmental Sciences, Leiden University. CML-IA Characterisation Factors Portal [Internet]. 2016. Available online: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/researchoutput/science/cml-ia-characterisation-factors> (accessed on 29 June 2018).
16. [Gabi 9.2] Sphera, Stuttgart, Leinfelden-Echterdingen. Sphera Gabi 9.2 software-system and databases for life cycle engineering [Internet]. 2019. Available online: <https://www.gabi-software.com> (accessed on 12 June 2019).
17. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. ISO/TR 14044:2006. Geneva, Switzerland.

Dr. Mannheim Viktória



Mannheim Viktória 1996-ban gépészmérnöki, 1997-ben okl. előkészítéstechnika-mérnöki, 2000-ben mérnök-közgazdász oklevelet szerzett a Miskolci Egyetemen. 1997-2008 között a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás-technikai Intézetének doktorjelöltje. Diplomatervét és PhD kutatásainak nagyobb részét a Berlini Műszaki Egyetemen készítette. PhD fokozatát 2005-ben szerezte meg a Műszaki Földtudományok területén. 2000-2008 között a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás-technikai Intézet oktatója. 2008-2014 között az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet egyetemi adjunktusa, majd docense. Főbb szakterületei: hulladékgazdálkodás, mechanikai eljárás-technika, LCA, környezetmenedzsment. 2018-2022 között a Miskolci Egyetem Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központjának tudományos főmunkatársa és az ME-LCA kutatócsoport vezetője. 2022 áprilisától a Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet tudományos főmunkatársa. 1998-2018 között a „Hulladékgazdálkodási tanácsadó” és a Környezetvédelmi jogszabályok és nyomtatványok gyűjteménye” Dashöfer kiadványok szerzője és főszerkesztője, illetve a „Hulladéksors” folyóirat állandó szerzője. 2019 évtől 11 nemzetközi folyóirat állandó lektora, 3 nemzetközi folyóirat vélemény szerkesztője és vendégszerkesztője, illetve az Energies c. folyóirat Lectori Bizottságának tagja. 2022 januárjától a „Zöld Ipar Magazin” rovatvezetője, az LCA Center Egyesület tagjaként az ECO-MATRIX Szerkesztő Bizottságának tagja, valamint a Debreceni Egyetem Műszaki Karának és a Budapesti Gazdasági Egyetemnek a vendégoktatója.

BIM-alapú életciklus-elemzések lehetőségei

Virókné Szilágyi Krisztina, BIM menedzser, ÉMI Nonprofit Kft., kszilagyi@emi.hu
Dr. Terjék Anita, senior kutató, ÉMI Nonprofit Kft., aterjek@emi.hu; egyetemi docens, BME
Építőmérnöki Kar

Summary

Demands for the preparation of life cycle assessments in the design phase are increasing due to legitimate concerns caused by the environmental effects of the construction industry. With the spread of building information modeling (BIM), the construction sector is undergoing an important digitization process, so nowadays it is possible to integrate LCA data during planning supported by the BIM methodology. The key to successful integration is choosing the right workflow type and tools. The methods and software used by the design team and the LCA specialist, the tools available for information exchange, the availability of LCA data and the purpose of the analysis must be taken into account. It is also recommended to consider the need for iterative planning. Based on the above, a suitable work process for all participants can be developed. Our aim is to provide a comprehensive picture of the BIM-LCA integration possibilities, as well as to describe and compare the various BIM-based work processes that can be used in the preparation of life cycle assessment of buildings.

Keywords: building information modelling (BIM), life cycle assessment (LCA, construction industry

Kivonat

Az életciklus-elemzések tervezési fázisban való elkészítésére egyre növekvő igények jelentkeznek az építőipar környezeti hatásai okozta jogos aggodalmak miatt. Az építményinformációs-modellezés (BIM) térhódításával az építőipari ágazat fontos digitalizációs folyamaton megy keresztül, így napjainkban a BIM módszertannal támogatott tervezés során lehetőség nyílik az LCA-adatok integrálására. A sikeres összekapcsolás kulcsa a munkafolyamat típusának és eszközeinek megfelelő kiválasztása. Figyelembe kell venni a tervezőcsapat, illetve az LCA-szakember által használt módszereket és szoftvereket, az információcseréhez rendelkezésre álló eszközöket, az LCA-adatok elérhetőségét és az elemzés célját. Továbbá javasolt átgondolni az iteratív tervezés szükségességét is. Az előbb felsoroltak alapján kidolgozható egy minden résztvevő számára megfelelő munkafolyamat. Célunk, hogy átfogó képet adjunk a BIM-LCA integrációs lehetőségekről, valamint az épületek életciklus-elemzésének elkészítésénél alkalmazható különböző BIM-alapú munkafolyamatok ismertetése és összehasonlítása.

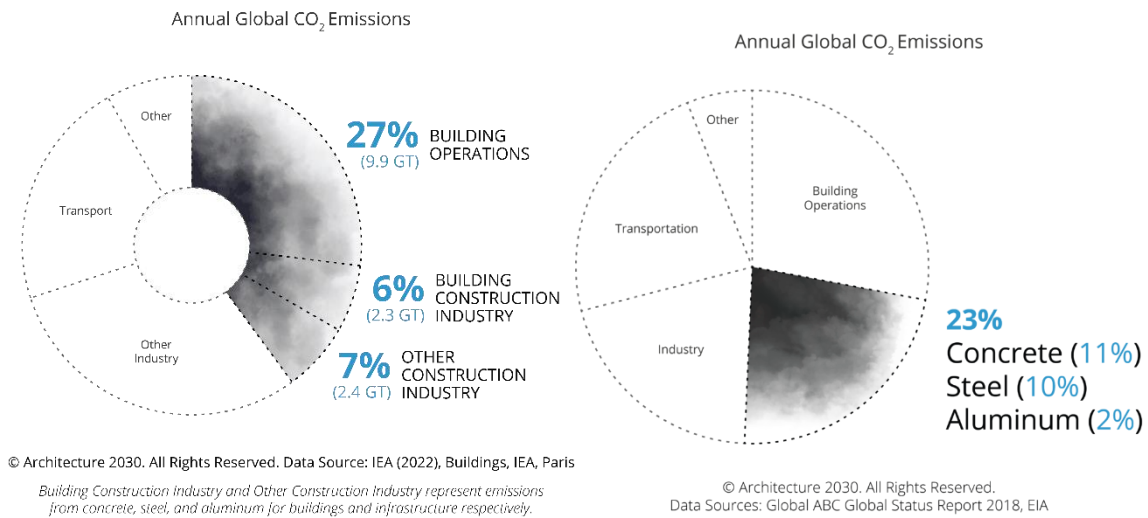
Kulcsszavak: építményinformációs-modellezés (BIM), életciklus-értékelés (LCA), építőipar

Bevezetés

Napjainkban az AEC (Architecture, Engineering, Construction, magyarul: építészet, mérnöki tevékenység, kivitelezés) szektornak számos kihívással kell szembenéznie. Amellett, hogy az építőipar digitalizációs folyamatai a többi iparági szereplőhöz képest rendkívül elmaradtak, az építőiparnak igen nagy szerepe

van az antropogén hatások által is okozott globális klímaváltozásban. Az éves globális CO₂-kibocsátás 40%-áért az épített környezetünk felelős. Az összes kibocsátás 27%-áért az épületek üzemeltetése, 13%-áért pedig az épületek és egyéb infrastrukturális

létesítmények építőanyagai és kivitelezése a felelős (1. ábra) (Architecture 2030, 2022).



1. ábra Az éves globális CO₂-kibocsátás megoszlása iparáganként a Nemzetközi Energia Ügynökség 2022. évi jelentése alapján (Architecture 2030, 2022) (balra) és a cement-, acél- és alumíniumiparból származó éves globális CO₂-kibocsátás mértéke a Nemzetközi Energia Ügynökség 2018. évi jelentése alapján (Architecture 2030, 2022) (jobbra)

Az épületeink üzemeltetési gyakorlatainak átgondolásán túl figyelembe kell venni az építőanyagok előállításával és beépítésével, valamint az épületek karbantartási és bontási folyamataiból származó hulladékok kezelésével keletkező környezeti hatásokat. A BIM (Building Information Modelling, magyarul:

építményinformációs modellezés vagy építményinformációs menedzsment) módszertan megfelelő alkalmazása nemcsak a tervezési és a kivitelezési, hanem az üzemeltetési és a bontási folyamatokat is támogathatja, ezáltal biztosítva egy élhetőbb, egészségesebb és fenntarthatóbb jövőt.

Az életciklus-elemzések jelentősége

Az építőanyagok leginkább műszaki, gazdasági és esztétikai szempontok alapján kerülnek megválasztásra, napjainkban azonban azok környezeti hatásai sem hagyhatók figyelmen kívül (Terjék és Dudás, 2020). Annak tudatában, hogy a globális kibocsátások milyen nagy hányadáért felelős az építőanyag-gyártás, az épületek üzemeltetése és maga az épített környezetünk, kiemelt figyelem fordítandó az életciklus-elemzés, életciklus-értékelés (Life Cycle Assessment, röviden: LCA) fogalmára. Az életciklus-értékelés az MSZ EN

15804:2012+A2:2020 magyar szabvány szerint: „Egy termékrendszerhez tartozó bemeneti, kimeneti és a lehetséges környezeti hatások összeállítása és kiértékelése a termék teljes életciklusa során.”

Az építési termékek környezeti értékelésére és az anyagok fenntarthatóságának meghatározására az LCA napjainkban a legmegalapozottabb és legszélesebb körben alkalmazott módszer (Terjék és Dudás, 2020). Segítségével számszerűsíthető egy termék teljes élettartama alatt okozott környezeti terhelés,

tartalmazva az energiajellegű kibocsátásokat és a természeti erők felhasználását is (Miskolci Egyetem–FIEK, 2022). Az LCA döntéstámogató eszközként való alkalmazásán túl használható termékfejlesztésre és javításra, belső stratégiai tervezés támogatására, kommunikációs és marketing célokra, valamint közigazgatási stratégiák meghatározására is. Az elemzés eredménye által számszerűsíthető a vizsgált rendszer anyag-és energiaigénye továbbá az előbbiek környezeti hatása. Megállapíthatók a termék vagy folyamat életciklusán belüli legnagyobb mértékű környezeti hatást okozó pontok (LCA Center, 2022). Az LCA készítésének módszere rendkívül komplex feladat, mely ráadásul költség- és időigényes, továbbá az elkészítéséhez használható és szükséges adatbázisok megbízhatósága rendkívül eltérő.

Az építményinformációs-modellezés (BIM)

Az építményinformációs-modellezés (BIM) meghatározó mozgatórugója az építőipar digitalizációs fejlődésének.

„A BIM olyan CAD-alapú tervezésmódszertani folyamatok és irányelvek alkalmazásának összessége, amely lehetővé teszi az építmények létrehozásában és üzemeltetésében érdekelt szereplők (építetők, tervezők, kivitelezők, üzemeltetők) számára a valóságnak megfelelő virtuális térben történő együttműködést és információátadást, illetve a releváns adatok

Az MSZ EN 15804:2012+A2:2020 szabvány biztosítja az építési termékek, szolgáltatások és folyamatok környezetvédelmi terméknyilatkozatának (EPD, Environmental Product Declarations) harmonizált alkalmazását. A környezetvédelmi terméknyilatkozat egy gyártó által kiadott, részletes műszaki leírást tartalmazó nyilatkozat, melynek alapja az adott termékre vonatkozó életciklus-elemzés. Az EPD alapján számszerűsíthető egy építőipari termék környezetre gyakorolt hatása (Wastiels és Decuypere, 2019). Az épületek EPD-k alapján történő életciklus-elemzése részletes, átlátható képet ad, ezáltal megkönnyítve például a beépített karbon tartalmának vagy a használati szakaszban várható CO₂-kibocsátás értékének meghatározását.

gyors és hatékony megjelenítését” (Zagorác és Szabó, 2019).

A BIM-dimenziók megismerésével és definiálásával könnyebben meghatározható egy projekt BIM-modelljének információszükséglete. A modell rengeteg különböző típusú információval felruházható. Az egyes adatok csoportosításával 5 különböző BIM-dimenzió határozható meg (3D–7D), mely követi egy építési projekt ütemezését is (2. ábra).



2. ábra BIM-módszertan lehetséges alkalmazási területei (saját szerkesztés (Schoen, 2019) alapján)

A 3D BIM-modell az alapja minden további dimenzióknak. Ez a modell egy épületelemekből álló, többletinformációval ellátott háromdimenziós modell. Az egyes elemek egyedi azonosítóval rendelkeznek, ezáltal anyagmennyiségük kiszámítható. A 4D BIM-modell esetében az egyes anyagokhoz idő-típusú információ rendelhető, ennek segítségével a kivitelezési idő és az ütemezés is meghatározható és szemléltethető. A 3D és 4D BIM-modell kivitelezési költségekkel való kiegészítésével létrejövő 5D BIM-modell alkalmas költségbecslés, költségvetés és pénzügyi ütemezés készítésére. Amennyiben a 3D BIM-modell elemeit energetikai

információval látjuk el, a keletkező 6D BIM-modell alkalmas energetikai analízisek, fenntarthatósági számítások és életciklus-elemzések készítésére, akár egy beépülő modullal (plug-in), akár egy BIM-modell olvasására alkalmas szoftverrel. A 3D BIM-modellhez megfelelően társított üzemeltetési, karbantartási, garanciális adatokkal a 7D BIM-modell a létesítménygazdálkodási folyamatokat és az azokhoz tartozó rendszereket képes támogatni (Zagorác és Szabó, 2019). A felsorolt adat- és információ-típusokon kívül egy adott projekthez szükséges információk könnyedén hozzárendelhetők a modellhez.

A BIM-modellek felhasználási lehetőségei az életciklus-elemzésekben

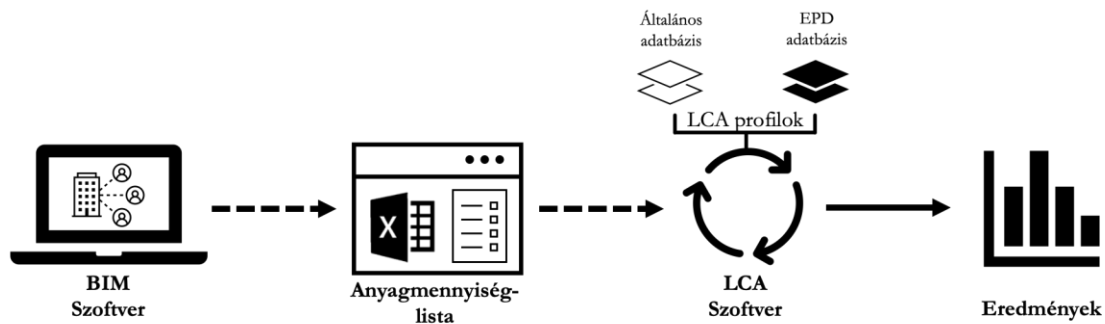
Egy létesítmény tervezése során javasolt figyelembe venni a környezeti kritériumokat és integrálni a BIM modellt az életciklus-elemzésekkel már a projektek döntéshozatali folyamatainak elején annak érdekében, hogy holisztikus áttekintést kapjunk az adott projektről, valamint annak érdekében, hogy a fenntarthatósági kritériumoknak megfelelő épületek számát növelni tudjuk. Wastiels és Decuypere a 2019-ben készült tanulmányukban

5 stratégiát azonosítottak a BIM-modellek és az életciklus-elemzés integrálására (3. ábra-7. ábra).

Az első stratégia (3. ábra) alkalmazásánál a BIM-modellből egy BoQ (Bill of Quantities, magyarul: mennyiséglista) előállításával anyagmennyiségi listát hoznak létre, mely az LCA-szoftverbe importálható. Az LCA-szoftverben általános adatbázisok vagy EPD-adatbázisok értékei manuálisan társíthatók az

egyres anyagokhoz. Az adatok kiegészíthetők további, a BIM-modellben nem tárolt

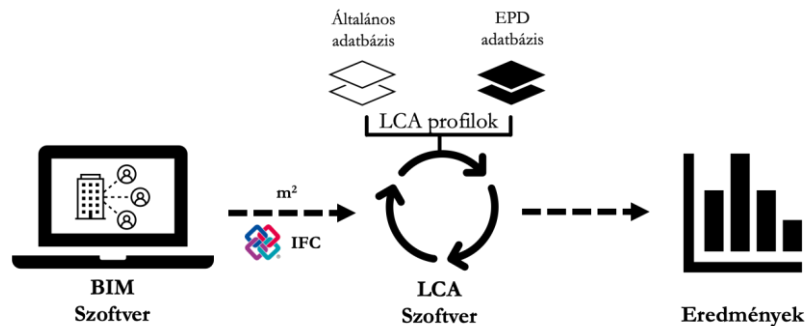
információval. Az életciklus-elemzés eredménye az LCA-szoftverből származik.



3. ábra A BIM-modell és az LCA-adatok integrálásának folyamata az 1. stratégia szerint (saját szerkesztés)

A második azonosított stratégia használata során a BIM-modell anyagmennyiségeit egy IFC-konverzió segítségével közvetlenül az LCA-szoftverbe lehet importálni. Az anyagmennyiségekhez itt is manuálisan

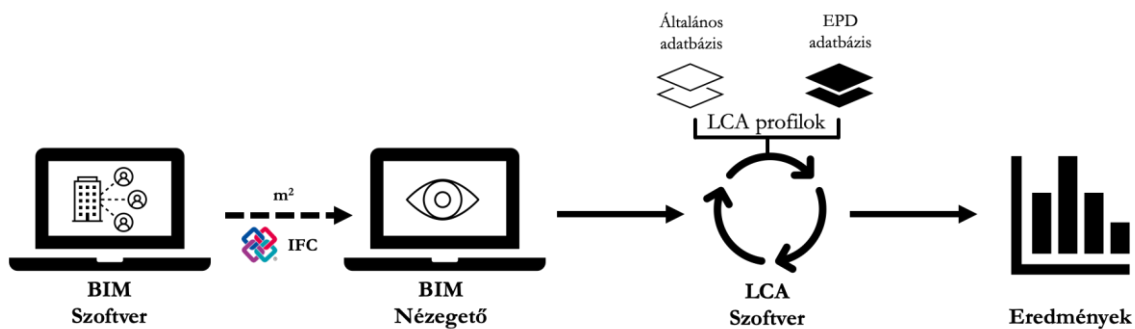
kapcsolhatók az egyes általános vagy EPD-adatbázisból származó LCA-adatok (4. ábra). Az eredmények az LCA-szoftverből származnak.



4. ábra A BIM-modell és az LCA-adatok integrálásának folyamata az 2. stratégia szerint (saját szerkesztés)

A harmadik stratégiában a folyamat egy lépéssel kiegészül a második stratégiához képest: a BIM-modell IFC-konverzióval egy úgynevezett BIM-nézegető szoftverbe kerül betöltésre, és így a BIM-nézegető adatbázisában található LCA-adatok már a modellben összekapcsolhatók az egyes anyagokkal. Ezután a fájl importálható az LCA-szoftverbe, ahol a még hiányzó LCA-adatok

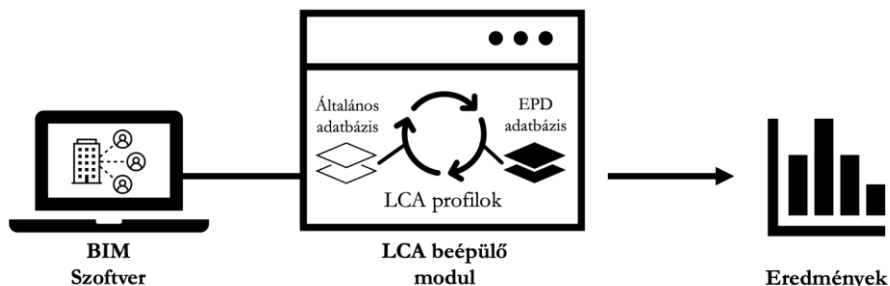
hozzákapcsolhatók az anyagokhoz, illetve kiegészíthetők további, a modellben nem tárolt anyaggal és mennyiséggel (5. ábra). Az eredmények szintén az LCA-szoftverből származnak. Erre a gyakorlatra jó példa a francia EPD-adatokat tartalmazó BIM-nézegető, az eveBIM-viewer és az Elodie LCA-szoftver.



