

# ENERGIA- ÉS ÉLETCIKLUS-ÉRTÉKELÉSI MODELLEK INTEGRÁLÁSA GYÁRTÁSI FOLYAMATOK KÖRNYEZETI TERHELÉSEINEK OPTIMALIZÁLÁSÁRA

## INTEGRATION OF ENERGY AND LIFE CYCLE ASSESSMENT MODELS TO OPTIMIZE THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PRODUCTION PROCESSES

Dr. Mannheim Viktória\*

### ABSTRACT

*To take the major differences to identify good waste management processes, complex comparisons need to be discussed. This article discusses the advances and future directions of the given specific research area from the viewpoint of the author with a review of professional literature. This research work assesses and compares the environmental impacts of two end-of-life scenarios (landfilling and conventional incineration) in the European Union. To find the research answers, eight main environmental impact categories and primary energies were analysed using the GaBi 10.6 software. Based on the results, it can be concluded that in the case of incineration, the emissions and the electricity power credit are higher. These research results can be used to compare waste treatment processes with lower environmental impacts, and to perform further research on these processes.*

### 1. BEVEZETÉS

Gyártási folyamatoknál a hulladékcsökkentés elve - az integrált hulladékgazdálkodással összhangban - a gyors ipari fejlődés következtében folyamatosan növekvő mennyiségű termelési hulladék minimalizálása kapcsán jelenik meg. Számos kutatási tanulmány (Stahel, 2016; Grosso és mtársai, 2017; Andersen és mtársai, 2022; Avató és mtársa, 2022) feltételezte és bizonyította azt az utóbbi években, hogy a körforgásos gazdaság támogatja a gyártási folyamatok hulladékainak csökkentését azáltal, hogy kihasználja az életciklus-értékelés (Life Cycle Assessment, LCA) által kínált lehetőségeket. Egy termék teljes életciklusa alapvetően három életciklus szakaszra (termelés, használat és életciklus-vége)

tagolható, melyek vizsgálata során számos környezeti mutatót érdemes felismernünk és meghatározunk. Környezetmenedzsment eszközként, az életciklus-értékelésnek olyan technológiai megvalósításokra kell rámutatnia, melyek alacsonyabb környezeti terheléssel járó gazdasági és energetikai előnyökkel járnak. Következésképpen, a gyártási folyamatokat jellemző döntéshozatali modelleknél célszerű kombinálnunk az életciklus-értékelés eredményeit a gazdasági és energetikai mutatókkal. Egy optimális döntéshozatali modell fő szempontjává egy olyan holisztikus megközelítés válhat, ami magában foglalja a gyártott termék életciklusát anélkül, hogy megváltoztatnánk azokat a gyakorlatokat, amelyek közvetlen hatással vannak a környezetre. Napjainkban a különböző számvetési módszerek (Kharrazi és mtársai, 2014; Arbault és mtársai, 2014) és információalapú megközelítések (Santos és mtársai, 2020) életciklus elemzéssel történő integrálása került előtérbe. Gondoljunk csak az exergia-elemzésre és a BIM-alapú (Building Information Modelling) integrációkra. Civancik-Uslu és munkatársai (Civancik-Uslu és mtársai, 2019) már több komplex életciklus modellt állítottak fel termelési hulladékfrakciók kezelésére. Taşkın és Demir (Taşkın és Demir, 2020) kutatási eredményei alacsony emisszióval bíró energiamodelleket biztosítottak a hulladékgazdálkodási rendszerek számára. A gyártási technológiák és a gyártott termékek innovatív fejlesztése által, egyrészt, csökken a felhasznált anyag- és energiaigény, másrészt pedig a keletkezett hulladékkárok kezelési módjait egy kisebb környezetterhelés jellemzi. Ebből kifolyólag, a sokszor költségnövekedéssel, de ugyanakkor a környezetterhelés és energiaigény redukálásával járó technológiai innováció érdeke kell, hogy legyen minden gazdasági szereplőnek. Az elmúlt években a környezetmenedzsment és a hulladékgazdálkodás egyre növekvő jelentősége felkeltette az életciklus-értékelés iránti érdeklődést. A kutatók világszerte bővítik az LCA

\* tudományos főmunkatárs, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

módszertanát a környezeti információk és a fenntarthatósági mutatók iránti megnövekedett igény következtében.

