

Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
Műszaki Menedzsment és Vállalkozási Tanszék



Fröccsöntési folyamat fenntarthatósági vizsgálata a környezetmenedzsment szemszögéből

Szerző: Szabó Kinga, MSc hallgató

Témavezető: **Dr. Mannheim Viktória**, egyetemi docens
Tanszékvezető: **Dr. T. Kiss Judit**, tanszékvezető egyetemi docens

Debrecen
2024.

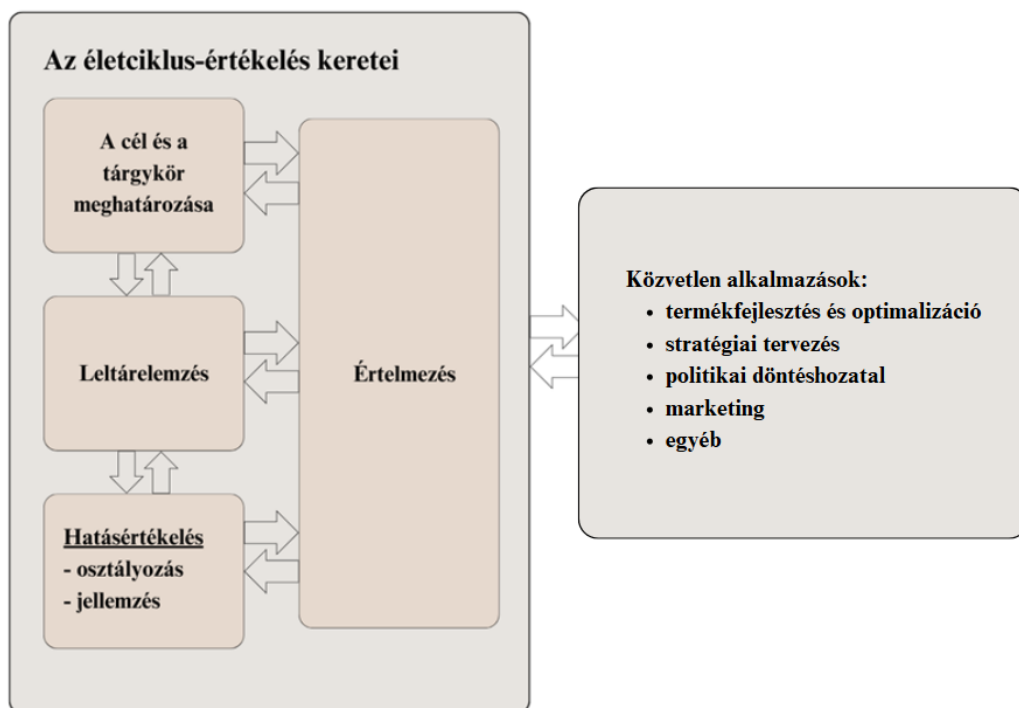
Tartalom

1. Bevezetés	- 3 -
1.1. Fenntarthatósági fejlődési célok és ESRS	- 4 -
1.2. Körforgásos gazdaság és 9R stratégia integrálása	- 8 -
2. Kutatási célkitűzések.....	- 11 -
2.1. Anyagok és kutatási módszertan	- 11 -
2.2. Funkcionális egység és rendszerhatár	- 13 -
2.3. Alkalmazott LCA szoftver	- 13 -
2.4. Leltárelemzés (Life Cycle Inventory)	- 14 -
2.5. Életciklus hatásértékelés (Life Cycle Impact Assessment).....	- 14 -
3. Eredmények	- 16 -
3.1. Eredmények az 1. számú forgatókönyvre vonatkozóan	- 16 -
3.2. Eredmények az 2. számú forgatókönyvre vonatkozóan	- 18 -
3.3. Eredmények az 3. számú forgatókönyvre vonatkozóan	- 19 -
3.4. Összesített eredmények a három forgatókönyvre	- 21 -
4. Konklúziók.....	- 22 -
5. Összefoglalás	- 23 -
6. Köszönetnyilvánítás	- 24 -
7. Irodalomjegyzék.....	- 25 -