5. ábra A BIM-modell és az LC- adatok integrálásának folyamata az 3. stratégia szerint (saját szerkesztés)

A negyedik típusú lehetőség a BIM-modell és az LCA-adatok összekapcsolására, ha az alkalmazott modellező szoftver rendelkezik LCA beépülő modullal, LCA-plugginnal. Ekkor egy szoftverkörnyezetben történik a modellezés és az LCA-adatok társítása is, továbbá az

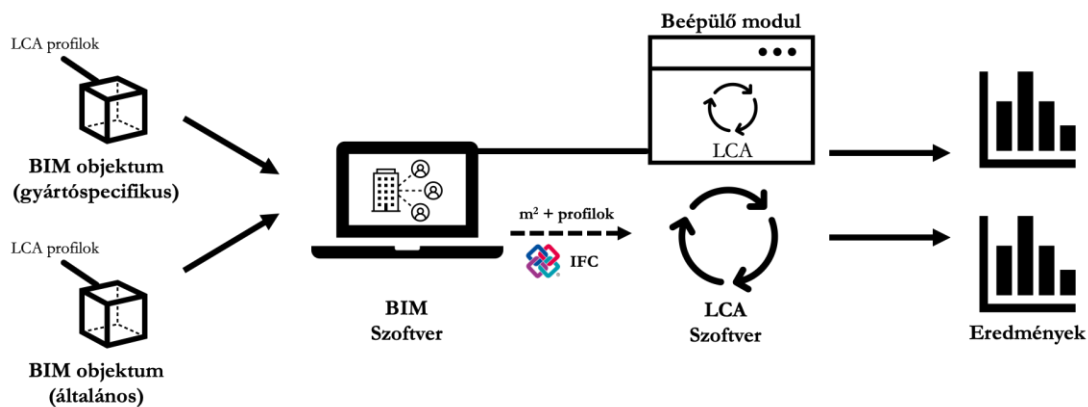
életciklus-elemzés eredményei is a beépülő modulból származnak (6. ábra). A Revit egy olyan BIM-munkafolyamatokat és modellezést támogató szoftver, amelyhez rendelkezésre áll a One Click LCA életciklus-elemző szoftver beépülő modulja.



6. ábra A BIM-modell és az LCA-adatok integrálásának folyamata az 4. stratégia szerint (saját szerkesztés)

Az ötödik stratégia szerint már a modellezési fázisban olyan objektumokat alkalmaznak, melyek rendelkeznek LCA-adatokkal, akár gyártó-specifikusan is. A modell megépítése után egy beépülő modul segítségével vagy egy IFC-konverzió általi külön LCA-szoftverbe való importálással elkészíthető az életciklus-elemzés. E stratégia alkalmazásához azonban

olyan BIM-objektum-adatbázisra van szükség, amely tartalmazza az LCA-adatokat (7. ábra). Erre kifejlesztett nyilvános adatbázis még nem elérhető, tehát ha ezt a stratégiát szeretnénk alkalmazni, először egy LCA-adatokkal ellátott BIM-adatbázist kell létrehozni, ami jelentős időt vehet igénybe.



7. ábra A BIM-modell és az LCA-adatok integrálásának folyamata az 5. stratégia szerint (saját szerkesztés)

A BIM-módszertan zöldépület-tanúsítványok megszerzése érdekében történő alkalmazása kifejezetten növeli a minősítési folyamat hatékonyságát annak bevezetése során jelentkező kihívások ellenére (Romano és Riediger, 2019). A BIM-modellben tárolt, megfelelő minőségű és formátumú adatok elősegíthetik és gyorsíthatják a zöldépület minősítési folyamatokat. A modell és a segítségével végezhető számtalan analízis már a tervezési fázisban is segíti a fenntartható tervezést, figyelembe véve például az egyik zöldépület-minősítő rendszer kritériumait és az azokhoz tartozó minimumértékeket. Meglévő épületek esetén döntéstámogató szereppel bír a különböző megoldások egyszerűbb összehasonlíthatósága révén, így egy elérni kívánt zöldépületminősítési rendszer követelményeit szem előtt tartva lehet költségoptimalizált és „zöld” felújítást, átalakítást, korszerűsítést előkészíteni és megvalósítani. Az a tény, hogy egy új épület BIM-modelljének előállítása szinte mindig

egyszerűbb, itt is érvényesül, hiszen új épület tervezése esetén lehetőség van olyan anyagok és technológiák megválasztására, melyek rendelkeznek a későbbi minősítéshez szükséges adatokkal.

Számos eszköz - BIM-szoftverek beépülő moduljai és egyéb, az épületek elemzésére és szimulációkészítésre használható program - van jelen a piacon, amely a zöldépület-minősítési folyamatok támogatására alkalmazható. Az integrálási folyamat előnye az automatizált dokumentáció létrehozásán túl a csapatok közötti hatékony kommunikáció és információcsere, továbbá a zöldépület-minősítési kritériumok tervezési fázisba való beillesztése. Hátrányai közé sorolhatók a magas költség- és időigények, valamint, hogy a minősítési kritériumok és követelmények csak egy része illeszthető jelenleg BIM-módszertanba (Romano és Riediger, 2019). Az említett hátrányok a megfelelő technológiai fejlődéssel és a módszertan részletesebb kidolgozásával enyhülhetnek

Összefoglalás

A BIM-módszertan alkalmazását az építőipar digitalizációjának elősegítése mellett a tudatos, életciklus-szemléletű tervezés és a fenntartható épített környezet létrehozása is indokolja.

Fontos a rezilienciára, azaz a rugalmas alkalmazkodásra való törekvés az épületek tervezése, kivitelezése és üzemeltetése során is. A tervezéskori megfelelő anyagválasztás, az előírásoknak megfelelő beépítés és az üzemeltetési fázisban történő folyamatos nyomon követés az előre tervezett és az előre nem tervezett karbantartások végrehajtásának hatékonyságát támogatják. Ezzel az épületszerkezetek, berendezések és így az egész épület élettartama növelhető. A beépítendő anyagok környezetterhelésének figyelembevételével csökkenthető a beépített karbantartalom. A tudatos és pontosabb anyagszükséglet felmérése költségmegtakarítást eredményezhet, valamint segít a pazarlás elkerülésében is. Ezek az anyagszükségletek BIM-modellben való meghatározásával a különböző scenáriók összehasonlíthatók, ez pedig megkönnyíti a döntéshozatalt üzemeltetői részről is. A fenntarthatósági szempontok szerinti összehasonlításhoz olyan anyagok kiválasztása szükséges, melyek környezeti terheléssel kapcsolatos információi elérhetők. Ehhez leginkább EPD-kre, Környezetvédelmi

Terméknyilatkozatokra van szükség, azonban Magyarországon nincsen egységes adatbázis a hazai építési termékek EPD-jéről, illetve az elkészült hazai EPD-k száma is rendkívül alacsony.

Az energetikai követelményeket teljesítve (és felülmúlva) javítható az épületek energiahatékonysága, ami költségmegtakarító hatása mellett hozzájárul a zöldépület-minősítések megszerzéséhez. Ezen célok elérése is ösztönzően hat egy épület BIM-modelljének elkészítésére. A használati szakaszban felmerülő üzemeltetési költségek és az üzemeltetésből származó kibocsátások is racionalizálhatók az életciklus-szemléletű tervezési szempontok figyelembevételével. Egy épület BIM-modellje támogatja egy LCA-elemzés elkészítését, amellyel azonosíthatók az életciklusán belüli nagy környezetterhelést okozó szakaszok.

Az új létesítmények BIM-módszert alkalmazó, életciklus-szemléletű tervezésével, kivitelezésével és üzemeltetésével párhuzamosan kifejezetten fontos a meglévő épületállományunk felmérése, BIM-modellezése, valamint fenntartható üzemeltetése és karbantartása az épített környezet révén is okozott antropogén hatások csökkentése, így a globális éghajlatváltozás mérséklése érdekében is.

Irodalom

Architecture 2030, <https://architecture2030.org/why-the-building-sector>, Hozzáférés dátuma: 2022.10.13.

CEN Európai Szabványügyi Bizottság, MSZ EN 15804:2012+A2:2020 Építmények fenntarthatósága. Környezetvédelmi terméknyilatkozat. Építési termékek kategóriáját meghatározó alapvető szabályok, Magyar Szabványügyi Testület, 2020.

LCA Center, <https://lcacenter.hu/az-lca-alkalmazasa/>, Hozzáférés dátuma: 2022.10.13.

Miskolci Egyetem - FIEK, <https://fiek.uni-miskolc.hu/szervezet/lca-kutacsoport/>, Hozzáférés dátuma: 2022.11.23.

J. Schoen, <https://axissteel.com/bim-vdc-whats-the-difference/>, Axis Steel, 21 10 2019. Hozzáférés dátuma: 2022.12.02.

S. Romano és N. Riediger, „BIM as a tool for Green Building Certifications: an evaluation,” Journal of Physics: Conference Series, 2019.

A. Terjék és A. Dudás, „Sustainability and Environmental Awareness in the Ceramic Industry: Product Development and Life Cycle Approaches for Glazed Tiles,” *European Journal of Engineering Research and Science*, pp. 970-979, August 2020.

L. Wastiels és R. Decuypere, „Identification and comparison of LCA-BIM integration strategies,” 2019.

M. Zagorác és B. Szabó, *BIM-kézikönyv*, 2. kiadás, 1. kötet, Budapest: Lechner Nonprofit Kft., 2019.

Szerzőink:



Virókné Szilágyi Krisztina építőmérnök (BSc), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán szerezte diplomáját építményinformációs modellezés és menedzsment specializáción, 2023-tól az ÉMI Nonprofit Kft. BIM menedzsere, a Magyar Szabványügyi Testület Építményinformációs modellezés (BIM) Műszaki Bizottságának tanácskozási jogú szakértője.



Dr. Terjék Anita, PhD okleveles építőmérnök, az építőmérnöki tudományok doktora. 2006-tól az ÉMI Nonprofit Kft. munkatársa, több mint 10 éves szakmai tapasztalattal rendelkezik építőanyagok laboratóriumi vizsgálata terén, emellett minőségügyi megbízott és belső auditor. Jelenleg hazai és nemzetközi kutatás-fejlesztési és innovációs projektek szakmai támogatásában vesz részt. A BME Építőmérnöki kar Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén egyetemi docenseként a magyar és angol nyelvű képzésben oktat. Kutatási területe: építési termékek, anyagtani és szerkezeti tulajdonságok, csúszásátlás; innovatív anyagok és megoldások, valamint fenntarthatóság és életciklus szemlélet az építőiparban; környezeti szempontú termékfejlesztés, termékgyártás környezettudatos kialakítása. Az MSZT Magyar Szabványügyi Testület több műszaki bizottságainak tagja és elnöki feladatokat is ellát.

LCA a fenntarthatóbb fogyasztói döntésekért

DR. AVATÓ, Judit [1], DR. ERDÉLYI, Éva [2], DR. D. BABOS, Zsuzsanna [3]

[1] főiskolai docens, BGE KVIK, 1054 Budapest Alkotmány utca 9-11, lovasneavato.judit@uni-bge.hu

[2] egyetemi docens, BGE KVIK, 1054 Budapest Alkotmány utca 9-11, SzaboneErdelyi.Eva@uni-bge.hu

[3] egyetemi adjunktus, ELTE PPK, 1075 Budapest, Kazinczy u. 23-27, babos.zsuzsanna@ppk.elte.hu

Abstract

Sustainability is becoming an increasingly important motivator for consumer choices. Its growing role also raises expectations about its measurement demands on its performance. In the first phase of the research, we calculated the carbon footprint of different ways of preparing the same product. In the second we examined whether and under what conditions the consumers' decisions are influenced by the values of the different scenarios.

Keywords: sustainability, carbon footprint, food waste, consumer behaviour

Kivonat

A fogyasztói döntések motivációi között egyre nagyobb szerepet kap a fenntarthatóság. Növekvő szerepe a mérésével szemben támasztott elvárásokat is fokozza. A kutatás első szakaszában a karbonlábnyomuk alapján ugyanazon termék különböző elkészítési módjának határoztuk meg a fenntarthatóságát. A második szakaszban azt vizsgáltuk, hogy a kapott értékek befolyásolják-e, és milyen feltételek mellett a fogyasztók döntéseit.

Kulcsszavak: fenntarthatóság, karbonlábnyom, élelmiszerpazarlás, fogyasztói magatartás

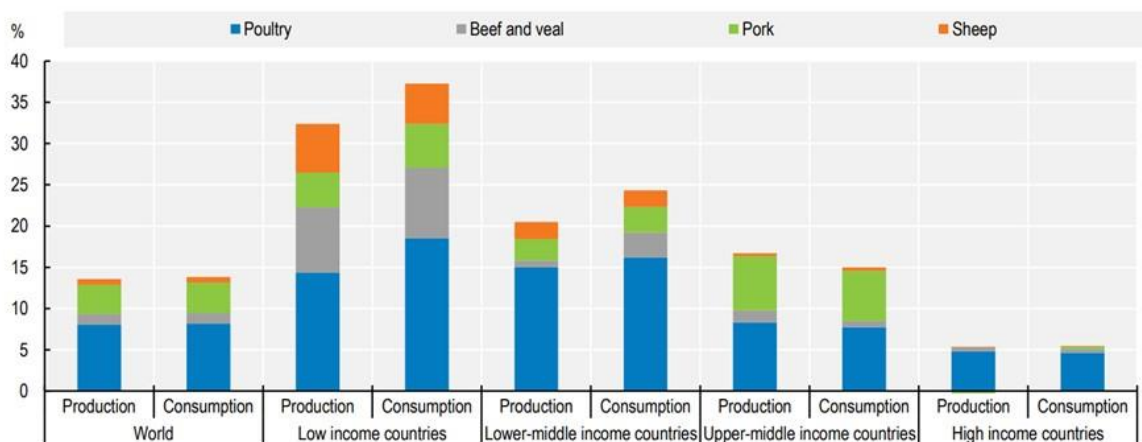
1. Bevezetés

Az emberi történelem utolsó 50 évében, a robbanásszerű népességnövekedés következtében a Föld népességét 2100-ra 12 milliárdra becsülik [Gerland et al. 2014]. A születéskor várható élettartam is emelkedik, a 2000. évi 66,8 évről 2020-ra 73 évre emelkedett [WHO 2019, 2022]. Az élelmiszeriparral szemben támasztott elvárások és fogyasztói igények nemcsak megnöttek, de változtak is. Az egyik irány az egészséges és fenntartható

táplálkozás és étkezés irányába mutat. Ezek több tendencia hatásának köszönhetőek: az egyik, hogy az elöregedő népesség fokozza a korosztály vásárlási magatartásának súlyát. A másik, hogy az Y és Z generáció munkaerő-piaci helyzete sokkal jobb, mint az előzőekben említett korosztályé volt a múltban. Az "élni, hogy egyél" és az "egyél, hogy élhess" dilemma feloldódni látszik. A táplálkozási szokások átalakítását egyre szélesebb körű tudományos, dietetikai és

orvosbiológiai bizonyítékok támasztják alá. A szakirodalom alapján a szív- és érrendszeri betegségek megelőzésére javasolt az alacsony feldolgozottságú élelmiszerek (zöldségek, gyümölcsök) arányának növelése a táplálék-piramisban (Gubicsókné et.al. 2021). Nem elhanyagolható szempont, hogy ez nagymértékben csökkenti az étrendben elfogyasztott kalóriamennyiséget, megelőzve az elhízás kialakulását (Santeramo et al 2017). Ugyanezek a motivációk a húsfogyasztás szerkezetének átalakulását is eredményezik, amint azt az 1. ábra mutatja. A baromfihús fogyasztása a legnagyobb növekedési ütemű, ezt követi a sertéshús, majd a marhahús, és végül a

juhús. A sertéshúsfogyasztás 2005 óta kevésbé nő, mint a szarvasmarha- és juhúsé. A fogyasztói magatartásra vonatkozó számítások azt mutatják, hogy az életszínvonal emelkedésével a magasabb tápértékű élelmiszerek (állati fehérje) fogyasztása növekszik a többihez (tésztafélék, zöldségek) képest. Időben vizsgálva ezt az összefüggést földrajzi szempontokkal kell kiegészíteni. A húsfogyasztás alakulását országonként vizsgálva a felső-közepes jövedelműek csoportja 2014-ig növekedést mutat (World Agriculture Towards 2030/2050. The 2012 Revision.).



1. ábra: A hústermelés és -fogyasztás növekedése (relatív változás, %) fehérjetartalom és az országok 1 főre jutó GDP-je (USD/fő) alapján, 2021-ről 2030-ra. (forrás: OECD)

A „tenger gyümölcsei” a mediterrán étrend fontos részét képezik. A krónikus és gyulladásos betegségek megelőzésében kifejtett pozitív hatása tudományosan bizonyított. Emellett javítják az agy, a szem és a szív állapotát és teljesítményét (Marinac Pupavac et al. 2022, Noger-Huet et al. 2022, O Mendivil 2021, Cai és Jeung 2022, Liu és Ralston 2021). Ugyanakkor a többi szempontot is figyelembe kell venni: a tengeri állatok fogyasztásának emberi egészségre gyakorolt hatása nem egyértelműen pozitív. Az óceánok és tengerek szennyezőanyagai több tanulmány

szerint az elsődleges forrásai bizonyos emberi egészségre káros vegyületeknek, mint például PFAS-nak (poli- és perfluoralkil vegyületeknek), különösen a PFOS-nak (perfluoroktán-szulfonsavnak) (Barbo, et al. 2023, Yamada et al. 2014). Az egyre egészség- és környezettudatosabb fogyasztók miatt az élelmiszeriparban, csakúgy, mint a vendéglátóiparban, megnövekedett a "funkcionális" és új, egzotikus ételek iránti kereslet (Jost et al. 2022, Nguyen és Phan, 2022, Ahmad et al. 2022, Szakos et al. 2022). Ennek a két szempontnak (egészséges és fenntartható

étkezési szokások) a mérhetőségét és összeegyeztethetőség vizsgáltuk. Továbbá azt is elemeztük, hogy a vizsgált szempontokat mennyiben segíti egy életciklus szemléletű holisztikus megközelítés (életciklus elemzés). Az LCA szemléletet valósítottuk meg a mutató

2. Anyagok és módszerek

A kutatás első lépésében a karbonlábnyomokat határoztuk meg, majd a második lépésben ezek értékeinek eltéréseit statisztikai programmal összehasonlítottuk.

2.1.A karbonlábnyom meghatározása

A kutatási kérdéseink megválaszolásához a mérhetőséget kellett először biztosítanunk. A szakirodalomban használatos gazdag mutatószám palettából (Bastos et al. 2019) a karbonlábnyomot (Global Warming Potential 100 évre) választottuk, mert így vált lehetővé a korábbi kutatásokkal való összehasonlítás. Húst tartalmazó fogásra 6,95 CO₂ kg/adag (Filimonau et al. 2017), illetve 5,19 CO₂ kg/adag (Costa, Bexiga 2023) szerepel a korábbi számításokban, a halhúst tartalmazókra 1,1 CO₂ kg/adag (Filimonau et al. 2017), illetve 2,17 CO₂ kg/adag (Costa, Bexiga 2023). A jelen tanulmány a GaBi 10.2-es változatú szoftverének használatán és adatbázisán alapul. A statisztikai számításokhoz az SPSS 28.0.1-es változatát használtuk. Az adott éttermi fogásra azért esett a választásunk, mert a nemzetközi konyhában is ismert, a hazai vendégek körében is széleskörűen fogyasztott, a receptúrája és az elkészítési folyamata a számítógépes feldolgozáshoz optimális (eléggé, de nem túl összetett az LCA szemléletű feldolgozáshoz). A program az életciklus

számítása során is: a gyakorlatban vizsgáltuk a hasznosulását. Kérdőíves felmérést végeztünk 2019-ben arról, hogy a fogyasztók szükségesnek tartják-e a karbonlábnyom értékének feltüntetését az éttermi menü, és figyelembe veszik-e (vennék-e) vásárlási döntéseik során.