## **2. GYÁRTÁSI FOLYAMATOK OPTIMALIZÁLÁSA LOOPING-MÓDSZERREL**

Az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) átfogó értékelő jelentéseket készít az éghajlatváltozással kapcsolatos tudományos, műszaki, társadalmi és gazdasági ismeretek állapotáról, annak hatásairól és jövőbeli kockázatairól. Az IPCC jelenleg a hatodik értékelő jelentésen (AR6) dolgozik, ami három IPCC-munkacsoport hozzájárulásából és egy összefoglaló jelentésből (SYR) áll. Az IPPC egyik alapvető követelménye az „elérhető legjobb technika” (Best Available Techniques, BAT) bevezetése, ami azokat a hatékony és innovatív eljárásokat foglalja magába, amelyek biztosítják a környezetterhelés minimalizálását. A terhelés- és hulladékcsökkentésre irányuló folyamattervezés innovatív és fenntartható technológiák kialakítása, vagy a már rendelkezésre álló technológiák fejlesztése által valósítható meg. A fenntartható és optimális gyártási folyamatok megtervezéséhez elengedhetetlen a pontos anyag- és energiamérlegek ismerete. Ugyan hulladékmentes technológiák megvalósítása teljesen lehetetlen, azonban optimalizálhatjuk azt, hogy milyen mértékű input anyag- és energiaáramok felhasználása mellett gyártunk terméket, illetve milyen mértékben hasznosítjuk a melléktermékekből és gyártási selejtből keletkezett termelési hulladékáramot. Fentiekkel összefüggésben, több lehetőség is kínálkozik: nyersanyagok és segédanyagok helyettesítése és kiváltása, hulladék visszaforgatása, fosszilis energiaáram kiváltása megújuló energiaforrásokkal, illetve megváltoztatott reakcióutak, eljárások és berendezések.

Az életciklus-értékelés módszere elsősorban az egymást helyettesítő anyagok, termékek és eljárások esetén ígéretes és célravezető. A különböző életciklus-értékelési modellek segítségével mérlegelhetők a feladásra kerülő anyagáramok, a felhasználásra kerülő energiaforrások, valamint a gyártott termékek mennyiség és felhasználási kör szerint (Mannheim, 2021). Azonban az életciklus elemzéseket és a döntéstámogató értékeléseket egy hárompontos szempontrendszer (környezetterhelési, energiahatékonysági és gazdaságossági aspektusok) függvényében célszerű elvégezni. Ez a hárompontos döntéstámogató-értékelési módszer egy új döntéshozatali irányt képezhet az ipari környezetvédelemben. A környezeti hatáserkékelésnél a gyártási folyamatok input-output áramait hatáskategóriákba soroljuk a leltáreredményeinek hozzárendelésével. Minden egyes környezeti hatáskategóriára vonatkoztatva meghatározunk egy referencia egységet, majd normalizáljuk és súlyozzuk őket egy kiválasztott hatásvizsgálati módszerrel.

Az ún. hurkolás módszerét (looping method) ma már egyre gyakrabban alkalmazzuk LCA tervek (LCA planek) felépítése kapcsán az életcikluselemző szoftverekben. E módszer alkalmazása során a szilárd és folyékony hulladékáramokat olyan mértékben forgatjuk vissza és hasznosítjuk újra az adott gyártási folyamaton belül, amely mérték még nem veszélyezteti a gyártott termékkel szemben támasztott követelményeket és az elvárt minőséget. A looping-módszer egyértelműen a gyártási folyamatok optimalizálását szolgálja.

A körkörös gazdaság (Circular Economy, CE) céljaival összefüggésben, alapvetően az erőforrások fenntartható felhasználása, a hulladékképződés minimalizálása, illetve a hulladék gyártási folyamaton belül történő visszaforgatása és újrahasznosítása kell legyen az elsődleges célunk, mely alapcélokkal a gyártási folyamatok környezeti terheléseit egyértelműen optimalizálhatjuk.