1. Bevezetés

A polimertechnológiák fokozott figyelmet kaptak az utóbbi időben, de különösképpen a fröccsöntési eljárások alkalmazása terjedt el széles körben a különböző műanyag termékek előállítására. Magyarországon a műanyagfeldolgozás több mint 30%-át képviseli ez a szegmens. A fröccsöntési folyamatok szignifikanciája miatt a kutatások egyre inkább foglalkoznak a műanyag termékek életciklus-értékelésével [1,2].

Az életciklus-értékelés (Life Cycle Assessment, LCA) egy olyan módszer, amely egy folyamat, egy termék vagy egy szolgáltatás teljes életútját követve vizsgálja meg a környezetre gyakorolt potenciális hatásokat. Ez a megközelítés a „bölcsőtől a sírig” elméleten alapul. A vizsgálat a termékhez szükséges nyersanyag bányászatától, előkészítésétől, a gyártáson át a használatig, valamint a használat után keletkező hulladékkezelésig tart. Egy folyamat vagy egy szolgáltatás esetén, a figyelem elsősorban az anyag- és energiafelhasználásokra irányul, a környezeti hatások elemzése mellett [3]. Az életciklus-értékelés módszertanát az ISO 14040 és 14044 szabványok ajánlásainak megfelelően alkalmazzuk. Az ISO 14040 szabvány az életciklus különböző fázisainak ismertetésével határozza meg az LCA tervezési és végrehajtási lépéseit [4,5]. Az 1. ábra az LCA fő szakaszait mutatja be az ISO 14040 szabvány alapján.



1. ábra: Az LCA keretei (forrás: ISO 14040, saját szerkesztés)

A cél és a tárgykör meghatározásánál kijelöljük a funkcionális egységet és a rendszer határokat. Az életciklus leltárelemzés (Life Cycle Inventory, LCI) egy termékrendszerre vonatkozó ki-, és bemeneti adatokat számszerűsíti és tartalmazza az adatgyűjtési és számítási folyamatokat. Az adatgyűjtés aprólékos, precíz feladat, hiszen az értelmezés levezetése is ezen alapul. Ezek az adatok vonatkozhatnak a rendszer erőforrás felhasználásaira, a talaj-, víz-, és levegőemissziókra. Alapjául fognak szolgálni a tanulmány életciklus hatásértékeléséhez (Life Cycle Impact Assessment, LCIA), ami az LCA azon fázisa, mely arra törekedve értékeli a környezeti hatásokat, hogy azok jelentősége minősíthető legyen [6]. A hatásértékelés és a teljes LCA elemzés során elengedhetetlen az ún. holisztikus szemléletmód. Azaz, figyelembe kell vennünk a rendszer egészét oly módon, hogy olyan szempontokat is vizsgálunk, mint a gazdaságosság, a szociális kérdések, az energiahatékonyság, az ökológia, valamint emberi egészséget befolyásoló hatások.

Az ISO 14040 szabványban leírt LCA lépéseinek végrehajtásához az ISO 14044 nyújt részletes útmutatást és meghatározza a követelményeket. Előbbi az alapelveket és az általános stratégiát tisztázza, utóbbi pedig egy olyan iránymutatás, ami elsősorban a következő gyakorlati kérdések megvalósításra koncentrál: hogyan kell végrehajtani az adatgyűjtést, felhívja a figyelmet az adatrelevancia fontosságára és a reprezentálható funkcionális egység meghatározására, valamint kitér a hatásértékelésre és az értelmezésre [7].