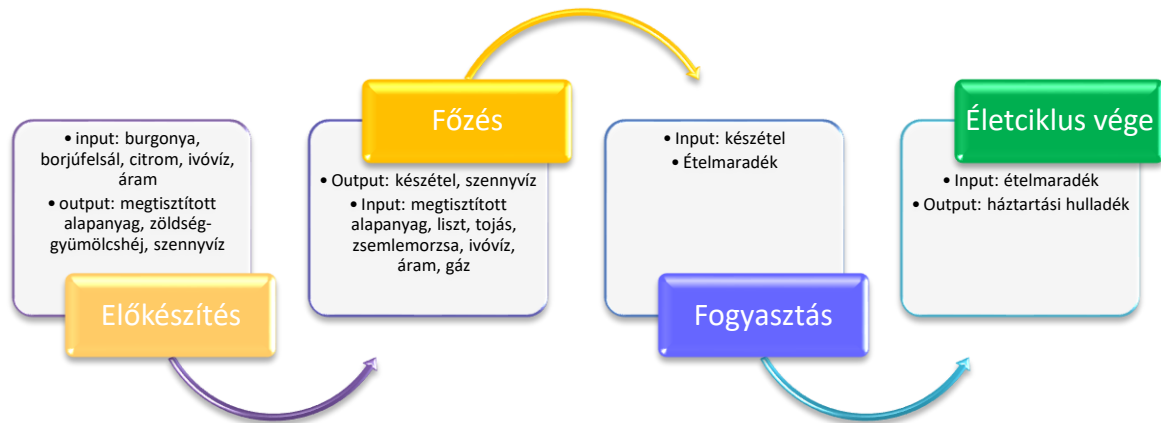
A harmadik lépésben kérdőíves felmérést végeztünk a karbonlábnyom ismertségéről, marketingértékéről.

elemzés folyamatát az ISO 14044 szabványa alapján végzi. A funkcionális egység 1 adag (0,471 kg) étel, amely a feltétet, köretet, díszítést tartalmazza. A nyersanyagok tömege (kg) a vendéglátóegység közlése nyomán¹ adódtak, az egyéb áramok a víz (kg; tisztításhoz, főzéshez, mosogatáshoz), gáz (MJ; főzéshez), elektromos áram (MJ; tároláshoz, főzéshez, mosogatáshoz) felhasználására terjednek ki. A rendszerhatárokat a „Cradle to Grave” (bölcsőtől a sírig) módszerrel határoztuk meg. Erre a lehetőséget a GaBi adatbázisa biztosította. Az in- és outputok allokációja a tömegük alapján történt. A lehetséges hatáskategóriák meghatározása a CML 2001 és TRACI módszerrel történt. A hagyományos LCA szakaszok közül a Production-t (Termelést) két részre bontottuk: ProductionI az Előkészítés (Preparation), ProductionII a Főzés (Cooking). Ezzel a formai átalakítással nagyobb hangsúlyt kapott a főzési eljárások különbsége, és ezek hatása. Az elméleti Use szakaszban ezen a területen a vendégek

¹ A kiválasztott fogás elkészítésének folyamatához, az LCA leltár összeállításához az adatok közléséért köszönet illeti Flamich Attila séfet

elfogyasztják a fogást (Eating), mely során a gyakorlati tapasztalat alapján 5%-nyi hulladékot (ételmaradékot) feltételeztünk.

Ez került az EoL (életciklus vége) szakaszba (2. ábra).



2. ábra: Az LCA fázisok és a hozzájuk tartozó anyagáramok (forrás: saját szerkesztés)

Ezt az eljárást alkalmaztuk ugyanannak a fogásnak ötféle receptjére, kétféle elkészítési módjára, kétféle szállítási távolságra (50 km-es és 100 km-es útvonalra), háromféle hulladékkezelési eljárással (égetés, lerakás, komposztálás). Így a rendelkezésre álló adatok alapján 30 forgatókönyvet állítottunk össze. A forgatókönyvek paraméterei (a 2. ábra inputjai: nyersanyagok, energiaáramok, maga a készétel) átlagos értékek. Ennek eredményét a 3. ábra foglalja össze. Ebben

a receptúrák csak kis mértékben különböznek (a szórás nem éri el a 10%-t). Az egyes forgatókönyveknél a teljes életciklusra azonosak a hulladékkezelési eljárások (3. ábra). Például a Recept2 esetében az ide tartozó első sor olyan forgatókönyvet jelent, melyben a fogás elkészítésének minden fázisában a keletkezett hulladékot hulladékégetőben semmisítették meg, a 100 km-es (1,3902 CO₂ kg/adag) és az 50 km-es változatban egyaránt (1,3889 CO₂kg/adag).

2.2. A karbonlábnyom eltéréseinek vizsgálata

A 2.1 szakaszban kapott értékek összehasonlítására ebben a tanulmányban a hulladékkezelési eljárást választottuk: szignifikánsan különböznek-e a forgatókönyvek eredményei, vagy a véletlen okozza csak. A minta kis elemszámát bootstrap eljárás

alkalmazásával ellensúlyoztuk. A karbonlábnyomok értékeinek eloszlását a normalitásra teszteltük Kolmogorov-Smirnov és Shapiro-Wilk próbával. A hulladékkezelési eljárások hatását a karbonlábnyom értékeire Kruskal-Wallis próbával teszteltük (mivel az ANOVA előfeltételei nem teljesültek).

2.3.A karbonlábnyom és a fogyasztói döntések összefüggésének vizsgálata

Primer adatgyűjtéssel vizsgáltuk: az egyes fogások karbonlábnyomának ismerete befolyásolja-e a fogyasztók (vendégek) döntéseit a fogások választásakor, és a fenntarthatósághoz való hozzáállás alapján milyen vendégcsoportokat különíthetünk el a kitöltők körében. Az online kérdőívet („Sok kicsi sokra megy”) 2019. szeptember 1-15 között töltötték ki a BGE/KVIK nappali és levelező képzésen tanuló

hallgató. A 15 nyitott, eldöntendő és többféle kimenetű kérdésre adott válaszokat nominális, Likert, és arányskálán mértük. A feldolgozási eszközök között szerepelt leíróstatisztika (megoszlás, átlag, módusz), Khi²-próba, és főkomponens analízis. Ez utóbbi előfeltételének teljesülését a számítógépes szoftver Kaiser-Meyer-Olkin és Bartlett próbával vizsgálta.

3. Eredmények

Az eredményeinket a 2.Anyagok és módszerek szerkezetének megfelelően foglaljuk össze.

3.1.A karbonlábnyomok értékei

Az eredeti, legnagyobb karbonlábnyomú **2,3525** CO₂kg/adag változat égetéses hulladékkezelésű, és 100 km-es szállítási távolságú. A legkedvezőbb **1,3042** CO₂kg/adag változat komposztálós hulladékkezelésű, modern elkészítésű, 50 km-es szállítási távolságú (a különbségek pontos felsorolását a 3. ábra **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** foglalja össze). Az adatok mértékegységének tudható be, hogy a forgatókönyvek eltérései

négy tizedesjegy nagyságrenddel nem szemléltethetők minden esetben. A szakirodalomban megtalálható (Costa és Bexiga 2023, Filimonau et al. 2017) értékekkel csak fenntartásokkal hasonlíthatók össze, mert eltérő fogásra és más módszerrel (kézi számolással a szakirodalmi gyűjtés alapján, TUCO Greenhouse Gas programmal) készültek az onnan származó eredmények

3. ábra: A 30 féle forgatókönyv eredményei (CO₂ kg/adag) Forrás: saját számítások alapján saját szerkesztés (5 ételrecept 3 hulladékkezelési alternatívája és 2 különböző szállítási távolság mellett)

Megnevezés (CO ₂ kg/fogás)		Szállítási távolság	
		100 km	50 km
Recept1	Égetés (alap)	2,3525	1,3125
	Lerakás	1,3208	1,3208
	Komposzt	1,3042	1,3042
Recept2	Égetés	1,3902	1,3889
	Lerakás	1,3776	1,3951
	Komposzt	1,3776	1,3776
Recept3	Égetés	2,3525	1,3125
	Lerakás	1,3208	1,3208
	Komposzt	1,3042	1,3042
Recept4	Égetés	1,3902	1,3889
	Lerakás	1,3776	1,3951
	Komposzt	1,3776	1,3776
Recept5	Égetés	2,3525	1,3125
	Lerakás	1,3208	1,3208
	Komposzt	1,3042	1,3042

3.2.A karbonlábnyom eltéréseinek magyarázata

A közepes értékek – mediánok - (5. ábra: **A teljes LCA folyamatra a karbonlábnyom normális eloszlásának tesztelése, (forrás: saját számítások)**6. ábra) eltérése hulladékkezelési eljárások szerint nem a véletlennek tudható be (azaz szignifikáns 4%-on). A környezeti hatások

közül a GWP 100 évre megadott mutatószámával már 1 fogás esetében is kimutatható a károsítás csökkentése. A legkedvezőbb (környezetbarátabb) a komposztálás (1,304 CO₂kg/adag), majd a lerakás (1,377 CO₂kg/adag), végül az égetés (1,39 CO₂kg/adag, 8. ábra).

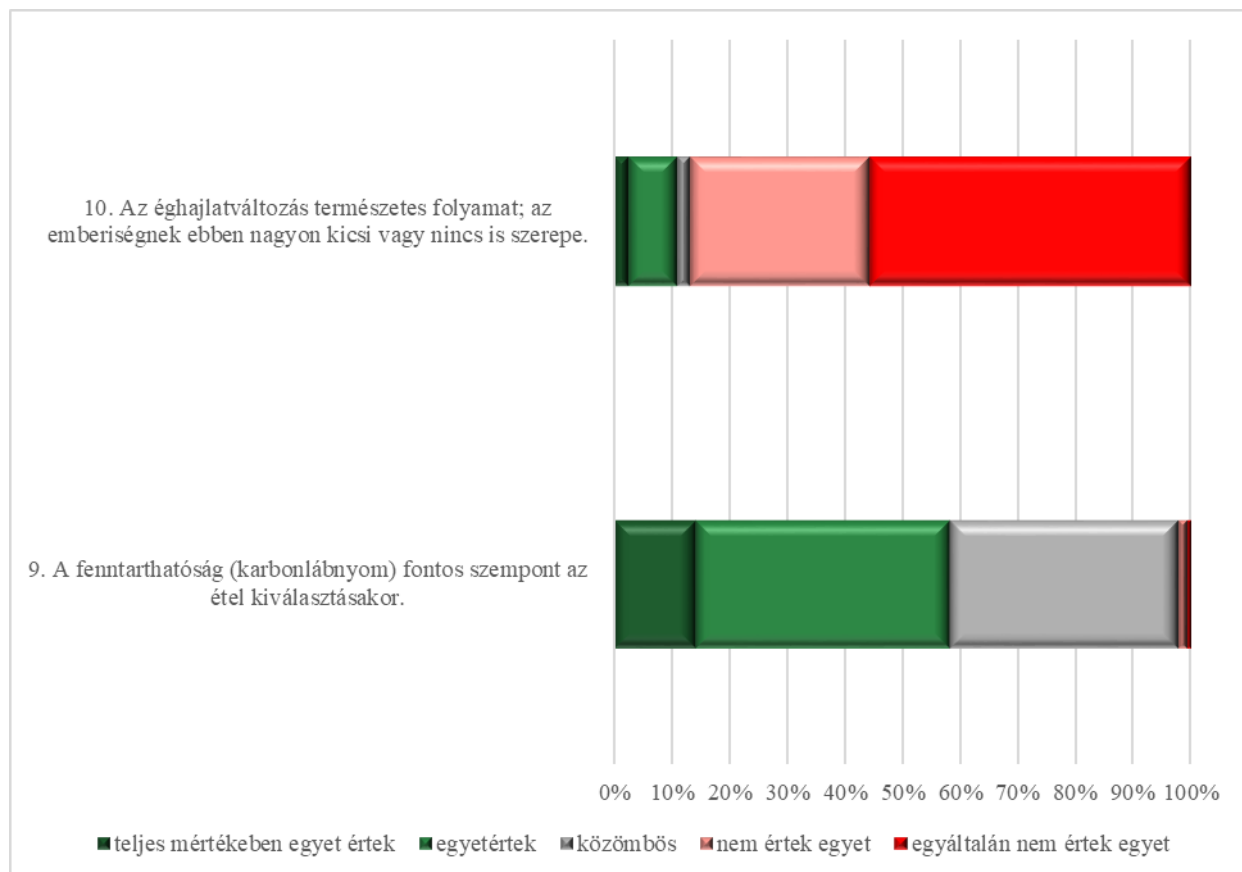
3.3.A karbonlábnyom hatása a fogyasztói döntésekre

2019-ben, a felmérés idején a mainál még kevésbé volt ismert a karbonlábnyom és jelentése. Az ENSZ ugyan már 2015-ben közzétette a fenntarthatósági fejlődési célokat, de ahhoz, hogy a fogyasztók tudatosítsák azokat, hosszabb időnek kellett eltelnie. Egy 2017-es felmérés szerint (Filimonau et al. Journal of Hospitality and Tourism Management 2017) a megkérdezettek fele úgy gondolta, hogy a karbonlábnyom értékét szükséges lenne feltüntetni az éttermi menükön. A saját eredményünk 78% (9. ábra, 4. kérdés). A fogás választásakor mindkétszer az összetevők bizonyultak döntő tényezőnek,

és a környezetre gyakorolt hatás sokkal kevésbé fontosnak (1. táblázat). A válaszadók környezettudatossága jónak bizonyult válaszaik alapján (4. ábra): 58% szerint fontos a karbonlábnyom feltüntetése az étlapon, és 86% nem ért azzal egyet, hogy az éghajlat változásában az emberi tevékenységnek nincs szerepe. Ez mindkét kérdőív-nél ellentmond annak, amit a 4. és 9. kérdésnél kinyilvánítottak. Az ellentmondás feloldása az, hogy ugyan többségük fontosnak tartja (lásd 9. kérdés 4. ábra) a mutató szerepeltetését, de ennek ellenére döntéseiknél számukra más szempont fontosabb.

1. táblázat: A 3. kérdés (Jelölje a felsorolt szempontok fontossági sorrendjét, amelyek alapján ételt választ (1: nagyon fontos, ...5: nem fontos) válaszainak megoszlása (Forrás: saját adatgyűjtés és számítások)

Szempont	Szempont fontossága	
	Sok kicsi sokra megy	2017 Filimonau
Összetevők (adalékanyagok, tartósítószer, emulgeálók, ...)	1	1
Tápérték (energia, zsír, fehérje, szénhidrát, rost)	2	2
Allergén anyagok	3	6
Állatkísérlet-mentes	4	5
Karbonlábnyom	5	7
Elkészítés módja	6	4
Ár	7	3



4. ábra: A válaszadók megoszlása környezettudatosságuk mértéke szerint (forrás: saját szerkesztés)

Vizsgáltuk, hogy a kitöltők mely tulajdonságai befolyásolhatják az adott

válaszaikat. A Khi2-teszt értéke csak egy esetben, az iskolai végzettség és az okos címkék fontosságának megítélésében

bizonyult szignifikánsnak. Sajnos a minta reprezentativitását a rendelkezésre álló feltételek mellett nem tudtuk biztosítani. A

jövedelemre nem kérdeztünk rá, mert korábbi tapasztalatok alapján az iskolai végzettséggel erősen összefügg.

2. táblázat: Összefüggések a válaszok és a kitöltők jellemzői között (Forrás: saját adatgyűjtés és számítások)

Jellemző	Információ használata		
	QR-kód	Okos címke	Karbonlábnyom
Nem	nincs	nincs	nincs
Életkor	nincs	nincs	nincs
Iskolai végzettség	nincs	gyenge	nincs
Lakhely	nincs	nincs	nincs

A vendégek magatartását főkomponens elemzéssel próbáltuk jellemezni. A Kaiser-Meyer-Olkin teszt értéke 0,548 (ami már elfogadható). A kapott eredményeket (3.táblázat) az alábbiak szerint értelmezhetjük:

3. táblázat: A kitöltők csoportjai (Forrás: saját adatgyűjtés és számítások)

Rotated Component Matrix^a

	Component		
	1	2	3
Árszempon	,052	,014	,971
Szármhelyszempon	,826	-,148	-,025
Tápértékszempon	,288	,648	,033
Összetételszempon	,528	,548	-,319
Karbonszempon	,683	,187	,108
Éghajlatvált_ember	,249	-,730	-,027

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a. Rotation converged in 5 iterations.

Az 1. csoportba tartozók a környezettudatosak: a választáskor legfontosabb a nyersanyagok származási helye, és a karbonlábnyom értéke. Gyakorlatilag nem árérzékenyek. A LOHAS fogyasztói csoporthoz lehetne hasonlítani őket. A 2. csoport az „életet

élvezők”. Az étel minősége (tápérték, összetétel) a legfontosabb, a környezetvédelemre alig fordítanak figyelmet, és ők sem érzékenyek a fogás árára. A 3. csoport döntéseit szinte kizárólag az ár motiválja.

4. Összefoglalás

A kutatásunk kezdetekor ki nem mondott kérdésünket - lehetséges-e a

karbonlábnyomot meghatározni éttermi fogás vonatkozásában – sikeresen

megválasztottuk. A rendelkezésünkre álló technikai feltételek alkalmasnak bizonyultak a gyakorlati megvalósítására. A következő lépésnek a számításainkat feleltettük meg korábbi eredményeknek. Itt nagyságrendben megegyező, de az eltérő és ismeretlen feltételek miatt 70%-kal, illetve 59%-kal alacsonyabb értékeket kaptunk.

Az első kutatási kérdésre (okoz-e mérhető különbséget a kiválasztott fogás forgatókönyveben a szállítási távolság, az

5. Konklúzió

A környezet és éghajlat változásának következményei egyre inkább elfogadottá válnak, de a fogyasztói döntésekre befolyásuk még nem elég erős. A széndioxid-kibocsátás hatékony csökkentéséhez holisztikus megközelítés szükség, és nem korlátozódhat kizárólag a gazdaság szereplők egy-egy csoportjának működésére (Liu P. et al. 2022). Mivel az élelmiszerhulladék 12%-a (Európa Parlament közlése alapján) a vendéglátóiparban keletkezik, és több mint a fele a háztartásokban, ezért fontos, hogy a fogyasztók/vendégek megbízható, pontos és a legújabb eredményeknek megfelelő tájékoztatáshoz jussanak akár éttermi vendégként, akár saját háztartásukban étkezve. Az LCA módszere ezt nagymértékben segíti: az

ételkészítési eljárás és a hulladékkezelési mód megváltoztatása) pozitív választ adhatunk. Még 1 adag (0,471 kg) esetében is számszerűsíthető a feltételek változásának hatása (ideértve a kiemelt hulladékkezelési eljárásokat is). A második kutatási kérdésünkre sajnos negatív választ kellett adnunk. A kérdőívet kitöltők ugyan fontosnak tartották a fogásokhoz tartozó karbonlábnyomok értékének feltüntetését az éttermi menü, de választásaikra nincs kimutatható hatással.

élelmiszernyersanyagok előállításával kapcsolatos összes inputot, outputot, erőforrást és kibocsátást figyelembe veszik. Az, hogy az étterem üzemeltetésében a holisztikus szemléletet a napi gyakoriságú fázisokra alkalmaztuk (előkészítés, főzés és a keletkezett élelmiszerhulladék kezelése), az eredmények jelentőségét és nagyságrendjét fokozta. Igazolódott a hulladékkezelési eljárások közül a komposztálás szignifikánsan alacsonyabb CO₂ kibocsátása. A többi környezeti hatáskategória (földhasználat, savasodási potenciál, édes- és tengervízi ökototoxicitás, eutrofizációs potenciál, humán toxicitási potenciál, erőforrások csökkenése, fotokémiai ózontképződési potenciál) kevésbé alkalmas a vendégek választásának befolyásolására.

Mellékletek

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Karbonlábnyom	,474	30	<,001	,448	30	<,001

a. Lilliefors Significance Correction

5. ábra: A teljes LCA folyamatra a karbonlábnyom normális eloszlásának tesztelése, (forrás: saját számítások)

Independent-Samples Kruskal-Wallis Test Summary

Total N	30
Test Statistic	11,015 ^a
Degree Of Freedom	2
Asymptotic Sig.(2-sided test)	,004

a. The test statistic is adjusted for ties.

6. ábra: A teljes LCA folyamatra a karbonlábnyomok mediánjainak tesztelése, hulladékkezelési eljárás szerint (forrás: saját számítások)

Pairwise Comparisons of Hulladékéhasznosítás

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. ^a
Komposzt-Lerakás	8,300	3,886	2,136	,033	,098
Komposzt-Égetés	12,700	3,886	3,268	,001	,003
Lerakás-Égetés	4,400	3,886	1,132	,258	,773

Each row tests the null hypothesis that the Sample 1 and Sample 2 distributions are the same.

Asymptotic significances (2-sided tests) are displayed. The significance level is ,050.

a. Significance values have been adjusted by the Bonferroni correction for multiple tests.