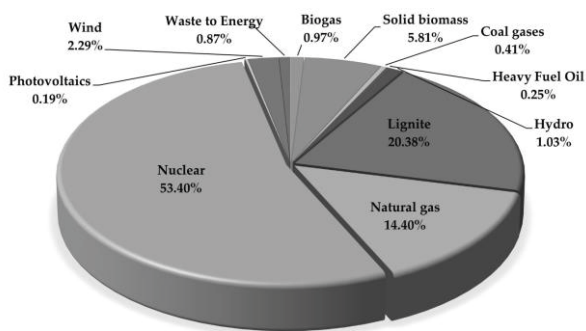
## **3. GYÁRTÁSI FOLYAMATOK OPTIMALIZÁLÁSA MEGFELELŐ HULLADÉKKEZELÉSI MÓDSZER ÁLTAL**

Az életciklus végi hulladékkezelés kihívást jelent valamennyi gazdasági szereplő számára a különböző számítási megközelítések elérhetősége és a tudományos konszenzus hiánya miatt, amelyet az akadémiai kutatások és az ipari érdekek egyaránt táplálnak. Az optimális hulladékkezelési gyakorlatok megválasztása érdekében, komplex összehasonlításokat kell végeznünk és megvitatnunk. Az életciklus-értékelés a termelési hulladék kezelési eljárásainak helyes megválasztása kapcsán is egy hatékonyan alkalmazható módszer a környezetterhelés vizsgálatára, melynek eredményei felhasználhatók a kezelési technológiák mérlegelésére, segítve ezáltal a hulladékkezelő vállalkozások döntéshozatalát. A hazai hulladékgazdálkodásban 2013 óta kap kiemelkedő szerepet az életciklus-értékelés azáltal, hogy az új hulladékgazdálkodási törvényben (Ht.) már helyet foglal az életciklus-szemléletben történő gondolkodásmód. Az integrált hulladékgazdálkodás alapvetően az életciklus végi kezelési eljárások megfelelő kiválasztására helyezi a hangsúlyt azáltal, hogy a hulladékképződés megelőzésére és a veszélyesség csökkentésére törekszik. Az életciklus végi modellezés egyik fő kihívása a megfelelő újrahasznosítás hiteles meghatározása nyílt és zárt hurkú rendszerekben. Napjainkban egyre több kutatási eredmény áll rendelkezésünkre az egyes hulladékkezelési eljárások kiértékelésére vonatkozóan, mérlegelve ezáltal az egyes módszerek környezeti hatásait. A termelési hulladék leggyakoribb kezelési módszerei a lerakás és a hagyományos égetés. Genovesi és munkatársai (Genovesi és m. társai, 2022) szerint azonban a hulladéklerakás az emberi metán kibocsátás harmadik legnagyobb forrása. Ami a termikus kezelési eljárásokat illeti, a hulladékáramok energetikai célú

hasznosítási technológiáival javulást érhetünk el. Alternatív termikus kezelési technikaként számos kutatási tanulmány javasol gázosítást vagy plazmatechnológiát. Voss és munkatársai (Voss és m társai, 2021) olyan integrált életciklus-modelleket vezettek be, melyek összehasonlítják a pirolízist és a gázosítást; megállapítva azt, hogy a gázosítás nagyobb emissziócsökkenéssel jár. Korábbi kutatási eredményeim (Mannheim, 2014) is azt mutatják, hogy a gázosítás és a plazmatechnológia jobb környezeti teljesítményt nyújtanak az összes vizsgált hatáskategória tekintetében, mint a hagyományos égetés. A hagyományos termikus technológiákhoz képest, plazmagázosítással a villamos energia hatékonyabban előállítható, illetve nem keletkezik dioxin és furán.

#### 4. HULLADÉK ÉLETCIKLUS VÉGI FORGATÓKÖNYVEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

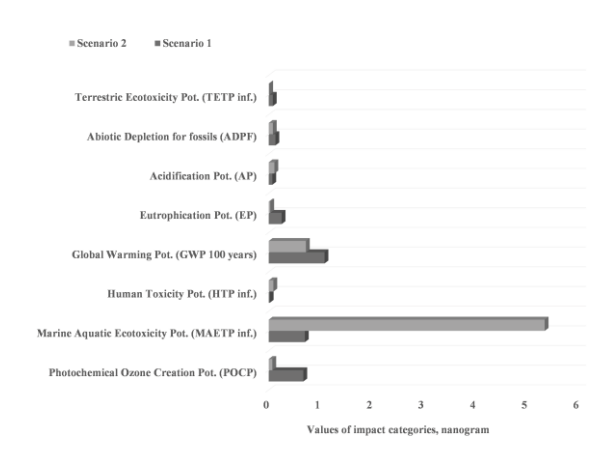
Amennyiben az életciklus-értékelés rendszerhatárait helyesen meghatározzuk, akkor egy megfelelő LCA szoftver segítségével pontos életciklus-leltárelemzést (Life Cycle Inventory, LCI) és életciklus-hatásértékelést (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) tudunk felállítani az életciklus végi szakaszra. Ebben a tanulmányban a lerakás és a hagyományos égetés környezeti terheléseit és energia értékeit hasonlítottam össze, melynek keretében a funkcionális egységet 1 kg hulladékban határoztam meg. A modellezéshez termékspecifikus információkat használtam és felállítottam egy magyarországi energiamix kördiagramot a GaBi szoftver adatai alapján a 2018. évre vonatkozóan (ld. 1. ábra).