1.1. Fenntarthatósági fejlődési célok és ESRS

A világ népességének folyamatos növekedése, jóléte és az antropogén eredetű éghajlatváltozás felnagyítja a természet és az emberi élet minőségének romlását. A jelenlegi lineáris termelési és fogyasztási mód, amely az erőforrások kitermeléséből, előállításából, felhasználásából, valamint általában a hulladéklerakásból áll, nem fenntartható, hiszen az erőforrások korlátozottak, a kereslet pedig szüntelenül nő. Ezzel a lineáris rendszerrel szemben, egy körforgásos gazdaság célja maximalizálni a legyártott termék, az alapanyagok és a melléktermékek felhasználhatóságát, élettartamát, illetve értékállóságát [8].

Az életciklus-gondolkodás ma már a körforgásos gazdaság kulcsfogalmává vált. Alkalmazása segítheti a vállalatokat a döntéshozatalban a környezeti hatások csökkentése érdekében. Az életciklus-értékelés olyan tudományos eszközzé és módszertanná vált, amely képes a körforgásos gazdaság koncepciójához tartozó bármely terméket, folyamatot, üzleti modellt értékelni környezeti szempontból, oly módon, hogy továbbfejlesztett ötleteket nyújt a javasolt zártkörű megoldásokhoz, vagy éppen kiküszöböli és megszünteti azokat a nemkívánatos

környezeti hatások miatt. Ennélfogva iránymutatást adhat a vállalatok számára céljaik elérésében [8,9]. A körforgásos gazdaság vállalati szintű alkalmazása becslések szerint mintegy 8%-os költségmegtakarítást eredményezhet, miközben az üvegházhatású gázok kibocsátása 2-4%-kal is csökkenhet [9].

A fenntartható fejlődés egyik leggyakrabban hivatkozott definícióját az ENSZ Környezet és Fejlődés Világbizottsága az ún. Brundtland-jelentésben így határozza meg: „olyan fejlődés, amely kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő nemzedékek esélyét arra, hogy ők is kielégíthessék szükségleteiket” [10].

A fenntarthatóság vizsgálatakor a három alappillért – ökológia, gazdaságosság és szociális területek – mind figyelembe kell vennünk. Amennyiben bármelyik terület egyikén el tudunk érni javulást anélkül, hogy a másik kettőben romlás következne be, úgy az fejlődésnek tekinthető [11].

Az ezredfordulón Egyesült Nemzetek Szervezete által elfogadásra került Milleniumi Fejlesztési Célok (Millennium Development Goals, MDGs) fontos esemény volt a nemzetközi együttműködésben. Ez a 2000 és 2015 közötti program nyolc kihirdetett célt foglalt magába, amelyek központjában a mélyszegénység arányának csökkentése, nemek közötti és társadalmi egyenlőség, valamint a környezeti fenntarthatóság javítása, ezek pedig összhangban voltak a fenntarthatóság három dimenziójával. A 2012-es fenntartható fejlődésről szóló Rióban tartott konferencián megállapodtak a fenntarthatóság 3 pillérének megtartásában, nagyobb figyelmet fordítva a környezetvédelmi szektorra [12]. Az ENSZ tagállamai 2015-ben elfogadták a fenntartható fejlődésre vonatkozó Agenda 2030 nevű keretrendszert, melynek célja az emberi élet és ökoszisztéma minőségének javítása. Középpontjában a Fenntartható Fejlődési Célok (Sustainable Development Goals, SDGs) állnak [13]. Összesen 17 célt, 169 alcélt és 230-nál is több indikátort tartalmaz, amelyek a fenntartható fejlődés számos különböző aspektusát tervezi felmérni és monitorozni 2015 és 2030 között. Minden egyes célnak van egy környezeti kontextusa [13,14]. A 17 fenntarthatósági fejlődési célt a 2. *ábra* szemlélteti.

Az Agenda 2030 megvalósításának alapkövei azok a vállalatok, amelyek az üzleti stratégiájukat úgy építik fel a gazdálkodásukban, pénzügyeikben, hogy ezekhez a prioritásokhoz igazítva legyenek képesek a növekedésre [15].