7. ábra: A teljes LCA folyamatra a karbonlábnyomok eloszlásának tesztelése, hulladékkezelési eljárás szerint (forrás: saját számítások)

Report

Karbonlábnyom

Hulladékhasznosítás	Statistic	Bias	Std. Error	Bootstrap ^a		
				95% Confidence Interval Lower	Upper	
Égetés	Mean	1,663094000	-,003243065	,150694786	1,370299065	1,967417414
	N	10	0	3	5	15
	Std. Deviation	,4767284779	-,0407797275	,1134563321	,0343428291	,5382207151
	Median	1,390200000	,092687990	,266760593	1,388920000	2,352500000
Lerakás	Mean	1,360118000	,000173966	,010266486	1,339582000	1,379463478
	N	10	0	3	5	15
	Std. Deviation	,0345888735	-,0019811988	,0041888107	,0232325142	,0383633438
	Median	1,377560000	-,013143430	,024805976	1,320800000	1,395100000
Komposzt	Mean	1,333562000	,000024314	,011334431	1,311563000	1,355561000
	N	10	0	3	5	15
	Std. Deviation	,0378674492	-,0022011833	,0055019390	,0231889821	,0401644951
	Median	1,304230000	,019249125	,029877792	1,304230000	1,377560000
Total	Mean	1,452258000	-,000983756	,055220826	1,351956911	1,563266539
	N	30	0	0	30	30
	Std. Deviation	,3073472016	-,0192212528	,0874304735	,0378380829	,4152717585
	Median	1,377560000	-,007038665	,018233991	1,320800000	1,388920000

a. Unless otherwise noted, bootstrap results are based on 1000 bootstrap samples

8. ábra: A teljes LCA folyamatra a karbonlábnyomok átlagának és mediánjának tesztelése, hulladékkezelési eljárás szerint (forrás: saját számítások)

Sok kicsi sokra megy, avagy mennyire tudatosan étkeznek?

- Hetente általában milyen gyakran szokott otthonán kívül (büfé, étterem...) étkezni (egy konkrét számot adjon meg válaszul)?
- Amikor otthonán kívül étkezik, milyen ok(ok)ból teszi?
 - kényelem/társaság/étel minősége/takarékosság idővel és energiával/egyéb
- Jelölje a felsorolt szempontok fontossági sorrendjét, amelyek alapján éltel választ (1: nagyon fontos, ...5: nem fontos)!
 - származási hely/tápérték (energia, zsír, fehérje, szénhidrát, rost...)/összetevők(adalékanyagok, tartósítószer, emulgeálók, ...)/allergén anyag/állatkiésklet mentes/karbon lábnyom/ár/elkészítés módja
- Az Ön véleménye szerint a jövőben fel kellene tüntetni a karbonlábnyom értékét a menün?
 - határozottan nem/igen, és meg magyarázni, hogy mit jelent/nem tudja/nincs véleménye/határozottan igen (magyarázat nélkül mert az szükségtelen)
- Az ár fontos szempont az étel kiválasztásakor.
 - teljes mértékben egyetérték/egyetérték/közömbös/nem értek egyet/egyéltalán nem értek egyet
- A származási hely fontos szempont az étel kiválasztásakor.
 - teljes mértékben egyetérték/egyetérték/közömbös/nem értek egyet/egyéltalán nem értek egyet
- Az átlagos tápérték fontos szempont az étel kiválasztásakor.
 - teljes mértékben egyetérték/egyetérték/közömbös/nem értek egyet/egyéltalán nem értek egyet
- Az összetevők (adalékanyagok, tartósítószer, emulgeálók, ...) fontos szempont az étel kiválasztásakor.
 - teljes mértékben egyetérték/egyetérték/közömbös/nem értek egyet/egyéltalán nem értek egyet
- A fenntarthatóság (karbonlábnyom) fontos szempont az étel kiválasztásakor.
 - teljes mértékben egyetérték/egyetérték/közömbös/nem értek egyet/egyéltalán nem értek egyet
- Az éghajlatváltozás természetes folyamat; az emberiségnek ebben nagyon kicsi vagy nincs is szerepe.
 - teljes mértékben egyetérték/egyetérték/közömbös/nem értek egyet/egyéltalán nem értek egyet
- Az alábbi képhez kapcsolódó alkalmazást használta-e már?
 - igen/nem
 - Ha igen, akkor megtalálta a szükséges információt?
 - igen/nem
 - Ha igen, akkor miért használta az alkalmazást?
 -szabaaad válasz
 - Eolvassa az ételismerezen/étlapon található leírást (összetétel, allergén,)?
 - igen/nem
- Az ön véleménye szerint mi(k) az okos címkék alkalmazásának előnyei?
 - Az ön véleménye szerint mi(k) az okos címkék alkalmazásának hátrányai?
- A kitöltő neme
 - férfi/nő
- A kitöltő születési éve
- A kitöltő legmagasabb iskolai végzettsége
 - általános iskola/középsiskola/felsőfokú
- A kitöltő lakhelye
 - Budapest/megyeszékhely/egyéb város/község

9. ábra: A 2019-es kérdőíves felmérés kérdései és válaszlehetőségei (forrás: saját szerkesztés)

Irodalom:

- Ahmad, I.; Hao, M.; Li, Y.; Zhang, J.; Ding, Y.; Lyu, F. 2022. Fortification of yogurt with bioactive functional foods and ingredients and associated challenges - A review. *Trends in Food Science & Technology* 129 558-580
- Barbo, N.; Stoiber, T.; Naidenko, O.; Andrews, D. 2023. Locally caught freshwater fish across the United States are likely a significant source of exposure to PFOS and other perfluorinated compounds. *Environmental Research* 220 115-165
- Bastos, J. ; Garcia, R.; Fausto Freire, F. Indicators for Waste Prevention and Management Measuring circularity. 2019 1st ed.; *Dias, L.; Rosado, L.; UrbanWins*: Rome, Italy.
- Cai, J.; Leung, P. 2022. Unlocking the potential of aquatic foods in global food security and nutrition: A missing piece under the lens of seafood liking index. *Global Food Security* 33 100641
- Costa, V.; Bexiga, E. 2023. Food portion adequacy and its carbon footprint: Case study from a traditional Portuguese restaurant. *International Journal of Gastronomy and Food Science* 31
- Filimonau, V.; Lemmer, C.; Marshall, D.; Bejjani, G. 2015. Restaurant menu re-design as a facilitator of more responsible consumer choice: An exploratory and preliminary study. 2017. *Journal of Hospitality and Tourism Management* 33 73-81
- Filimonau, V.; Lemmer, C.; Marshall, D.; Bejjani, G. 'Nudging' as an architect of more responsible consumer choice in food service provision: The role of restaurant menu design. 2017. *Journal of Cleaner Production* 144 161-170
- Gerland, P.; Raftery, A.E.; Sevčiková, H.; Li, N.; Gu, D.; Spoorenberg, T.; Alkema, L.; Fosdick, B.K.; Chunn, J.; Lalic, N.; et al. 2014. World population stabilization unlikely this century. *Science*, 346, 234–237
- Gubicskóné, K.A.; Breitanbach, Z.; Ungár, T.L.P.É.; Szabó, Z. 2021. Táplálkozásépidemiológiai ismeretek. Medicina, Budapest
- Jost, S.; Birringer, M.; Herzig, C. 2022. Brokers, prestige and information exchange in the European Union's functional food sector – A policy network analysis. *Journal of Functional Foods* 99 105309
- Lee, Y.M., et al., 2020. Concentration and distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the Asan Lake area of South Korea. *J. Hazard Mater.* 381, 120909.
- Liu, C.; Ralston, N. Chapter Seven - Seafood and health: What you need to know? 2021. In *Advances in Food and Nutrition Research* 97, 275-318
- Liu, P.; Segovia, M.; Tse, E. C.Y.; Nayga, R.M. Become an environmentally responsible customer by choosing low-carbon footprint products at restaurants: Integrating the elaboration likelihood model (ELM) and the theory of planned behavior (TPB). 2022. *Journal of Hospitality and Tourism Management* 52 346-355
- Marinac Pupavac, S.; Kenđel Jovanovic, G.; Linšak, Ž.; Glad, M.; Traven, L.; Pavičić Žeželj, S. The influence on fish and seafood consumption, and the attitudes and reasons for its consumption in the Croatian population. 2022. *Front. Sustain. Food Syst.* 6:945186. doi: 10.3389/fsufs.2022.945186
- Nguyen, T.; Phan, H. 2022. Impact of COVID-19 anxiety on functional foods consuming intention: role of electronic word of mouth. *Heliyon* 8 11 e11344
- Noger-Huet, é.; Vagner, M.; Le Grand, F.; Graziano, N.; Bideau, A.; Brault-Favrou, M.; Churlaud, C.; Bustamante, P.; Lacoue-Labarthea, T. 2022. Risk and benefit assessment of seafood consumption harvested from the Pertuis Charentais region of France. *Environmental Pollution* 292 B 18388
- O Mendivil, C. Fish Consumption: A Review of Its Effects on Metabolic and Hormonal Health. 2021. *Nutrition and Metabolic Insights* 14 1–6
- OECD/FAO "OECD-FAO Agricultural Outlook" 2021 OECD Agriculture statistics (database)
- Santeramo, F.G.; Carlucci, D.; De Devitiis, B.; Seccia, A.; Stasi, A.; Viscecchia, R.; Nardone, G. 2017. Emerging trends *Food Research International* (in press)
- Szakos, D.; Ózsvári, L.; Kasza, Gy. 2022. Health-related nutritional preferences of older adults: A segmentation study for functional food development. *Journal of Functional Foods* 92 105065

<https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20170505STO73528/elemiszer-pazarlas-az-eu-ban-a-szamok>

WHO, 2019. Life tables. <https://www.who.int/data/gho/data/themes/mortality-and-global-health-estimates/ghe-life-expectancy-and-healthy-life-expectancy>

WHO, 2022. Life expectancy at birth. [https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/life-expectancy-at-birth-\(years\)](https://www.who.int/data/gho/data/indicators/indicator-details/GHO/life-expectancy-at-birth-(years))

World Agriculture Towards 2030/2050. The 2012 Revision.

Yamada, A., et al., 2014. Perfluoroalkyl acid contamination and polyunsaturated fatty acid composition of French freshwater and marine fishes. *J. Agric. Food Chem.* 62, 7593–7603.

Szerzőink

Lovasn  Avat  Judit



Lovasn  Avat  Judit (PhD) 1999-t l a K lkereskedelmi F iskola, 2010-t l a Budapesti Gazdasági Egyetem adjunktusa, 2022-t l f iskolai docense, a Magyar Statisztikai T rsas g, az MTA Statisztikai Bizottságának  s a Budapesti Kereskedelmi  s Iparkamara tagja. Fenntarthatos ggal  s LCA szemléletű karbonlábnyom számításával 2018 óta foglalkozik, elsősorban a vend gl t s területén. Demogr fi val és oktats m dszertannal is foglalkozott, részt vett orvosi kutatásokban is.

Erdélyi  va



Okleveles matematikus, statisztikus. Növénytermesztés és kertészeti tudományok területén szerzett PhD fokozatot. 1990-ben kezdte oktats i-kutatói pályafutását a felsőoktatásban. Matematika, statisztika, kutatásmódszertan és kreativit sfejleszt s tantárgyakat oktats  magyar és angol nyelven, 2011-t l a Budapesti Gazdasági Egyetem Kereskedelmi, Vendéglátóipari  s Idegenforgalmi Karán, a Kvantitatív Módszertan Intézet egyetemi docenseként. 2009-t l a SZIE Tájépítészeti  s T j kol giai Doktori Iskolában a Doktori Tanács munkájában is részt vesz külső tagként, megjelentetéséhez. A 2017-ben megalakult BGE KVIK Fenntartható Vend gl t s Kiválósági Központnak aktív tagja, a módszertani altéma vezetője.

D. Babos Zsuzsánna



Andrag gus, k zss gfejleszt , az ELTE Pedagógiai  s Pszichológiai Kar Felnőttképzés – kutatási és tudásmenedzsment Intézet egyetemi adjunktusa. A „Cselekvő k zss gek – aktív k zss gi szerepvállalás” projekt keretében, az Intézményi önkéntesség módszertani munkacsoport szakértője. Kutatási területe az önkéntesek informális és nem-formális tanulási folyamatainak vizsgálata. Tudományos munkái az önkéntes szektor f  jellemzői mentén jelentek meg, legutóbb az önkéntesség értelmezéséről, számszerűsíthető jellemzőiről, valamint az önkéntesek képzéséről.

Lézeres felrakóhegesztés (LMD) életciklus szempontú vizsgálata

GÁL Balázs Sándor [1], BODNÁRNÉ SÁNDOR Renáta [2]

[1] Tudományos munkatárs, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., H-3519 Miskolc, Iglói út 2. balazs.gal@bayzoltan.hu

[2] LCA szakterület vezető, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., H-3519 Miskolc, Iglói út 2. renata.sandor@bayzoltan.hu

Abstract

Nowadays, there are numerous researches on additive manufacturing, from a technological point of view, in different fields of industry (such as construction, aerospace, medical-technological industry), but only a few examples are available in the automotive industry. This life-cycle analysis has been presented in order to validate the research results of the FEIK project from an environmental point of view, by examining the environmental advantages/disadvantages of additive manufacturing, (laser melting deposition), compared to a more conventional (turning) manufacturing method.

Keywords: additive manufacturing, LMD, metal powder, LCA

Kivonat

Az additívgyártás technológiai szempontú vizsgálatára, fejlesztésére számos kutatás irányul az iparterületek széles spektrumán pl.: építőiparban, repülőgépiparban, orvos-technológiai iparban vagy az autópiparban. Ez utóbbi esetén lehetőségek tárháza miatt dinamikus fejlődésnek indult. Jelen környezeti életciklus elemzés a FEIK projekt kutatási eredményeinek környezeti szempontú visszaigazolására készült, melyben vizsgálja az additívgyártás (lézeres felrakóhegesztés) környezeti előnyeit/ hátrányait, összehasonlítva egy konvencionálisabb (esztergálás) gyártási módszerrel.

Kulcsszavak: additív gyártás, LMD technológia, fémpor, LCA

1 Bevezetés

A FEIK Projekt (GINOP-2. 3.4-15-2016-00001) célja a korszerű ipari lézertechnológiák autópipari alkalmazási lehetőségeinek kutatása, a 3D fémnyomtatás (additívgyártás) és annak legújabb kutatás-fejlesztési eredményeinek autópipari alkalmazásokhoz való implementálásának és validálásának kidolgozása.

Az AM autópipari alkalmazásának célja: az alkatrészek súlyának csökkentése, a gyártás gazdaságosabbá és rugalmasabbá

tétele. Emellett ezzel a technológiával speciálisabb alkatrészek esetén elkerülhető a nagyméretű raktárkészlet.

A gazdasági megfontolások mellett a környezeti hatások megismerése is fontos szerepet kap napjainkban, melyre az LCA (life cycle assessment – környezeti életciklus elemzés) az egyik legelterjedtebb módszer, amely alkalmas a környezeti hatások volumenének számszerűsített értékekkel való meghatározására.

Az elemzés legfőbb célkitűzése a technológia életciklus szakaszainak, valamint néhány gyártási alternatíva környezeti terhelésének meghatározása, és a legfontosabb környezeti hot-spotok kimutatása.

Az AM általános környezeti vizsgálatával számos szakirodalom foglalkozott már. ~~mint például~~ Ma et al. (2017) ezt a technológiát fenntarthatónak tartja, de nagy figyelmet kell fordítani a nyersanyag felhasználásra. Ribeiro et al (2020) tanulmánya, viszont azt a következtetést vonta le, hogy napjainkban a legjobban fejlődő technológiák közé

tartozik az AM, köszönhetően a tervezés és gyártás rugalmassága és a hulladék minimalizálásának. Az AM technológia autóiipari alkalmazásának LCA hatásvizsgálatára, már kisebb figyelem irányul. Ilyen Böockin & Tillman (2019) tanulmánya, amelyben, egy kisteherautó motorgyártás LCA vizsgálatát végezték, hagyományos és 3D nyomtatásos technológiák összehasonlításával. A tanulmány eredményei rövidtávon kétértelműek voltak, mert számos korlátozó tényező (pl.: nehézkes adatgyűjtés) merült fel az elemzés során, de voltak biztató jelek a jövőre vonatkozóan.

2 Az elemzés célja

Az elemzés célja, a projekt keretében fejlesztett új LMD technológia, mint „Fenntartható Fejlődési” scenáriók (SDS) környezeti hatásainak meghatározása, valamint összehasonlító elemzése, az esztergálással, mint, konvencionális gyártási folyamattal, ami jelen tanulmányban az „Buisness as Usual” scenáriók (BaU) voltak.

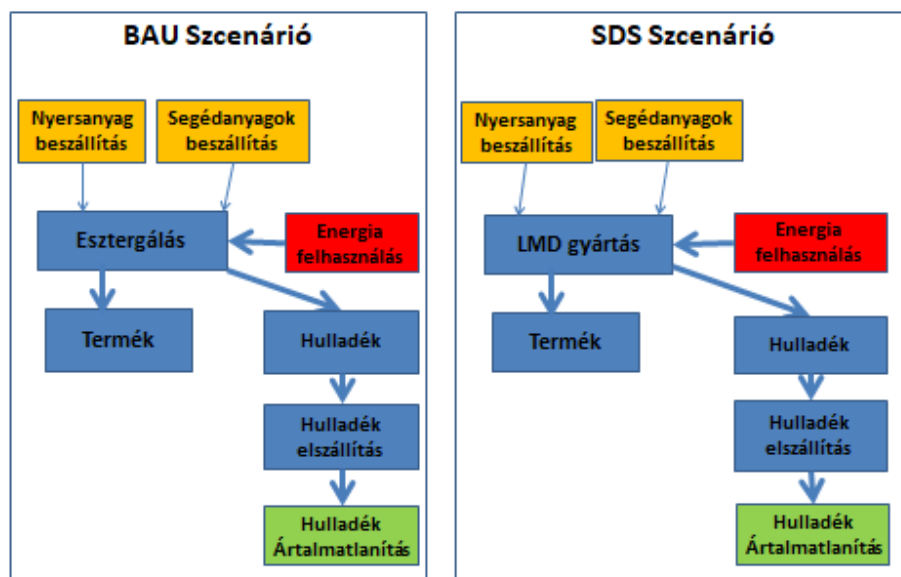
A BaU scenárió szerint, a próbatest gyártása egy fémtömbből indul amelyből, egy marószerszám segítségével esztergálják ki a próbatestet, olajhűtés mellett.

AZ SDS scenárióban ezzel szemben az alapanyagot, fémpor formájában használják. Ennél a technológiánál a kiindulási fémport egy poradagoló és védőgáz (pl argon) kíséretében juttatják a munkaterületre, ahol lézer segítségével olvasztják meg a fémet és végzik a próbatest építési folyamatát.

Az elemzés alapját, az előzőekben bemutatott technológiák (kísérleti körülmények között végzett) alkalmazása során mért adatai jelentették - a gyártási folyamatok anyag- és energiaáramai két különböző alapanyag (fémpor az LMD során) és technológia esetén.

A gyártási folyamat variálhatóságát figyelembe véve két konkrét fémtömbvel - 316L acélöntvözet és Ti6Al4V titánöntvözet - kapcsolatos scenárióváltozatok kerültek kiválasztásra az elemzéshez, a számos jövőbeli alternatíva közül. Az összehasonlíthatóság érdekében, mindkét fémtömböznél egy alap és egy alternatív scenárió került modellezésre.

A két scenáriótípus (1. ábra) a valóságban eltéréseket mutat - különös tekintettel az anyagáramok mennyiségére és minőségére – amely a modellezésben



1. ábra: Vizsgált scenáriók rendszerhatára (Bay Zoltán Kutatóközpont)

is megjelenik, hasonlóság a folyamatok csoportosításában van. A BaU scenáriók esetében magasabb a bemenő (felhasznált anyag) és kimenő (gyártási hulladék) anyagáramok mennyisége az alapanyag

típusa miatt. A gyártási hulladékok kezelésének modellezése minden alternatíva esetén azonos feltételek mellett történt, azonos elvek szerint.

3 Az elemzés alapparaméterei

3.1 Funkcionális egység

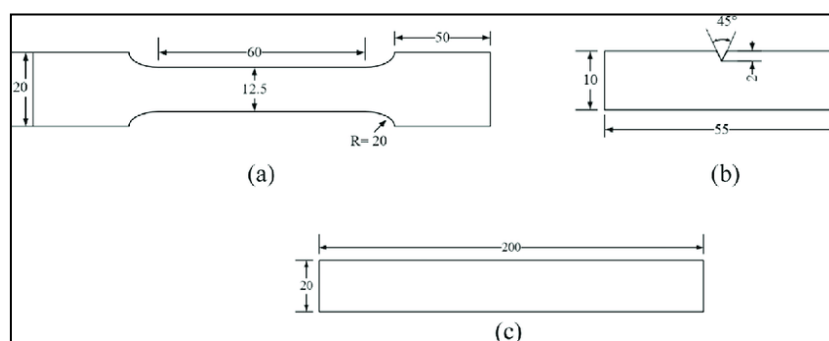
Az életciklus elemzés során, a fellépő környezeti hatásokat minden esetben egy funkcionális egységre vetítve értelmezik (ISO 14040:2006).