1. ábra. Hazai energiamix (Mannheim, V., Kruszelnicka, W.: Energy-Model and Life Cycle-Model for Grinding Processes of Limestone Products. Energies 15, 2022, no. 10: 3816.).

A konzisztens életciklus-leltárelemzés magában foglalta és számszerűsítette a vizsgált folyamatok input-output anyagáramlását és energiaellátását. Az életciklus-modelleket csurgalékvízzel iszapkezeléssel és hulladéklerakó-gázfelhasználással egészítettem ki.

Feltételeztem azt, hogy a keletkezett energia hasznosításra kerül és a hulladéklerakás újrahasznosított iszapot és szennyvizet is termel. Az életciklus-értékelés a kaputól a bölcsőig tartott azáltal, hogy a termék használati szakaszát követően a termék életciklus-vége szakaszát vizsgáltam két különböző forgatókönyv megválasztásának függvényében. A vizsgált rendszerben az energiaellátást és a hulladékkezelést a rendszerhatárok határozták meg. A berendezések, gépek és teherautók a vizsgált rendszerhatáron kívül estek. A fűtés, hűtés és világítás energiamennyisége szintén. Az életciklus-vége megoldások környezeti hatáskategóriáit CML 2016 módszer segítségével számoltam GaBi 10.6 szoftverrel. Nyolc fő környezeti hatáskategóriát - fotokémiai ózonképződés (POCP), tengeri és szárazföldi ökotoxicitás (MAETP, TETP), emberi toxicitás (HTP), globális felmelegedés (GWP), eutrofizáció (EP), savasodás (AP) és fosszilis abiotikus kimerülés (ADPF) - emissziókat és primer energia értékeket vizsgáltam, melynek értékeit a 2. ábra szemléltet nanogrammban. Az alkalmazott normalizálási és súlyozási módszerek (CML 2016, Európai Unió) mindkét hulladékkezelési modellre azonosak voltak. 1 kg hulladék funkcionális egységre vonatkoztatva a hulladéklerakásnál 0.48 MJ hulladék hő, 0.02 MJ primer energia és 0.3 MJ villamos energia (a lerakó gázhasználatából) keletkezik. A hagyományos égetés 1.23 MJ villamos energiát termel, ami visszanyerhető.



2. ábra. Hulladéklerakás (Scenario 1) és hulladékégetés (Scenario 2) vizsgált környezeti hatásainak normalizált és súlyozott értékei. (Mannheim, V.: Perspective: Comparison of end-of-life scenarios of municipal solid waste from viewpoint of life cycle assessment. Front. Built Environ. 2022, 8:991589).

Elsődleges kutatási eredményeim szerint, a fotokémiai ózonképződés, a fosszilis abiotikus kimerülés, az eutrofizáció, a globális felmelegedés és szárazföldi ökotoxicitás értékei magasabbak a lerakásnál, azonban hagyományos égetés teljes környezetterhelése kétszerese a lerakásnak. A tengeri ökotoxicitás az