Azzal, hogy az LMD (mint a konvencionális technológiáktól változatosabban alkalmazható gyártási módszer), valamint két nagyon eltérő tulajdonsággal rendelkező ötvözet (alapanyag) került az LCA elemzés fókuszába, az összehasonlító elemzés elvégzése komoly kihívást jelentett.

Éppen ezért a feladat megoldásában sokat segítettek a szakértőkkel folytatott megbeszélések, melyet követően funkcionális egységként egy próbatest (2. ábra) gyártása került kiválasztásra - mely mind a hagyományos, mind pedig LMD technológia segítségével előállítható. A próbatest főbb paramétereit az 1. táblázat tartalmazza, kitérve az eltérő alapanyagok különbségeire is.

1. táblázat: Funkcionális egység jellemzői (Bay Zoltán Kutatóközpont)

Funkcionális egység	Űrméret	Tömeg (316L)	Tömeg (Ti ₆ Al ₄ V)
1db próbatest	65,75 cm ³	515 g	291 g



2. ábra: A vizsgált próbatest (Bay Zoltán Kutatóközpont)

3.2 Allokáció

Egy marószerszám csak korlátozott alkalommal használható, azaz egy szerszám alkalmazhatósága 15 próbatest legyártására lett maximalizálva. A marószerszám súlya 250g. A marószerszám gyártásának modellezéséhez egy magasan-ötvözött acél-előállítás került kiválasztásra. Egy próbatest

gyártásához szükséges mennyiség kiszámítása pedig az alábbi módon történt:

$$250\text{g}/15\text{db próbatest} = 16,67\text{g/próbatest}$$

Mind a két BaU scenárió esetén ugyanez a mennyiség került a modellekbe.

3.3 Cut-off

Ebben a tanulmányban, a fémötvözetek modellezésénél néhány anyagáram (molibdén, foszfor, vanádium, ittrium) modellezése elhanyagolásra került, a rendelkezésre álló adatbázisok

hiányosságai miatt. A kihagyott anyagáramok arányát a teljes anyagáramhoz képest, az egyes scenáriók esetében a 2. táblázat mutatja be

2. táblázat: A „Cut-off” szabály által érintett anyagáramok az egyes scenáriókon belül (Bay Zoltán Kutatóintézet)

SZCENÁRIÓ	ANYAGÁRAM	TÖMEGARÁNY A SZCENÁRIÓN BELÜL	ÖSSZESÍTETT TÖMEGARÁNY
BaU (Ti ₆ Al ₄ V)	Molibdén	0,23%	0,24 %
	Foszfor	0,004%	
BaU (316L)	Vanádium	0,92%	0,23 %
	Ittrium	0,0003%	
	Maradék	0,06%	
SDS (Ti ₆ Al ₄ V)	Molibdén	1,12%	1,14 %
	Foszfor	0,02%	
SDS (316L)	Vanádium	1,88%	2 %
	Ittrium	0,00%	
	Maradék	0,12%	

3.4 Felhasznált adatok

A próbatestre vonatkozó input-output anyag- és energiaáramok mennyiségeit és az LCA elemzés elvégzéséhez szükséges egyéb adatokat a BAY szakértői szolgáltatották, melyek a következők:

- Egyes alkatrészek tulajdonságai (összetétel, tömeg, stb.),

- Alkatrészek, modulok beszállítási távolságai,
- Gyártással kapcsolatos információk:
 - Felhasznált adalékanyagok,
 - Villamos-energia igény,

Gyártási-hulladékokkal kapcsolatos információk (mennyiség, minőség, szállítási távolság, ártalmatlanítási módok)

4 Alkalmazott módszertan

Az életciklus modellezés folyamata és a környezeti eredmények meghatározása specifikus elemző szoftver segítségével történt: GaBi Professional aktuális verziójával. A programokban felhasznált adatbázisok, folyamatok: Ecoinvent (3.7 verzió; 2021) és a Thinkstep (ts-GaBi; 2021) fejlesztése folyamatos; a szoftver fejlesztői szakértői háttér bevonásával végzik. Ezek verifikáltak, alkalmazhatóságuk ezért széleskörűen elfogadott. A modellépítéshez is ezen adatbázisok kerültek felhasználásra.

A környezeti hatáselemzés az EF3.0 hatáértékelő módszerrel történt (European Commission, 2021), melyet Európában jellemzően használnak. A módszertan leggyakrabban vizsgált hatáskategóriái, a Savasodási potenciál (AP), Klímaváltozási potenciál (CC), Eutrofizációs potenciál (EP), Erőforrások csökkenése (RU), Fotokémiai Ózonképződési Potenciál (POF), Ózonréteg Csökkenési Potenciál (ODP).

5 Eredmények

5.1 Ti₆Al₄V (titánötvözet) scenáriók eredményei

A titánötvözetrel kapcsolatos BaU scenárió esetén, a legjelentősebb hatáskategóriák eredményeiből megállapítható, hogy a nyersanyag-előállításához kapcsolódik a legnagyobb arányú környezeti terhelés. A klímaváltozási potenciál 89%-a is ehhez az életciklus szakaszhoz köthető. Ebben a hatáskategóriában hatásnövelőként a széndioxid mintegy 87%-ban, metán 8,8%-ban szénmonoxid ~2%-ban szerepet játszik. Ezen emissziók forrása minden esetben, több mint 90%-ban, a titánötvözet előállítása. Ugyancsak a nyersanyag előállításához köthető a többi vizsgált hatáskategória magas értéke: az édesvízi

ökotoxicitást növelő hatások 96%-a, a szállópor 92%-a és az erőforrás csökkenés 83%-a.

A második jelentősebb hatások a gyártáshoz tartoznak, azonban mértéküket tekintve jelentősen elmaradnak a nyersanyagok környezeti értékéhez képest.

Az SDS scenárióban hasonlóan, a BaU-hoz a legmagasabb hatások szintén a nyersanyagok előállításához kapcsolódik, azonban mértékük még magasabb, minden hatáskategóriában 92% feletti arány figyelhető meg - egyes hatáskategóriákban eléri a 100%-ot.

5.2 316L (acélötvözet) scenáriók eredményei

A titánötvözetet tartalmazó scenáriókhoz képest az acélötvözet esetén a környezeti hatások jóval nagyobb változatosságot mutatnak a vizsgált hatáskategóriákban. A környezeti terhelések legnagyobb arányban a nyersanyag-előállításához kapcsolhatóak, azonban a többi életciklus szakasz már nagyobb szerepet kap.

Az acélötvözethez kapcsolódó BaU scenárióban a klímaváltozási potenciálból származó hatások 58%-ban a nyersanyag-előállításához, 29%-ban a gyártáshoz, 12%-ban pedig a hulladékkezeléshez kapcsolódnak.

Az ökotoxicitás hatások 57%-ban kapcsolódnak a nyersanyaggyártási folyamatokhoz, a gyártás és a hulladékkezelés nagyjából egyenlő arányban ~20-20%-ban felelős a hatáskategória eredményeiért. A hatásmenvelők közel fele vízbe irányuló emissziókból származik, amelyért 29%-ban kloridok, 18%-ban pedig az ammónium a

felelős. Másik fontos hatásmenvelő forrás (37%-ban) a légkörbe kerülő emissziók: ammónia (23%) és hidrogén-szulfid (10%). Az eutrofizáció esetén két terület emelkedik ki: a nyersanyag-előállítás (68%) és a hulladékkezelés (30%). A szállóporhoz kapcsolódó hatások 85%-ban a nyersanyag-előállításához, kisebbik részben a gyártáshoz (15%-ban) kapcsolódnak, a hulladékkezeléshez csupán 2,5%-ban köthető. Az erőforrás-csökkenés esetén ~50%-ban a nyersanyag-előállítás, közel 45%-ban a gyártás, 4%-ban pedig a hulladékkezelés felelős.

Hasonlóan az SDS 316L-es scenárióhoz az emissziós hatások túlnyomó része a nyersanyag-előállításához kapcsolódik. Az ionizáló sugárzás (55%) és a biogén karbon (78%) hatáskategóriákon kívül minden hatáskategóriából származó emissziók, 85% felett kapcsolhatóak a nyersanyag-előállításához.

6 Összehasonlító elemzések

A BaU és az SDS scenáriók, hatáskategóriánként kapott eredményei, százalékos formában kerültek kiértékelésre. A legfontosabb hatáskategóriák eredményeit a 3. ábra mutatja be. Az összes kapott eredmény összehasonlításának viszonyítási alapja minden esetben a BaU eredményei voltak (100%-nak véve azokat).

Az *titán ötvözet*tel kapcsolatos scenáriók összehasonlítása során megállapítható, hogy minden hatáskategóriában kedvezőbb eredményeket kapunk az LMD használatával. A legnagyobb mértékű környezeti hatás csökkenés, a humán toxicitás hatáskategóriában figyelhető meg. A többi hatáskategória esetén a BaU

eredményei átlagosan 20-40%-kal magasabbak, mint az SDS scenárió esetén.

Az *acélötvözet*tel kapcsolatos scenáriók összehasonlítás során megállapítható, hogy minden hatáskategóriában kedvezőbb eredményeket az SDS (316L) scenárió adja. A legnagyobb csökkentés az ózonszökkenés hatáskategóriában volt (85%), a legkisebb csökkenés pedig (alig 2%), a humán toxicitás (rákkeltő- szerves anyagok) hatáskategóriában lehetett megfigyelni. A többi hatáskategória esetén az SDS eredményei átlagosan 30-70%-kal kedvezőbbek, mint a BaU scenárió esetén.

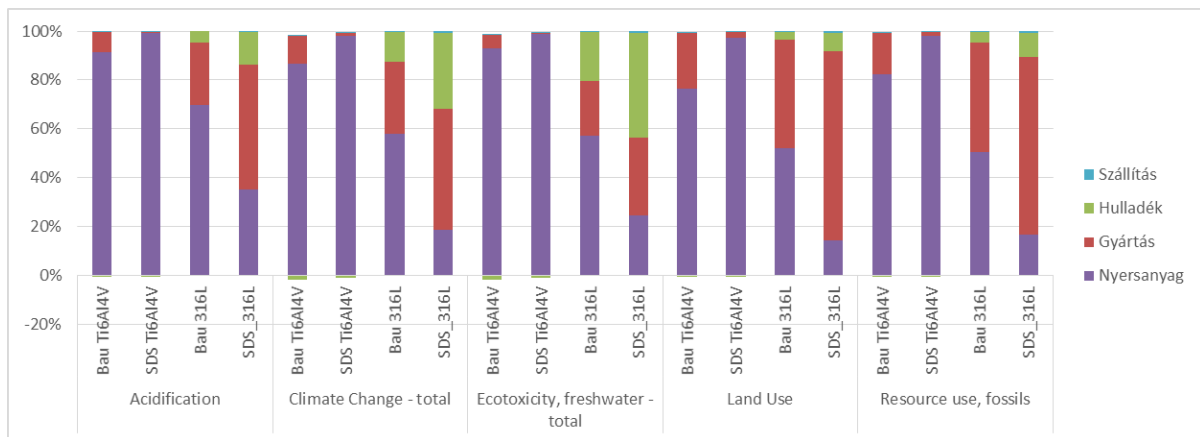
A technológiára összehasonlítása mellett fontos az alapanyagok összehasonlítása is, mivel a gyártás

környezeti terhelése - a kapott eredmények alapján - leginkább az alapanyagok összetételén múlik. Mind a BaU, mind az SDS scenáriók összevetése során a titán alapú ötvözetekhez kapcsolódtak a magasabb környezeti terhelések minden hatáskategóriában.

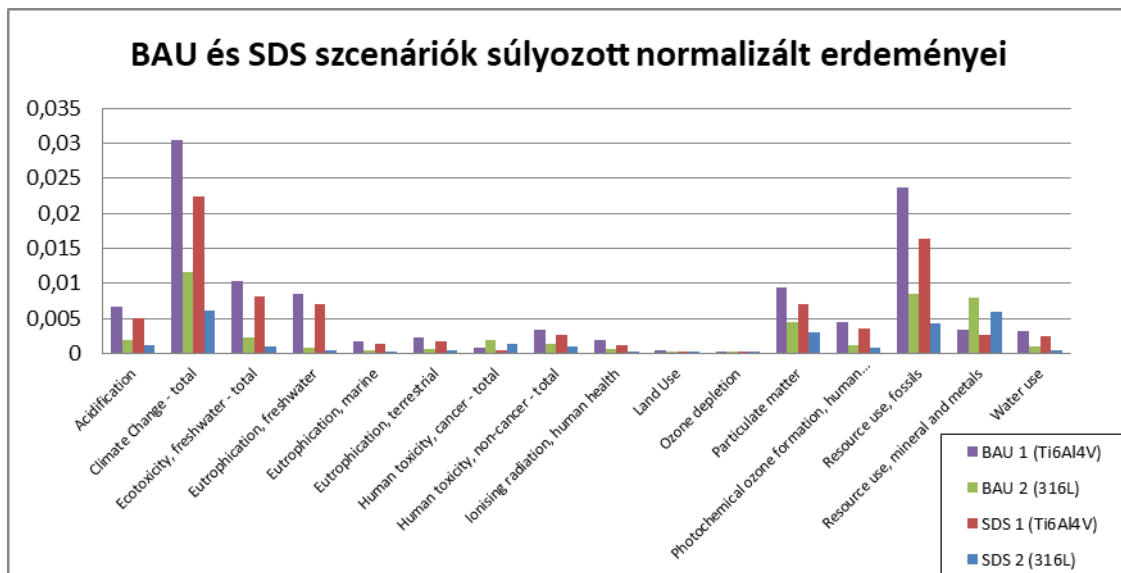
Annak érdekében, hogy a scenáriókban megjelenő hatáskategóriák változatos eredményeit is össze lehessen hasonlítani, a súlyozás és normalizálás módszere is alkalmazásra került. A súlyozás

az „EF 3.0”, a normalizálás pedig „EF 3.0 (Person equivalents)” faktorral történt. Az így kapott eredményeket a 3. ábra mutatja be. A legrelevánsabbnak tekinthető hatáskategóriák:

- a klímaváltozási potenciál
- az édesvízi ökototoxicitás
- az édesvízi Eutrofizáció
- a szállópor
- és a fosszilis nyersanyag-felhasználás voltak.



3. ábra: A vizsgált scenáriók összehasonlítása, a legfontosabb hatáskategóriák alapján (Bay Zoltán Kutatóközpont)



4. ábra: A vizsgált összes scenárióból származó környezeti hatások súlyozott és normalizált értékei (Bay Zoltán Kutatóközpont)

7 Konklúzió

A vizsgálat tárgyaként, alapanyagként egy titán (Ti_6Al_4V) és egy vasalapú (316L) fémötvözetből álló mintadarab, két különböző gyártástechnológia alkalmazásával került környezeti hatáselemzésre.

Amennyiben a technológia került a vizsgálat középpontjában, akkor az SDS scenárió azonos nyersanyag esetén környezeti szempontból kedvezőbb, mint az esztergálás (BaU). Ennek okai között felsorolhatjuk a szakirodalmi forrásokban már megállapított optimalizáltabb nyersanyag-felhasználást és alacsonyabb segédanyag igényt. Az technológia típusa mellett, jelentős befolyásoló tényező az alkalmazott nyersanyag előállításának hatása is. A titán ötvözet vizsgálati eredményei, minden hatáskategória esetében magasabb környezeti terhelést mutattak, mint az acél ötvözeté.

Amennyiben a BaU scenáriók kerülnek összehasonlításra, akkor a klímaváltozás hatáskategóriában a titán ötvözet alkalmazása 260,8%-kal magasabb környezeti emisszióval jár, mint amekkora az acélötvözet esetében jelentkezik.

A próbatest gyártási szakasza utáni, vagyis a termék életciklus végi terhelései a

jelenlegi rendszerhatáron kívül estek, mivel ez a vizsgálat elsősorban magára a gyártási technológiára fókuszált.

A próbatest gyártására vonatkozó összesített eredmények azt mutatták, hogy az LMD technológiának, minden hatáskategóriában, alacsonyabb a környezeti hatása, mint a hagyományos marással végzett gyártásnak. Ez azzal magyarázható, hogy az LMD során, gazdaságosabb a nyersanyag-felhasználás, kevesebb segédanyag szükséges a gyártáshoz és alacsonyabb a keletkező hulladék mennyisége. A marás során szükség van vízre, hűtőfolyadékra és viszonylag gyakran cserélt marófejre. Ezzel szemben az LMD gyártásnál segédanyagként csupán az argon jelenik.

Összességében megállapítható, hogy az LMD gyártás segítséget nyújthat, a fenntarthatóság felé vezető úton, mert a rugalmasabbá teszi gyártást, valamint optimalizálható a felhasznált alapanyagok mennyisége. Széleskörű elterjedése, azonban a technológia jelenlegi korlátaiból (alacsony gyártási volumen, nagyméretű alkatrészek problematikája) adódóan, egyelőre nem várható.

Irodalom

- Daniel Böockin; Anne-Marie Tillman 2019. Environmental assessment of additive manufacturing in the automotive industry; Journal of Cleaner Production 226 (2019) 977-987
- European Comission 2021 Recommendation on the use of Environmental Footprint methods; Sources: https://environment.ec.europa.eu/publications/recommendation-use-environmental-footprint-methods_en (2022.01.05.)
- Inês Ribeiro; Florinda Matos; Celeste Jacinto; Hafiz Salman; Gonçalo Cardeal; Helena Carvalho; Radu Godina; Paulo Peças 2020. Framework for Life Cycle Sustainability Assessment of Additive Manufacturing; Sustainability 2020, 12, 929; doi:10.3390/su12030929
- ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework
- Kaka Ma; Thale Smith; Enrique J. Lavernia; Julie M. Schoenung 2017. Environmental Sustainability of Laser Metal Deposition: The Role of Feedstock Powder and Feedstock Utilization Factor; Procedia Manufacturing; Volume 7, 2017, Pages 198-204

Szerzőink

Gál Balázs Sándor



2012-ben kezdte meg doktori tanulmányait a Miskolci Egyetem Gazdaságtudományi Karán. Kutatási témái közé tartozik a megújuló energiaforrások valamint a fenntartható fejlődés vizsgálata környezeti, gazdasági és társadalmi szempontokból. 2016 óta, a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nél dolgozik, mint tudományos munkatárs. Munkája során, rendszeresen végez életciklus elemzést, széles témakört felölelve.

Bodnárné Sándor Renáta



A Miskolci Egyetem elvégzése után, 1998-tól tudományos munkatárs, majd LCA kutatási szakterület vezető a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nél, Miskolcon.

Nemzetközi és hazai projektekből egyaránt tevékenykedik, mint környezetmérnök. Az életciklus elemzéssel 2007-től foglalkozik, az elvégzett szoftveres elemzések széles szakterületeket érintenek a teljes életciklus vonalán: műanyagipar, élelmiszeripar, energetika, építőipar, terméktervezés, termékgyártás, újrahasználat, hasznosítás, hulladékmenedzsment, stb.

Egy gyógyszerhatóanyag gyártási technológiáinak vizsgálata az LCA módszerével

Mérőné Dr. Nótás Erika

ny. egyetemi docens, SZIE, Kémia Tanszék, Gödöllő,

merone.notas.erika.maria@uni-mate.hu

Horváth Kitti Rózsa

környezetmérnök, biztonságtechnikai előadó, Egészségügy

horvath.kitti1990@gmail.com

Summary

Our goal is to compare two types of manufacturing technology (acidic and alkaline process) of a active pharmaceutical ingredient using the LCA method. GaBi educational software was used for the environmental impact assessment for the preparation of a thesis. The impact of the material and energy balance and the system boundaries on the results of the environmental impact categories were examined also. The second half of the article shows the effect on the results when the analysis was supplemented with one of the databases of the GaBi Professional software. The results we used for educational purposes.

Keywords: active pharmaceutical ingredient, production technologies, life cycle assessment

Kivonat

Célunk egy gyógyszerhatóanyag kétféle gyártási technológiájának (savas és lúgos eljárás) összehasonlítása az LCA módszerével. A környezeti hatásvizsgálathoz egy szakdolgozat készítéséhez a GaBi oktatói szoftverét használtuk. Vizsgáltuk az anyag- és energiamérleget és a rendszerhatárok hatását a környezeti hatáskategóriák eredményeire. A cikk második felében látható milyen hatással van az eredményekre, mikor az elemzést kiegészítettük a GaBi Professional szoftver egyik adatbázisával. Az eredményeket oktatási célokra használtuk.

Kulcsszavak: gyógyszerhatóanyag, gyártási technológiák, életciklus elemzés

1. Bevezetés

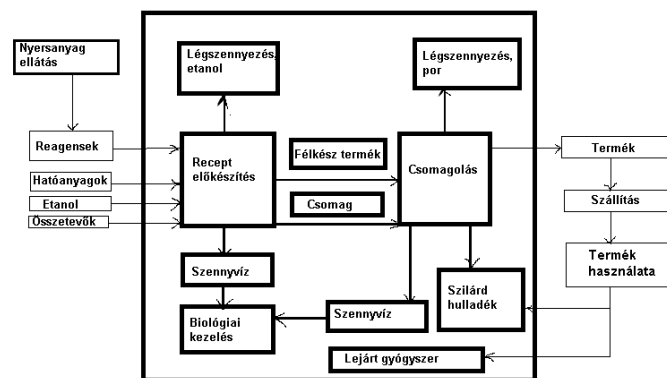
A gyógyszergyártás a legszennyezőbb iparágak közé tartozik. Elsősorban a hatóanyagok és az intermedierek gyártása okozza a környezetvédelmi problémákat. A gyógyszergyárak igen nagyszámú (százas nagyságrendű) technológiát alkalmaznak, és igen sokféle (cégenként ezres nagyságrendű) a felhasznált vegyi anyag. Az is nagy probléma, hogy a felhasznált vegyi anyagok igen kis hányadban (10% alatt) épülnek be a termékbe. Az anyagok visszaforgatási lehetőségeit a

rendkívül szigorú minőségbiztosítási (GMP: Good Manufacturing Practice) előírások nagyon leszűkítik. A nemzetközi előírások nehezítik a termelő eljárások módosítását, mert egy részletes átjelentési, jóváhagyási eljáráshoz kötik azt. A különböző vegyipari ágazatok összevetése szerint a legnagyobb (legrosszabb) környezeti faktoriala a gyógyszergyártás rendelkezik. (A környezeti faktor akár a 100-at is meghaladhatja, vagyis 1 kg gyógyszer hatóanyag előállításához 100 kg, vagy még több

hulladék képződésével jár/hat együtt (KvVM, 2005).

A hulladék politika általában a hulladék hierarchián alapszik. Habár különböző verziói léteznek ennek a rangsornak, általában a következő sorrendet javasolják: (1) a hulladék mennyiségének csökkentése; (2) újrafelhasználás; (3) anyagok újrahasznosítása; (4) égetés energetikai hasznosítással; és (5) hulladéklerakó (Finnveden et al. 2005). A kórházakban és más egészségügyi ellátó intézményekben keletkező hulladékokra vonatkozó egészségügyi hulladékgazdálkodás szerint, a hulladék mennyiségének csökkentése általában prioritást élvez. Azonban, a szabályozás miatt az újrahasználat és az anyagok újrahasznosítása is tilos, mivel magas a veszélyességi potenciálja a fertőző összetevőket, vagy radioaktív frakciót tartalmazó egészségügyi hulladékoknak. Az

égetést viszont gyakran használják az egészségügyi hulladékok ártalmatlanítására, amelyet energetikai hasznosítással kombinálva csökkenthetők a káros környezeti hatások. Az Európai Osztályozás CER kóddal ellátott hulladék kategóriák: települési hulladékhoz hasonló (pl. papír, üveg), speciális hulladék (pl. lejárt gyógyszer, hamu), veszélyes hulladék, (pl. fertőző anyagok, szűrési maradékok, abszorbens anyagok, használt olaj), csomagolási hulladék (alumínium, papír, műanyag, vas) (Arcese et al. 2011). A gyógyszeripari hulladékok lehetnek termelési maradékok, gyártási hulladék, ipari gépekből származó az egészségügyi hulladékhoz hasonlóan kezelt folyékony és gáz hulladék, lejárt gyógyszer. Az 1990-es években az LCA a kutatás újszerű eszköze volt a gyógyszeripari termelési folyamat kiválasztására, az



1. ábra: Gyógyszeripari termelési rendszer folyamatábrája Arcese et al. 2011 alapján

eljárásfejlesztés javítására, különösen a gyógyszerkészítésre. A zöld kémia és a fenntarthatósági célok mérésének szükségessége vezetett az LCA növekvő alkalmazásához a vegyiparban és a gyógyszeriparban. A gyógyszeripari termelés rendszerének LCA elemzéséhez a bölcsőtől a kapuig készült folyamatábra (1.ábra) mutatja a rendszerhatárokat a nyersanyag kinyerésétől a gyártási folyamat végéig.

Általában a gyógyszeripari gyártási folyamat két fő fázisból áll: a recept előkészítése a laboratóriumban és a gyógyszer csomagolása. Agar et al. (2014) egy olasz gyógyszeripari vállalat esettanulmányában megállapította, hogy a szilárd hulladék legnagyobb része papír és üveg, amely főként a csomagolás inputjából származik. Legnagyobb hatása van a hulladék, az olasz jogrendszer által megkövetelt, specifikus végső kezelésének (pl. speciális

orvosi hulladék égetése, veszélyes hulladék lerakása). A hulladék újrahasznosítása a vizsgált cégben 60%-os. A csomagolásra használt papír és üveg kb. 40%-át újrahasznosítják, míg a fennmaradó részt égetik és a hamut hulladéklerakóba helyezik. Általában a gyógyszeripari szektor környezeti analízise szerint a fő szennyezők a fosszilis üzemanyag használata, a szennyvíz és a szerves szilárd hulladék.

Zhao et al. (2009) egy LCA elemzés során a veszélyes hulladékégetést 0%, 15% és 30% energetikai hasznosítás mellett összehasonlították egy nem-égetéssel (gőz autokláv sterilizáció és egészségügyi hulladéklerakás). A legkisebb környezeti hatással a 30%-os energetikai hasznosítással végzett hulladékégetés rendelkezett a vizsgált hatáskategóriák többségében: abiotikus

kimerülés (AD), globális felmelegedés (GW), ózonréteg vékonyodás (OD), humán toxicitás (HT), földfelszíni ökototoxicitás (TET), fotokémiai oxidáció (POC), savasodás (A) és eutrofizáció (E), a rövidtávú (100 év) és a hosszútávú (60000 év) kibocsátást vizsgálva egyaránt. Egy kivétel volt: az édesvízi ökototoxicitás (FAET), amely a hosszútávú kibocsátásnál nem függött lényegesen az égetéses eljárás energetikai hasznosításától, míg a rövidtávú kibocsátásnál a nem-égetéses eljárás környezeti hatása kedvezőbb volt. Viszont a vizsgált nem-égetéses eljárások eutrofizációs hatása mindkét időtávnál lényegesen nagyobb mértékű, kb. hétszeres az égetéses eljárásokhoz képest. A különbség oka, hogy az *égetésnél* a nitrogén 98.9%-a gázzá alakul, 1%-a a salakba és 0,1%-a a vízbe kerül, míg az *egészségügyi hulladéklerakásnál* 2%-a alakul gázzá, rövidtávon 28%-a, hosszútávon 70%-a mosódik az édesvizekbe. Az eutrofizáció közel 100%-t a nem-égetéses eljárásokhoz kapcsolódó, az egészségügyi hulladéklerakóból az édesvízbe kerülő NH_4^+ , PO_4^{3-} és NO_3^- ionok okozzák.

A gyógyszergyárakban a hulladékkezelés során szintén a hulladék mennyiségének csökkentése a legfontosabb, de a GMP előírásai szerint, szűk keretek között lehetőség van a nem veszélyes hulladékok visszaforgatására. A szennyezés-megelőzés során olyan anyagokat, illetve folyamatot használnak, mely a forrásnál csökkenti vagy akadályozza meg a szennyvíz, illetve a szennyező anyagok keletkezését. Olyan gyakorlati alkalmazások is ide tartoznak, melyek csökkentik az energia, víz illetve más természeti erőforrás, továbbá a veszélyes, nem veszélyes anyagok felhasználását. Forrásnál való csökkentés azt jelenti, hogy olyan nyersanyagokat használnak, amely során a létrejött hulladék térfogata, illetve toxicitása kisebb (KvVM, 2005).

A gyógyszergyártás környezeti terhelése elsősorban a hatóanyaggyártásból származik. A kibocsátások nagy részét az alábbi anyagok okozzák:

- *Szerves oldószerek*: igen nagy arányú a felhasználás, amely óhatatlan diffúz veszteséghez vezet.
- *Egyéb szerves anyagok*: nem oldószer-jellegű maradék reagensek, féltermékek, melléktermékek, szennyezések, melyek mennyiség, összetétel gyártási tételenként

azonos reakció körülmények mellett is változóak lehetnek. Problémát lényegében kémiai oxigén igény (KOI) értékük alapján jelentenek.

– *Oldott szervesanyagok*: előfordul sok szerves reakció „anyalúgijában”, de igen jellemzően eredhet a technológiai szennyvizek semlegesítéséből, valamint savas gőzök megkötésére szolgáló abszorpciós berendezésekből is. (Általában elmondható, hogy a korábbi évtizedekben előszeretettel alkalmazott kisózási eljárásokat a gyárak lényegében már megszüntették, illetve másképp csinálják.)

– *Ammónia-ammóniumion*: főleg reakció-anyalúgokban fordul elő, de gyakori a megjelenése telített abszorpciós vizekben is. Sokkal súlyosabb a probléma, ha a befogadó élővíz.

– *Szerves oldószer extrakt (SZOE)*: a gyógyszeripari gyártó tevékenységre nem igazán jellemző zsír-olaj jellegű szennyezések keletkezése, ill. meglétére szolgáló vizsgálat. A mérési szabványban előírt extrakciós oldószer (korábban széntetraklorid, újabban hexán) azonban jelentős mennyiségű egyéb szerves anyagot is kitűnően old.

– *Fémek*: fémek ritkán, legfeljebb fémkatalitikus reakciók anyalúgijaiban jelennek meg. Eltávolításuk a technológiához szorosan kapcsolódó eljárásban megoldott.

– *Ülepedő anyag*: nem jellemző gyógyszergyártási probléma, ülepítéssel-szűréssel megoldott.

– *Adszorbeálható szerves halogének (AOX)*: nagyon sokfajta, élettani szempontból jelentősen különböző, egészségre káros anyagok. A szigorú légszennyezési kibocsátási értékek miatt (ún. VOC –volatile organic compounds: illékony szerves vegyületek-rendelet, 13/99 EK direktíva) az iparág a klórozott oldószerek mennyiségének csökkentésére kényszerül.

A szennyvízkezelés főbb jellemzői, a hatóanyag- és intermediér gyártás problémái
Jellemző technológiai szennyvizek:

- Hatóanyag kinyerés utáni *vizes anyalúgok* (fázisválasztás, szűrés, centrifugálás); főbb szennyezés típusok: szerves oldószerek, összeszó, ammónia, szerves oldószer extrakt, definiálatlan szerves-anyagok stb.
- Hagyományos (vízgyűrűs) vákuumgépekből származó *vákuumvizek*; jellemző szennyezés: *szerves oldószerek*,

– Mosó és öblítővizek: termelő berendezések tisztításából öblítéséből származnak; jellemző szennyezés-forma: nem meghatározható (KvVM, 2005).

A gyógyszergyárak környezetvédelmi helyzetét jellemzi, hogy a gyógyszeripar Magyarországon a meglehetősen erős szervezettségű, magas műszaki, irányítási és környezettudatossági színvonalon lévő iparágak közé tartozik. A környezetszennyezés integrált megelőzéséről és csökkentéséről szóló, 2008/1/EK irányelv, amely a 96/61/EK tanácsi irányelvet (IPPC1 direktíva) váltotta, kiemelkedő jelentőségű környezetvédelmi irányelv. Az IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) célja, a környezetre jelentős hatással bíró tevékenységek olyan

egységes engedélyezési rendszerének megteremtése, melynek eredményeként a szennyezés megelőzhető, és amennyiben ez nem lehetséges, a lehető legkisebb mértékűre csökkenthető a környezet egészének védelme céljából.

Az IPPC új, alapvető követelménye az elérhető legjobb technikák (BAT: Best Available Techniques) bevezetése és alkalmazása. A BAT összefoglalva a következőket jelenti: mindazon technikák, beleértve a technológiát, a tervezést, karbantartást, üzemeltetést és felszámolást, amelyek elfogadható műszaki és gazdasági feltételek mellett gyakorlatban alkalmazhatóak, és a leghatékonyabbak a környezet egészének magas szintű védelme szempontjából (KvVM, 2005).

2. Anyagok és módszerek

A tanulmányunk célja egy gyógyszerhatóanyag előállítására régóta használt savas és a továbbfejlesztett lúgos eljárásának összehasonlítása az életciklus elemzés módszerével. A funkcionális egység: 100 kg gyógyszerhatóanyag előállítása.

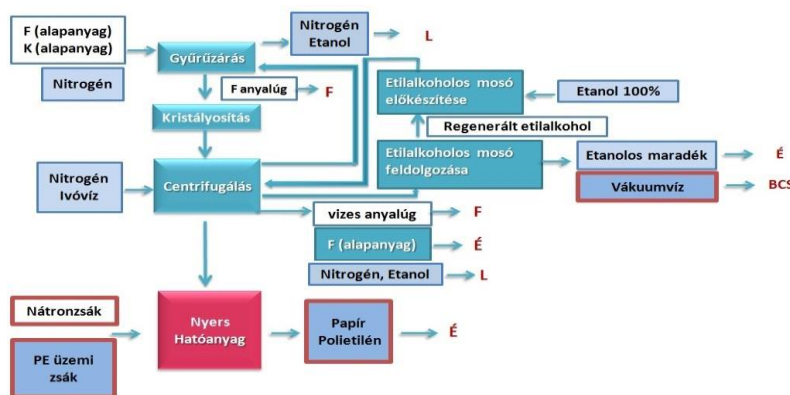
Négy hatáskategóriát vizsgáltunk: eutrofizáció, globális felmelegedés,

savasodás és humán toxicitás. A környezeti hatásértékelést kétszer végeztük el, először a német GaBi Education szoftvert és a CML 2001 hatásértékelő módszert alkalmaztuk. Ezután az elemzést kiegészítettük a GaBi Professional szoftver egyik adatbázisával (Ecoinvent 3.1, EDTA production).

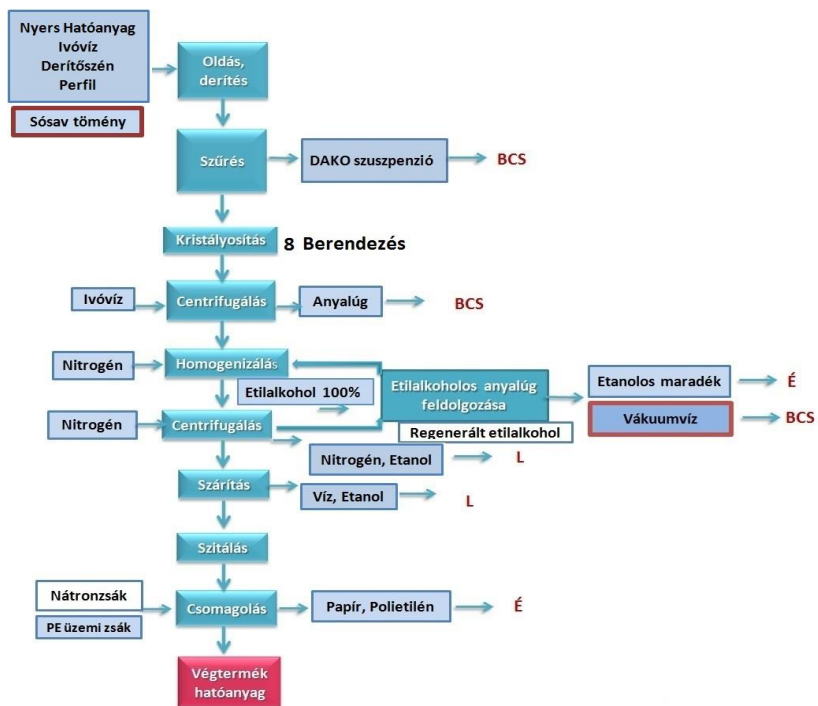
2.1. A technológiák leírása, rendszerhatárok

Mindkét technológia két fő részből áll: a nyers és a végtermék hatóanyag előállítása, amely a savas eljárásnál elkülönül, mivel a nyers hatóanyag a centrifugából polietilén

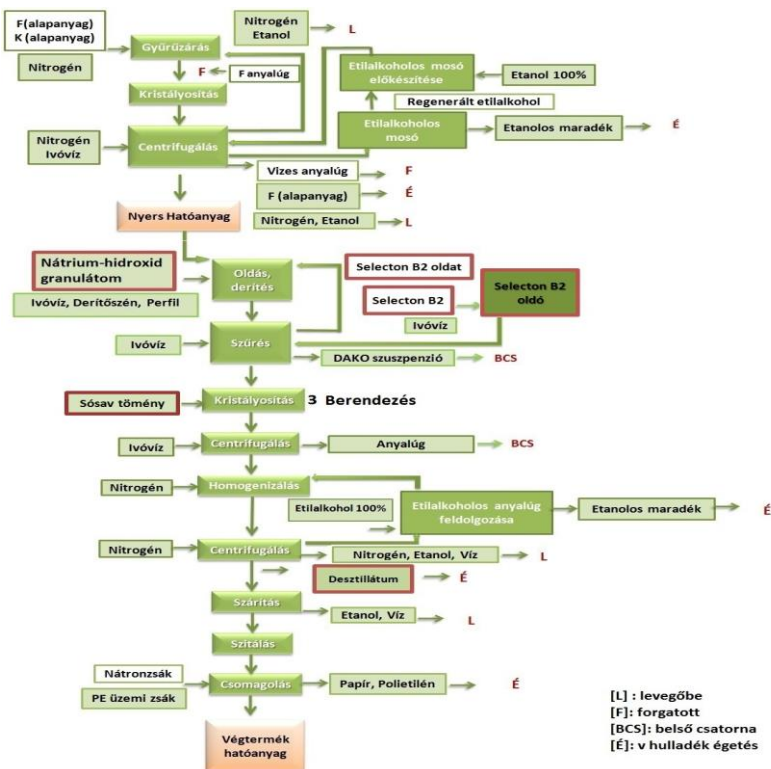
(PE) zsákokba kerül (1/a. ábra) és csak később történik a további feldolgozás (1/b. ábra), míg a lúgos eljárásnál a nyers hatóanyagot rögtön feldolgozzák (2. ábra).



1/a. ábra: A nyers hatóanyag előállítása a savas eljárásnál (L: levegőbe, É:égetés, F: forgatott, BCS: belső csatornába) (forrás: saját szerkesztés)



1/b. ábra A végtermék hatóanyag előállítása a savas eljárásnál (forrás: saját szerkesztés)



2. ábra A nyers és a végtermék hatóanyag előállítása a lúgos eljárásnál (forrás: saját szerkesztés)

A rendszerhatárokat az 1. és 2. ábrákban a színes téglalapok jelzik, a fehér háttérű téglalapokba írt anyagokat nem tudtuk figyelembe venni az elemzésnél, egyrészt azért, mivel az elemzés első részében alkalmazott oktatói szoftverben ezekre vonatkozó adatbázis nincs: alapanyagok, Selecton B2, nátronszák. Másrészt mindkét eljárásához azonos alapanyagokat (F,K) használnak a gyűrűzárás folyamatához, melyek tömege és az előállításukhoz használt áram mennyisége is megegyezik, valamint ezeknek a szerves vegyületeknek nincs adatbázisa még a professzionális szoftverben sem. A titoktartási szerződés miatt ezeket nem lehet megnevezni, ahogy a gyártott hatóanyagot sem. A Selecton B2, másnéven EDTA (etilén-diamin-tetraacetát) komplexképző anyagot a lúgos eljárásnál használják a gyártáskor a terméket szennyező fémionok (Fe^{2+} ill. Fe^{3+}) megkötésére, amelyek lúgos közegben színes vas-hidroxid csapadékot képeznek, amely a gyógyszerhatóanyag elszíneződését okozhatja. Ferdinand Münz osztrák kémikus 1935-ben szintetizálta az EDTA-t (Paolieri,2017). A Selecton B2-re vonatkozó adatbázisunk nem volt az oktatói szoftverben, azonban a Selecton B2 GaBi professzionális szoftverrel elvégzett hatásértékelésének eredményét, amikor lehetőségünk volt rá, fel tudtuk használni, ezért a környezeti hatásértékelést kétféleképpen végeztük el, először a Selecton B2 adatai nélkül, majd azzal együtt. A regenerált etilalkoholt és anyalúgot, sem vettük figyelembe, mivel ezeket többször regenerálják, a gyártásban újra felhasználják mindkét módszernél. Az alap- és segédanyagok szállítása, a hatóanyag raktározása, szállítása között nincs különbség, ezért ezeket sem vettük figyelembe.