égetésnél kiemelkedő. Az általam eddig áttekintett LCA-tanulmányok hasonlóképpen arra a következtetésre jutottak, hogy a hulladéklerakókban történő hulladékelhelyezés kisebb hatást gyakorolt a környezetre. Égetésnél azonban a villamosenergia-jóváírás értéke ötször magasabb. Azaz, itt olyan hulladékkezelési módról beszélhetünk, ami energia-visszanyeréshez és energetikai hasznosításhoz kapcsolódik.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Európa az európai zöld megállapodással, a fenntartható fejlődési célokkal és a körforgásos gazdaságra vonatkozó stratégiával összefüggésben 2050-re igyekszik elérni a klímasemlegességet (Kaczmarczyk és Urych, 2022). Következésképpen, fontos tényező a termelési hulladék csökkentése és az életciklus végi lehetőségek mérlegelése. Kutatási eredményeim felhasználhatók hulladékkezelési folyamatok összehasonlítására, valamint életciklus-vége eljárások környezeti terheléseinek további kutatására. A döntéshozatal támogató következtetések eredményeinek javítása érdekében előnyt jelenthet a technológiai jellemzők bizonytalansági elemzése és a hosszú távú hatások mérése. A bizonytalanság felméréséhez két megközelítés alkalmazható életciklus-értékelés segítségével: érzékenységi elemzés hot spotokon keresztül vagy Monte Carlo szimuláció. A hosszú távú hatások mérésével az erőforrások és a kibocsátások értékei választ adhatnak arra, hogy melyek a hulladékgazdálkodás gyenge pontjai és lehetőségei.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetemen, a Technológiai és Ipari Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján végrehajtott projekt részeként valósult meg.

## 7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] STAHEL, W.R.: Circular economy. *Nature*. 531, (2016) pp. 435–438.
- [2] GROSSO, M.; NIERO, M.; RIGAMONTI, L.: Circular economy, permanent materials and limitations to recycling: Where do we stand and what is the way forward? *Waste Manag. Res.* 35(8), (2017) pp. 793-794.
- [3] ANDERSEN, S.C., BIRGISDOTTIR, H. AND BIRKVED, M.: Life Cycle Assessments of Circular Economy in the Built Environment - A Scoping Review. *Sustainability*. 14, (2022) 6887.
- [4] AVATÓ, J.L., MANNHEIM, V.: Life Cycle Assessment Model of a Catering Product: Comparing

Environmental Impacts for Different End-of-Life Scenarios. *Energies*. 15 (2022) 5423.

[5] KHARRAZI, A., KRAINES, S.B., HOANG, L. AND YARIME, M.: Advancing quantification methods of sustainability: A critical examination emergy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches. *Ecological Indicators*. 37 (PART A), (2014) pp. 81–89.

[6] ARBAULT, D., RUGANI, B., BARNA, L. AND BENETTO, E.: A semantic study of the emergy sustainability index in the hybrid lifecycle-emergy framework. *Ecological Indicators*. 43, (2014) pp. 252–261.

[7] SANTOS, R., AGUIAR COSTA, A., SILVESTRE, J.D. AND PYL, L.: Development of a BIM-based Environmental and Economic Life Cycle Assessment tool. *Journal of Cleaner Production* 265 (2020), 121705.

[8] CIVANCIK-USLU, D., PUIG, R., FERRER, L. AND FULLANA-I-PALMER, P.: Influence of end-of-life allocation, credits and other methodological issues in LCA of compounds: An in-company circular economy case study on packaging. *J. Clean. Prod.* 212, (2019) pp. 925–940.

[9] TAŞKIN, A. AND DEMIR, N.: Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*. 61 (2020), 102339.

[10] MANNHEIM, V.: Life Cycle Assessment Model of Plastic Products: Comparing Environmental Impacts for Different Scenarios in the Production Stage. *Polymers* 13(5) (2021), 777.

[11] GENOVESI, A., AVERSA, C., BARLETTA, M., CAPPIELLO, G. AND GISARIO A.: Comparative life cycle analysis of disposable and reusable tableware: The role of bioplastics', *Cleaner Engineering and Technology*. 6 (2022), 100419.

[12] VOSS, R., LEE, R.P., SEIDL, L., KELLER, F. AND FRÖHLING, M.: Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany. *Waste Management*. 134 (2021) pp. 206-219.

[13] MANNHEIM, V.: Examination of thermic treatment and biogas processes by LCA. *Ann. Fac. Eng. Hunedoara Int. J. Eng.* 12 (2014) pp. 225–234.

[14] MANNHEIM, V.: Perspective: Comparison of end-of-life scenarios of municipal solid waste from viewpoint of life cycle assessment. *Front. Built Environ.* 8 (2022), 991589.

[15] MANNHEIM, V., KRUSZELNICKA, W.: Energy-Model and Life Cycle-Model for Grinding Processes of Limestone Products. *Energies* 15, no. 10 (2022) 3816.

[16] KACZMARCZYK, B., URYCH, I.: Perception of the transition to a zero-emission economy in the opinion of polish students. *Energies* 15 (2022) 1102.