Mindkét eljárásnál a *nyers hatóanyag előállítása* három részfolyamatból áll: gyűrűzárás, kristályosítás és centrifugálás. A *gyűrűzáráskor* az alapanyagokból kb. 150 °C-on, 16 óra alatt jön létre a nyers hatóanyag, amelyhez az előző sarzs

anyalúgját is felhasználják, a maximális forgatás hétszer történhet. Nitrogén gázzal inertizálnak az oxigén koncentráció csökkentése érdekében. A *kristályosításkor* a reakcióelegyet lehűtik kb. 25 °C-ra. *Centrifugálásnál* a nyers hatóanyagot etilalkohollal és vízzel mossák. Az etilalkoholos mosófolyadékot desztillálással tisztítják, majd kiegészítik 100%-os etilalkohollal és újra felhasználják. A visszaforgatások száma nincs meghatározva. A keletkező szilárd szennyezőket (pl. papír, polietilén) égetésre küldik, a folyékonyak (pl. vákuumvíz) a belső csatornába kerülnek tisztításra, a gázok, gőzök (nitrogén, etanol, víz) a levegőbe jutnak. Ezután a savas eljárásnál a nyers hatóanyag PE zsákkal bélelt nátronszákokba kerül, míg a lúgos eljárásnál rögtön feldolgozzák.

A *végtermék hatóanyag előállítása* mindkét eljárásnál kilenc lépésből áll. Az *oldás, derítés* szakaszban a savas eljárásnál a víz kémhatását tömény sósavval pH=3.1-3.4-re állítják be, majd a nyers hatóanyag bemérése után a vizes szuszpenzió hőmérsékletét közel 100 °C-ra melegítik derítőszen alkalmazása mellett. A lúgos eljárásnál ettől eltérően a vízhez nátrium-hidroxidot adagolnak, az oldat hőmérséklete csak 25-30°C. A lúgos közegben a nyers hatóanyag még alacsonyabb hőfokon is jobban oldódik, mint savas közegben, ezért jóval kevesebb vízre és energiára van szükség. Viszont a lúgos eljárásnál szükség van a terméket esetleg elszínező fémionok megkötéséhez egy komplexképző anyagra (Selecton B2). A következő lépés a *szűrés*, amikor a derítőszenet előmelegített szűrőkkel eltávolítva, a vizes oldatot kristályosító készülékekbe vezetik, és a végén ivóvízzel kimossák a szűrőrendszert. A szűréskor keletkező széntartalmú DAKO szuszpenzió a belső csatornába kerül. A *kristályosítás* a lúgos eljárásnál a kevesebb víz felhasználás miatt csak 3 berendezésben történik a savas eljárásnál alkalmazott 8 berendezéssel szemben, ahol így több az áramfelhasználás és több emberre is van szükség. A

kristályosítás a savas eljárásnál az oldat 10 °C-ra való lehűtésével valósul meg, míg a lúgos eljárásnál tömény sósav hozzáadásával, a savas kémhatás (pH=3,0-4,0) beállításával indul be, majd itt is lehűtik a rendszert. Ezért a lúgos eljárásnál fajlagosan több sósavra van szükség. *Centrifugálás*kor a kivált kristályoktól elválasztják az anyalúgot és a mosáshoz használt vizet, amelyeket a belső csatornába engednek. A *homogenizálás* során a nitrogénnel inertizált homogenizáló készülékben egy órán át kevertetik az átkristályosított hatóanyagot forgatott etilalkohollal. Újabb *centrifugálás* után a hatóanyag a szárítóba kerül, ahol minimum

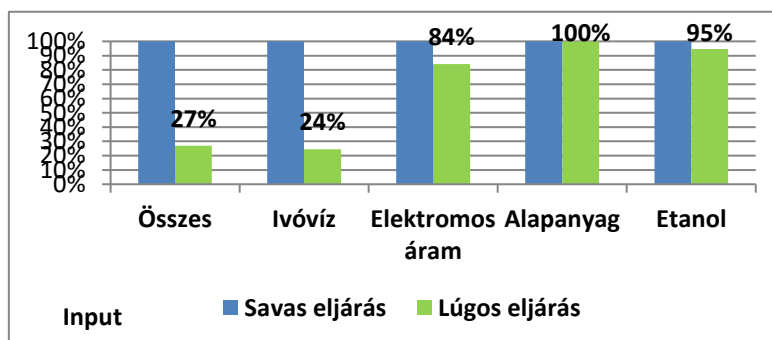
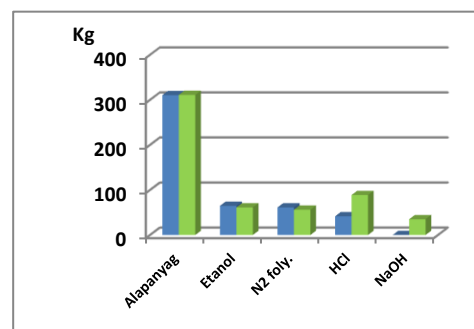
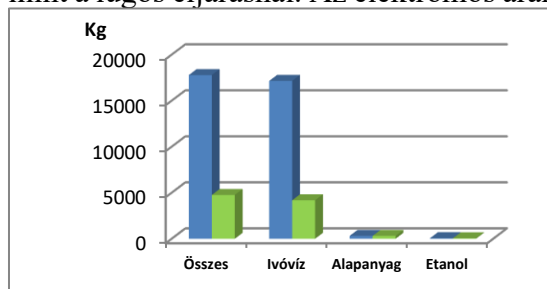
6,5 órán át *szárítják* 80-100 °C-on. A centrifugálásakor keletkező etilalkoholos anyalúgot desztillálással tisztítják, hozzáadnak megfelelő mennyiségű 100%-os etilalkoholt, majd újra felhasználják a következő sarzs homogenizálásához. A visszaforgatások száma nincs meghatározva. Az etanolos maradék az égetőbe kerül. A centrifugálásakor a nitrogén, az etanol és a vízgőz a levegőbe jut. A szárítás után a hatóanyagot *szítálják*, majd polietilén zsákkal bélelt nátronszakba *csomagolják*. Felhasználás után a zsákokat az égetőben ártalmatlanítják.

3. Eredmények

3.1. Anyag- és energiamérleg

Összehasonlítottuk a két eljárás anyagmérlegét a gyógyszergyár által megadott adatok alapján. Az input adatok vizsgálata során megállapítható, hogy a legnagyobb különbség az ivóvíz felhasználásában volt. A savas eljárásnál kb. négyszer annyi ivóvizet használnak fel, mint a lúgos eljárásnál. Az elektromos áram

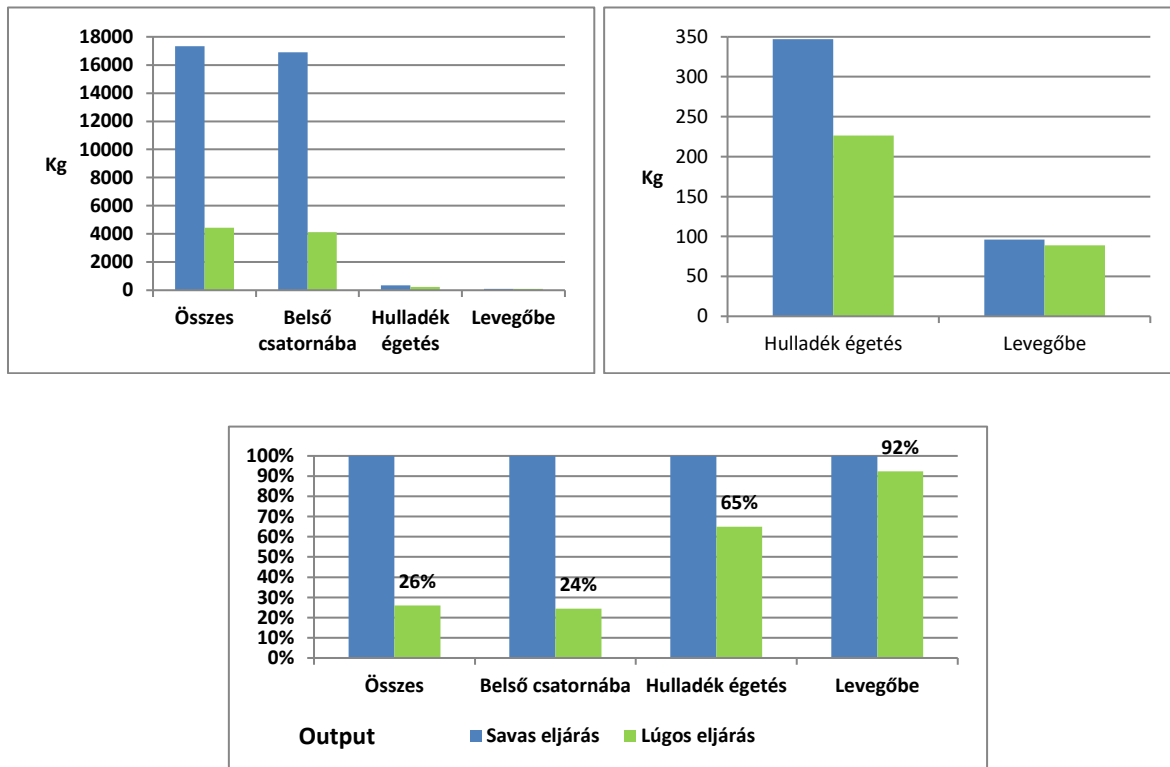
felhasználása 16%-kal több, az etanol mennyisége pedig 5%-kal több a savas eljárásnál (3. ábra). Viszont sósavból 114%-kal többet használnak a lúgos eljárásnál és nátrium-hidroxid felhasználás csak itt történik. A hatóanyag-gyártáshoz használt alapanyagok mennyisége teljesen megegyezik mindkét eljárásnál (3. ábra).



3. ábra: Az input anyagok mennyisége a savas és lúgos eljárás során (forrás: saját szerkesztés)

A gyártás során használt anyagoknak csupán kis százaléka az, amelyet tovább használhatnak, illetve eladhatnak, a nagy része hasznosíthatatlan. A kibocsátott szennyező anyagok legnagyobb része a belső csatornába kerül, ahol tisztítási eljárásoknak vetik alá, melyek közé tartozik a szűrés és a szennyvíz pH-jának semlegesre állítása. A belső csatornába került szennyvíznek ellenőrzik a szerves

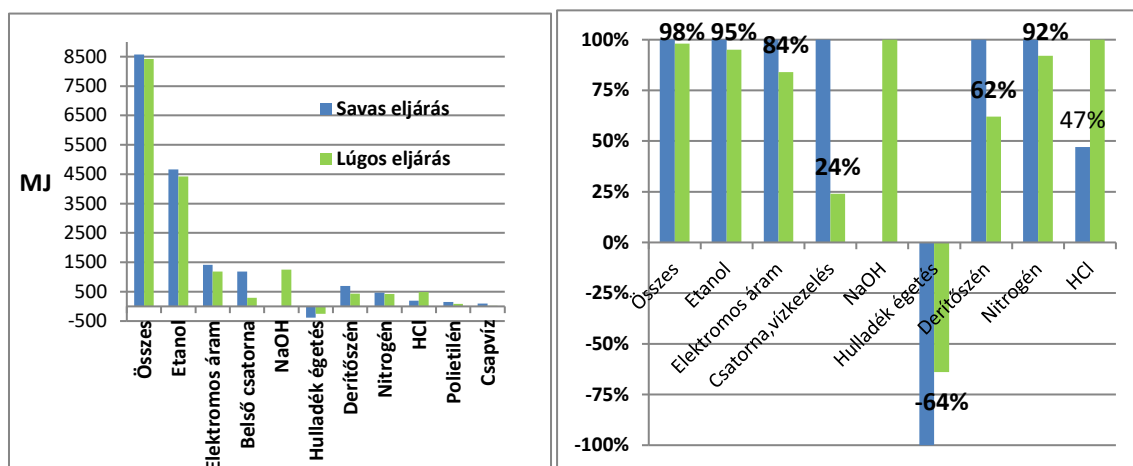
anyag tartalmát (KOI, TOC). A szennyvíz mennyisége, a jóval nagyobb ivóvíz felhasználás miatt, a savas eljárásnál több mint négyszerese a lúgos eljárásnál kibocsátotthoz képest. Ezen kívül még jelentős különbség van az égetésre küldött hulladék mennyiségében is, 35%-kal több a savas eljárás kibocsátása. A levegőbe kerülő gázok, gőzök mennyisége között 8% a különbség a savas eljárás javára (4.ábra).



4. ábra: Az output anyagok mennyisége a savas és lúgos eljárás során
(forrás: saját szerkesztés)

Az input-output energiamérleget együttesen vizsgálva megállapítható, hogy a két eljárás között csak 2% a különbség a savas eljárás javára. Ennek főbb okai a következők: a kisebb ivóvíz felhasználás miatt a lúgos eljárás szennyvízkezelésre fordított energia mennyisége csak 24%-a, az elektromos energia felhasználása pedig 84%-a a savas

eljárásénak. Viszont a lúgos eljárásnál a nátrium-hidroxid és a nagyobb mennyiségű sósav felhasználása a lúgos eljárás energiaigényét növeli. A két eljárás energiaigényének különbségét csökkenti az is, hogy a hulladék égetésnél a hasznosított hő miatt negatív értékekkel kell számolni, és ez az érték a savas eljárásnál 36%-kal nagyobb, mint a lúgos eljárásnál.



5. ábra: Az input-output energiamérleg fontosabb elemei a savas és lúgos eljárás során (forrás: saját szerkesztés)

3.2. Környezeti hatásértékelés a Selecton B2 nélkül

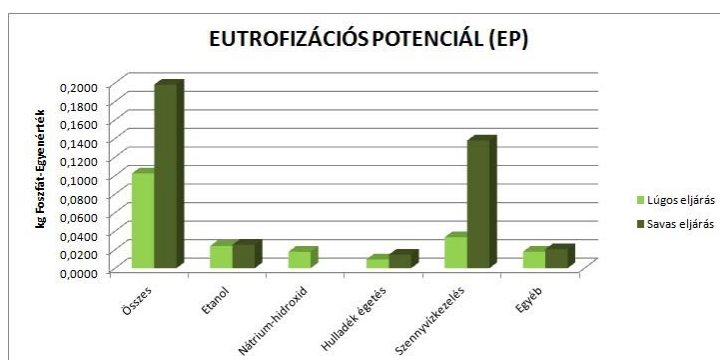
A lúgos eljárásnál használt komplexképző Selecton B2 vegyületre vonatkozó adatbázis nem szerepel a GaBi oktatói szoftverben, ezért először enélkül végeztük el az elemzést a szakdolgozat készítéséhez.

(kb.70%-ban). Jelentős mértékű még a gyártás során felhasznált etilalkohol és a lúgos eljárásnál alkalmazott nátrium-hidroxid hatása is az elemzéshez használt CML 2001 módszer szerint.

3.2.1. Eutrofizációs-potenciál

A savas eljárás eutrofizációra gyakorolt hatása kétszerese a lúgos eljárásénak (6. ábra). Ezt elsősorban a belső csatornába kibocsátott, a lúgos eljárásnál kb. négyszer nagyobb mennyiségű anyalóg tisztítása befolyásolja a legnagyobb mértékben

Az eutrofizációt okozó szennyező anyagok egy része a levegőbe jut, ezen belül a szervesetlen kibocsátás a meghatározó, aminek nagy részét nitrogén-oxidok alkotják. Ezen kívül jelentős az édesvízbe történő szervesetlen kibocsátás, nagy részben foszfor és nitrát formájában

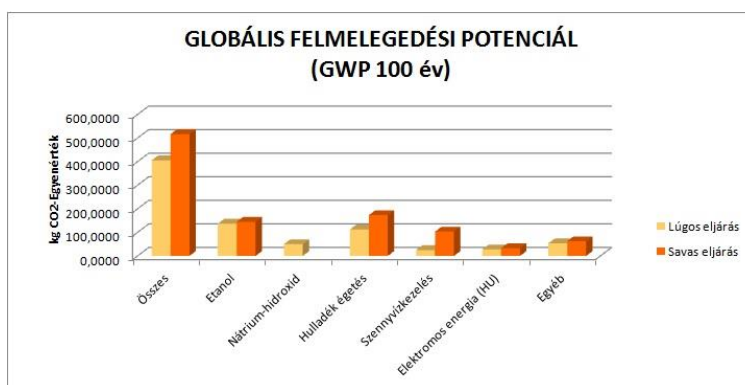


6. ábra: Az EP-t befolyásoló tényezők (forrás: saját szerkesztés)

3.2.2. Globális felmelegedési potenciál

A savas eljárás kb. 21%-kal nagyobb mértékben járul hozzá a 100 évre számított globális felmelegedéshez a lúgos eljáráshoz képest (7. ábra). A savas eljárásnál legnagyobb szerepe van a hatóanyag gyártása során keletkező kibocsátott etanolos maradék égetésének (34%), ami a lúgos eljárásnál 28%. Fontos még az etanol előállításával járó környezetszennyezés (lúgos eljárás: 34%, savas eljárás: 28%).

A savas eljárásnál jelentős még a csatornába kibocsátott anyalúg, vákuumvíz és DAKO szuszpenzió tartalmú szennyvíz kezelésének hatása is (20%). A lúgos eljárásnál, kisebb mértékben (kb.10%) ugyan, de hozzájárul a GWP-hez a nátrium-hidroxid gyártásával járó környezetszennyezés. A GWP-t okozó szennyezőanyagok a levegőbe kerülnek, nagyrészt szén-dioxid formájában.

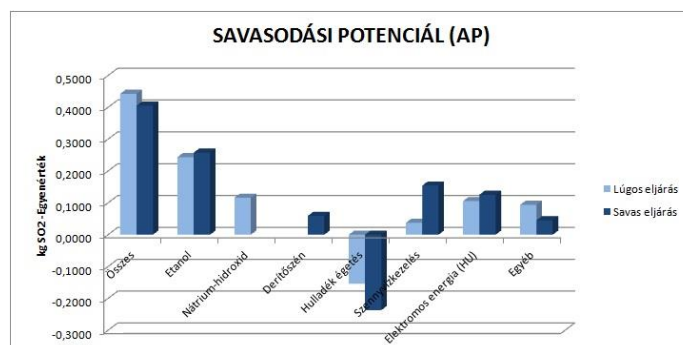


7. ábra: A GWP-t befolyásoló tényezők (forrás: saját szerkesztés)

3.2.3. Savasodási potenciál

A lúgos eljárásnak kismértékben (8%-kal) nagyobb a terhelése a savasodásra (8. ábra). A savasodás kialakulásáért legnagyobb mértékben (a lúgos eljárásnál 55%-ban, a savas eljárásnál 64%-ban) a hatóanyag előállítása során felhasznált etanol gyártása felelős. A kibocsátott desztillátum és etanolos maradék égetésének hatása szintén fontos (lúgos eljárás: 35%, savas eljárás: 58%), amit a program negatív értékkel vesz figyelembe.

Ennek oka az, hogy a GaBi programban értékelt korszerű égetőműben megkötik a savasodást okozó gázokat, valamint termikus hasznosításkor, az égetés során felszabaduló hőt fűtésre használják, így csökken a hagyományosan előállított, pl. a földgáz elégetésekor keletkező, a savas kibocsátást növelő hő iránti igény, ezért ilyenkor az égetéssel járó folyamatok nem járulnak hozzá a savasodáshoz.



8. ábra: Az AP-t befolyásoló tényezők (forrás: saját szerkesztés)

Mivel a savas eljárásnál nagyobb mennyiségű anyag kerül égetésre, nagyobb lesz a negatív érték, ami nagyobb mértékben csökkenti a környezeti hatást. A lúgos eljárásnál a nátrium-hidroxid felhasználása, a savas eljárásnál a belső csatornába küldött szennyvíz tisztítása, valamint mindkét eljárásnál az elektromos áram használata is döntően hat a savasodásra (8. ábra). A savasodást okozó szennyezőanyagok teljes mennyisége a levegőbe kerül, főképpen nitrogén-oxidok és kén-dioxid formájában.

Érdeemes megnézni, hogy a rendszerhatárok módosítása hogyan hat a savasodási potenciál alakulására. Azért is indokolt ez, mivel hazánkban nem minden hulladékégetőben történik hőhasznosítás, és a szennyező anyagok teljes kiszűrése se valósul meg mindenhol. Amennyiben nem vesszük figyelembe a hőhasznosítással járó hulladék égetést, a savas eljárás kb.7%-kal

3.2.4. Humán toxicitási potenciál

A lúgos eljárás 15%-kal nagyobb mértékben növeli a humán toxicitást, mint a savas eljárás (9. ábra). Mindkét eljárásnál a hulladékégetés hatása hat legerősebben a humán toxicitásra. A program ezt negatív értékkel veszi figyelembe, aminek oka, hogy a program által vizsgált égetőműben kiszűrik a mérgező anyagokat, valamint a hasznosított hő csökkenti a toxicitást, mivel csökken a fosszilis tüzelőanyagok elégetésével hagyományosan előállított, a HTP-t növelő hő iránti igény. Mivel a savas eljárásnál nagyobb mennyiségű anyag kerül égetésre, nagyobb lesz a negatív érték

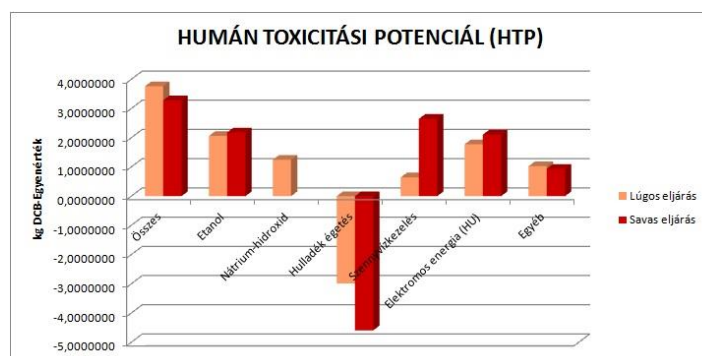
lesz szennyezőbb a savasodásra a lúgos eljáráshoz képest (1.táblázat). A hőhasznosítás jelentőségét igazolja, hogy ez kb. 2/3-d részére csökkenti mindkét eljárás AP-re gyakorolt hatását (3. táblázat).

1. táblázat: AP értékek a hulladékégetés nélkül (kg SO₂ Equiv.)

	Össz	Etanol	NaOH	Energia	Szenny- víz	Egyéb
Lúgos eljárás	0,60	0,244	0,12	0,106	0,037	0,094
Savas eljárás	0,64	0,258	-	0,125	0,154	0,10

Forrás: GaBi Education, CML 2001 módszer

(-140%), ami nagyobb mértékben csökkenti a környezeti hatást a lúgos eljáráshoz képest (-79%). A humán toxicitást a felhasznált anyagok közül mindkét eljárásnál leginkább az etilalkohol (lúgos 55%, savas 66%), és a lúgos eljárásnál a nátrium-hidroxid (33%) befolyásolja. A kibocsátott anyagok közül a belső csatornába vezetett anyalúg stb. szennyvízkezelésének hatása elsősorban a savas eljárásnál döntő (81%) a nagyobb mennyiségű szennyvíz miatt. Jelentős szennyező hatása van az elektromos áram használatának is (lúgos 47%, savas 64%).



9. ábra: A HTP-t befolyásoló tényezők (forrás: saját szerkesztés)

A CML 2001 módszer szerint a humán toxicitást növelő szennyező anyagok legnagyobb mértékű kibocsátása a levegőbe történik (60-69%), nagyrészt nehézfém (arzen, nikkel) formájában. Szervetlen kibocsátásként nitrogén-oxidok, és ugyanolyan arányban szerves anyagként benzol.

Hasonlóan a savasodás vizsgálatához, itt is érdemes megnézni, hogy a rendszerhatárok módosítása hogyan hat a humán toxicitási potenciál alakulására.

Megállapítható, ha nem számolunk a hőhasznosítással járó hulladék égetéssel, a savas eljárás kb.17%-kal lesz szennyezőbb a humán toxicitásra a lúgos eljáráshoz képest (2.táblázat). A hőhasznosítás jelentőségét igazolja, hogy ez 44 ill. 58%-kal csökkenti a lúgos ill. a savas eljárást

3.3. Környezeti hatásértékelés a Selecton B2 figyelembevételével

A rendszerhatár változtatásával, a lúgos eljárásnál használt komplexképző Selecton B2 vegyület gyártásának a GaBi professzionális szoftverrel elvégzett hatásértékelésének eredményével együtt is elvégeztük a környezeti hatásértékelést. A kapott adatokat a 3. táblázat mutatja.

Megállapítható, hogy a Selecton B2 használata az EP, GWP és az AP hatáskategóriákban csak nagyon kismértékű növekedést okoz. Az EP és a GWP hatáskategóriában a lúgos eljárás

HTP-re gyakorolt hatását (3. táblázat).

2. táblázat: HTP értékek a hulladékégetés nélkül (kg DCB Equiv.)

	Össz	Etanol	NaOH	Energia	Szennyvíz	Egyéb
Lúgos eljárás	6,75	2,06	1,25	1,77	0,64	1,02
Savas eljárás	7,87	2,18	-	2,11	2,65	0,93

Forrás: GaBi Education szoftver, CML 2001 módszer

hatása így sem éri el a savas eljárás környezetkárosító hatását, míg az AP esetében a hőhasznosítással járó hulladék égetéssel vizsgálva a Selecton B2 a lúgos eljárás környezet-károsító hatását kismértékben, közel 5%-kal növeli, így az 12%-kal lesz károsabb a környezetre a savas eljáráshoz képest.

Azonban a Selecton B2 gyártásának HTP-re gyakorolt hatása jelentős, ennek eredményeként a lúgos eljárás humán toxicitásra gyakorolt hatása a hőhasznosítással járó hulladék égetéssel vizsgálva közel kétszerese a savas eljárásénak, míg a hulladék égetés

3.táblázat: A Selecton B2 hatása

	Hulladék égetéssel		Hulladék égetés nélkül	
	Lúgos eljárás	Savas eljárás	Lúgos eljárás	Savas eljárás
EP				
Selecton B2 nélkül	0,10	0,20	0,09	0,18
Selecton B2-vel	0,12	0,20	0,11	0,18
GWP				
Selecton B2 nélkül	406	517	293	344
Selecton B2-vel	412	517	299	344
AP				
Selecton B2 nélkül	0,44	0,41	0,60	0,64
Selecton B2-vel	0,46	0,41	0,61	0,64
HIP				
Selecton B2 nélkül	3,76	3,28	6,75	7,87
Selecton B2-vel	6,25	3,28	9,24	7,87

nélkül vizsgálva kb.17%-kal haladja meg a savas eljárás értékét. Ez összefügg azzal, hogy a Selecton B2, komplexképző gyártásakor nehézfémek jutnak a levegőbe (pl. Cr⁶⁺, As, Ni, V), az édesvízbe (pl. Se, Mo, Sb) és a talajba. Szervetlen (pl. HF, Ba) és halogénezett szerves szennyezők is felszabadulnak.

Sok kutatás vizsgálja az EDTA tartalmú termékek környezeti hatását, mely során a vegyület a növényekbe, és a tápanyaggal az emberi szervezetbe is bejuthat. EDTA perzisztens szennyezőként viselkedik a környezetben, fokozva a nehézfémek mobilitását és biológiai hozzáférhetőségét. (Oviedo & Rodriguez,2003). A 2-es vízminőségi veszélyességi osztályba (WGK) tartozó Selecton B2, szintetikus kelátképző, amely oldható komplexet képez sok fémmel, (pl. Pb, Cd, Cu Fe és Zn), ezért elterjedten használják a fitoremediációban. Az eljárás során nehézfémekkel (pl. Pb, Cd, Cu) szennyezett talajok kármentesítésére használják. A kelátok növelik az ólom deszorpcióját a talajból a talaj oldatba, elősegítik az ólom szállítását a kísérletben használt kukorica xylembe, és növelik az

ólom áthelyeződését a gyökérből a hajtásba Huang et al. (1997). Az ólom az EDTA komplexben több mint 1 m/m%-ban akkumulálódik a hajtás száraz biomasszájában (Vassil et al.,1998).

Az EDTA használatának előnye, hogy visszanyerhető és újrahasználható a talaj mosási folyamata után és nem eredményezi a talaj erős savanyítását (Naghipour et al. 2016). Azonban az utóbbi időben egyre több kutató foglalkozik az EDTA használatának ökológiai kockázatával. Ez kapcsolatos az EDTA és / vagy fém-EDTA komplex (1) környezeti állandóságával, ugyanis ezek a vegyületek nehezen bomlanak le a természetben; (2) az EDTA és / vagy fém-EDTA komplex potenciális toxicitásával a növényekre; és (3) a kimosódással és talajvízszennyezéssel (Shahid et al.2014).

Az EDTA 0,5 mM-nál nagyobb koncentrációjánál jelentős vízvesztés történik a hajtás szövetben, amely komoly esetben a szövet látható száradását és nekrotikus károsodást okoz. AZ EDTA 0,5 mM koncentrációjánál a növény nagy mennyiségű ólmot akkumulál látható fitotoxicitás nélkül (Vassil et al.).

Ezek a problémák jelentkezhetnek akkor is, amikor az EDTA-t nem célzottan a fitoremediációban használják, hanem amikor ellenőrizetlenül kerül a környezetbe, pl. gyógyszergyárak szennyvizei, mosóporok oldatai. Emiatt az EU környezetbarát termékjelét nem kaphatja meg olyan mosószer, amely EDTA-t tartalmaz.

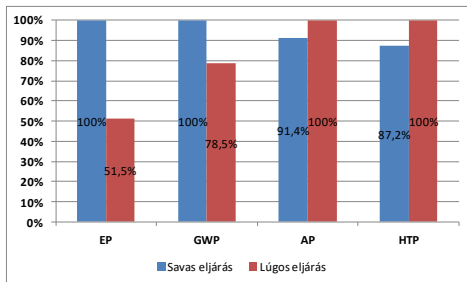
Az elmúlt években, a biológiailag nem-lebontható kelátképző szerek által okozott környezeti veszélyek miatt, egyre nagyobb az érdeklődés, a nehézfémek talajból és üledékből való kivonására használható, biológiailag lebomló és környezetbarát kelátképző szerek iránt, pl. etilén-diamin-diszukcinát (EDDS) és nitrilo triecetsav (NTA) (Naghipour et al., 2016).

Hartley et al. (2014) biológiailag lebomtható kelátképző szereket, (etilén-diamin-N, N-diborostyánkősavat, EDDS és glutamin-N,

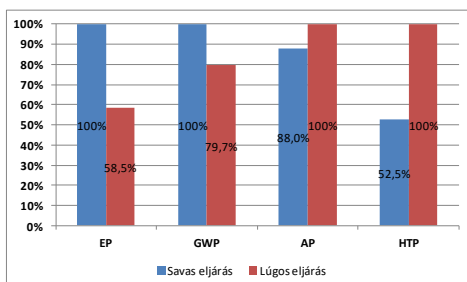
N-diecetsavat, GLDA) vizsgált. Megállapították, hogy az EDDS és GLDA kelátképző szerekkel végzett fém extrakció hasonló eredményt adott az EDTA-val végzetthez, és hatékonyabb volt a pH= 4-nél, mint pH= 8-nál, valószínűleg a fém csapadékok és oxidok savas oldódása miatt. Az EDDS lecsökkentette a csurgalék Cu és As koncentrációját 5 mg L⁻¹ alá, amely megfelel a hulladék lerakás átvételi kritériumainak. Gluhar et al. (2020) megállapították, hogy a talajmosás során vizsgált biológiailag lebomló kelátképzők közül a GLDA volt a leghatékonyabb a Cd eltávolításában, de az EDTA eljárás felülmúlta a GLDA-t a Pb eltávolításában.

A lúgos és savas eljárás környezeti hatását százalékosan is összehasonlítottuk, vizsgálva azt is, hogy a rendszerhatár megválasztása, (a hulladékégetés hőhasznosítása és a Selecton B2 figyelembevétele) mennyiben módosítja az eredményeket.

A hőhasznosítással járó hulladék égetéssel együtt vizsgálva a hatáskategóriákat (10. és 11. ábra), megállapítható, hogy a Selecton B2 figyelembevételelől függetlenül, az EP



10. ábra: Hulladék égetéssel, Selecton B2 nélkül

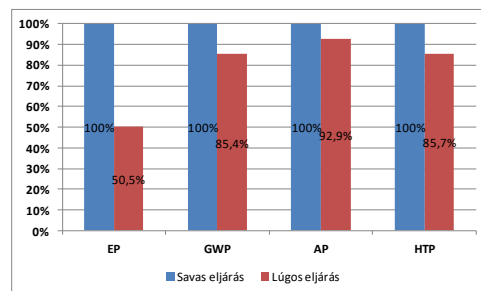


11. ábra: Hulladék égetéssel, Selecton B2-vel

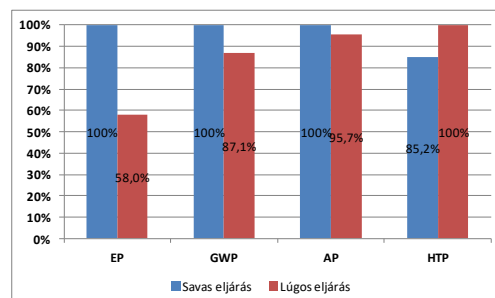
és a GWP hatáskategóriákban a savas eljárás a szennyezőbb, míg az AP és a HTP hatáskategóriákban a lúgos eljárás a szennyezőbb. A Selecton B2 figyelembevétele kismértékben csökkentette a két eljárás EP-re és GWP-re gyakorolt hatásának különbségét, valamint kismértékben növelte az eljárások AP értékének különbségét. A legszembetűnőbb az, hogy a Selecton B2 hatására a két eljárás HTP% értékének különbsége közel 4-szeresére nőtt, ugyanis a lúgos eljárás HTP értékét 66%-kal növelte (3. táblázat).

A hőhasznosítással járó hulladék égetés nélkül vizsgálva a hatáskategóriákat (12. és 13. ábra), megállapítható, hogy a Selecton B2 figyelembevétele nélkül, mindegyik vizsgált hatáskategóriákban a savas eljárás a szennyezőbb (12. ábra).

A Selecton B2 figyelembevétele (13. ábra) kismértékben csökkentette a két eljárás EP-re, GWP-re és AP-re gyakorolt hatásának különbségét, de a savas eljárás maradt a szennyezőbb, míg a HTP-re gyakorolt hatása olyan jelentős, hogy a lúgos eljárás vált szennyezőbbé.



12. ábra: Hulladék égetés nélkül, Selecton B2 nélkül



13. ábra: Hulladék égetés nélkül, Selecton B2-vel

4. Összefoglaló konklúziók

Ahogy az várható volt, a professzionális szoftver adatbázisával kiegészített elemzés pontosabb képet adott a vizsgált technológiák környezeti hatásáról az oktatói szoftverhez képest.

Megállapítható, hogy a lúgos eljárásnak több kedvező környezeti hatása van a savas eljárással szemben.

- A gyógyszerhatóanyag gyártás során jóval kisebb az ivóvíz, etanol és az elektromos áram felhasználás, kisebb a szennyezőanyag (szennyvíz, hulladék), valamint a levegőbe történő gáz, gőz kibocsátás.
- Kevésbé hat az eutrofizációra és a globális felmelegedésre a rendszerhatártól függetlenül.
- A savasodásra is kedvezőbben hat, ha nem történik hőhasznosítás a hulladék égetés során.

Viszont a lúgos eljárás nagyobb mértékben hat a humán toxicitásra elsősorban a Selecton B2 komplexképző használata miatt, de szerepet játszik ebben az etanol és az elektromos áram használata is.

A környezeti hatás javítása érdekében a következők javasolhatók:

- A Selecton B2 helyett egy környezetbarát, biológiailag könnyen lebomló komplexképző vegyület alkalmazása lenne indokolt, amelynek a gyártása is kevesebb környezetszennyezéssel jár.
- Az etanol használata növeli a humán toxicitást és a savasodást, ezért célszerű lenne csökkenteni a 100%-os etanol mennyiségét és növelni a regenerált arányát, amennyiben a minőségbiztosítási rendszer ezt megengedi.
- Az elektromos áram használata növeli a humán toxicitást és a savasodást, ezért kisebb fogyasztású gépek (pl. légtechnikai, biztonsági berendezések) használata lenne szükséges.

Irodalom:

Agar, A.G., Arcese G. and Lucchetti M.C. (2014). Waste Management and Environmental Impact: A Case Study of Pharmaceutical Industry. In: Salomone R., Saija G. (eds.), *Pathways to Environmental Sustainability, Chapter 10*, pp.97-106. DOI 10.1007/978-3-319-03826-1_10, Springer International Publishing Switzerland

Arcese G., Lucchetti M.C., Martucci O. (2011): The importance of Life Cycle Assessment for environmental sustainability: an empirical study of a pharmaceutical product. In: Koroneos C., Rovas D.C., Dompro A.T. (eds) *Proceeding of Elcas 2011-2nd International Exergy, Life Cycle Assessment and Sustainability Workshop and Symposium*. Ziti Publications, Thessaloniki, Greece

Finnveden G, Johansson J, Lind P, Moberg Å (2005) Life cycle assessment of energy from solid waste-part 1 general methodology and results. *J Clean Prod* 13(3):213–229

Gluhar S, Kaurin A, Lestan D (2020) Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: Technological feasibility, remediation efficiency and environmental sustainability. *Chemosphere* Volume 257, October 2020, 127226

Hartley N.R., Tsang D.C, Olds W.E, Weber P.A. (2014): Soil washing enhanced by humic substances and biodegradable chelating agents, *J. Soil Sediment Contamination*, 23 599–613.

Huang JW, Chen J, Berti WB, Cunningham SD (1997) Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environ Sci Technol* 31: 800–805

Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium (KvVM) (2005): Útmutató az elérhető legjobb technika meghatározásához a gyógyszer-alapanyagok gyártása terén, Útmutató, Budapest, 126 p

Naghypour D., Hamed Gharibi, Kamran Taghavi, Jalil Jaafari (2016): Influence of EDTA and NTA on heavy metal extraction from sandy-loam contaminated soils. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4 (2016) 3512–3518

Oviedo C, Rodriguez J, (2003): EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny. EDTA: the chelating agent under environmental scrutiny. *Quim. Nova*, Vol. 26, No. 6, 901-905

Paolieri M: (2017): Ferdinand Münz: EDTA and 40 years of inventions. *Bulletin for the History of Chemistry*, Vol.42, Number 2

Shahid M, Austruy A, Echevarria G, Arshad M, Sanaullah M, Aslam M. (2014): EDTA-Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals: A Review. *Journal Soil and Sediment Contamination: An International Journal* Volume 23, 2014 - Issue 4

Vassil A.D, Kapulnik Y, Raskin I., and Salt D.E. (1998). The Role of EDTA in Lead Transport and Accumulation by Indian Mustard. *Plant Physiol.* 117(2): 447–453.

Wei Zhao and Ester van der Voet and Gjalte Huppel and Yufeng Zhang. 2009. Comparative life cycle assessments of incineration and non-incineration treatments for medical waste. *Int J Life Cycle Assess* 14:114–121

Szerzőink:

Mérőné Nótás Erika



Mérőné Nótás Erika (PhD) ny. egyetemi docens. Kémia-áruismeret szakos okleveles középiskolai tanárként végzett. Hat évig dolgozott a KERMI-ben, kozmetikai termékek minőségellenőrzésével foglalkozott. 1988-2020 között a gödöllői Szent István Egyetem munkatársa. PhD fokozatát 2006-ban környezettudományból szerezte. 2008-tól az LCA Center Egyesület tagja. 2009-től egyetemi docens a Környezettudományi Intézet Kémia Tanszékén. A kémia és áruismeret tantárgyak mellett az Életciklus elemzés tantárgy oktatója. Több életciklus elemzéssel foglalkozó szakdolgozat és diplomamunka témavezetője.

Horváth Kitti Rózsa



Horváth Kitti Rózsa okleveles környezetmérnökként végzett a gödöllői Szent István Egyetemen. Hallgatói évei alatt két gyógyszergyárban dolgozott gyakornokként, itt ismerkedett meg a gyógyszeriparral. Életciklus elemzéssel az egyetemi évei alatt foglalkozott és szakdolgozati témájának választotta egy hatóanyag kétféle gyártásának életciklus elemzését. Az Egyetem befejezését követően az egészségügyben helyezkedett el, biztonságtechnikai irányban. Jelenleg az Óbudai Egyetem tűzvédelmi szakmérnök szakos hallgatója.