2. ábra: A 17 fenntartható fejlődési cél

(forrás: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>)

2019-ben jött létre az Európai Zöld Megállapodás (European Green Deal, EGD), ami olyan szakpolitikai kezdeményezések összessége, melynek koncepciója Európa klímasemlegessé tétele 2050-re. E hosszútávú terv köztes célja, hogy 55%-kal csökkentse az Európai Unió nettó üvegházhatású gázok kibocsátását 2030-ig 1990-hez képest [16].

Az Európai Bizottság egy 2023-as javaslatra építve terjesztette elő a 2040-es klímapolitikai céljait, melyek a 2050-ig elérendő vállaláshoz szükséges következő lépcsőfokot jelentik. Eszerint 2040-re az európai energiarendszert teljesen dekarbonizálni szükséges az üvegházhatású gázok (ÜHG) 90-95%-kal történő csökkentése mellett [17]. Az EGD által az EU célja az, hogy karbonsemlegessé váljon, ami azt jelenti, hogy az üvegházhatású gázok mennyisége nem haladhatja meg a természetes úton eltávolítható mennyiséget. Az EGD hangsúlyozza az energiahatékonyság javítását és a megújuló energiaforrások felhasználásának növelését, továbbá, a nyersanyagok igénybevételének csökkentését. Fenntarthatóbbá kívánja tenni a mezőgazdaságot és az élelmiszeripart. Fontos az, hogy a gazdasági növekedés fenntartható keretek között valósuljon meg, illetve az ipari folyamatok környezetbarátabbak legyenek. Ugyanakkor az EGD által az EU törekszik a természeti erőforrások védelmére és fenntartására, ideértve a biodiverzitást és az ökoszisztémát is [18].

A vállalati fenntarthatósági jelentéstételi irányelv (Corporate Sustainability Reporting Standards, CSRD) szigorú és részletes beszámolási kötelezettséget ír elő, ezért kerültek bevezetésre 2023-ban az Európai Unió által kidolgozott Európai Fenntarthatósági Jelentés

Standardok (European Sustainability Reporting Standards, ESRS). Az ESRS célja az, hogy egységes vázat szolgáltatson egy vállalat fenntarthatósági teljesítményének és környezetre gyakorolt hatásainak prezentálásához. Az Európai Unió területén működő vállalatoknak kötelezően alkalmazniuk kell az ESRS kereteit a standardizált fenntarthatósági jelentéstételük során [19]. Az ESRS felállításának előzménye, hogy a korábbi jelentéstételi gyakorlat alkalmazásával a vállalatok nem elégítették ki az EGD célkitűzéseihöz szükséges tájékoztatást, illetve a jelentések gyakran nem hordozták a szakértők által fontosnak tartott lényeges információkat. Ezeknek a követelményeknek való megfelelés a vállalatok részéről kihívást jelenthet, hiszen ez a korábbiaktól eltérő gondolkodásmódot és stratégiát igényel [20]. Az ESRS csomag összesen 12 szabványt tartalmaz (10 tematikus és 2 általános szabványt), melynek környezetvédelmi, társadalmi és vállalatirányítási vonatkozásai vannak. A 3. ábrán az ESRS szabványokat mutatom be.

Általános	Környezeti	Társadalmi	Irányítási
ESRS 1 Általános követelmények	ESRS E1 Klímaváltozás	ESRS S1 Saját munkaerő	ESRS G1 Üzleti magatartás
ESRS 2 Általános közzétételek	ESRS E2 Szennyezés	ESRS S2 Az értékláncban dolgozók	
	ESRS E3 Víz- és tengeri erőforrások	ESRS S3 Érintett közösségek	
	ESRS E4 Biodiverzitás és ökoszisztéma	ESRS S4 Fogyasztók és végfelhasználók	
	ESRS E5 Körforgásos gazdaság		

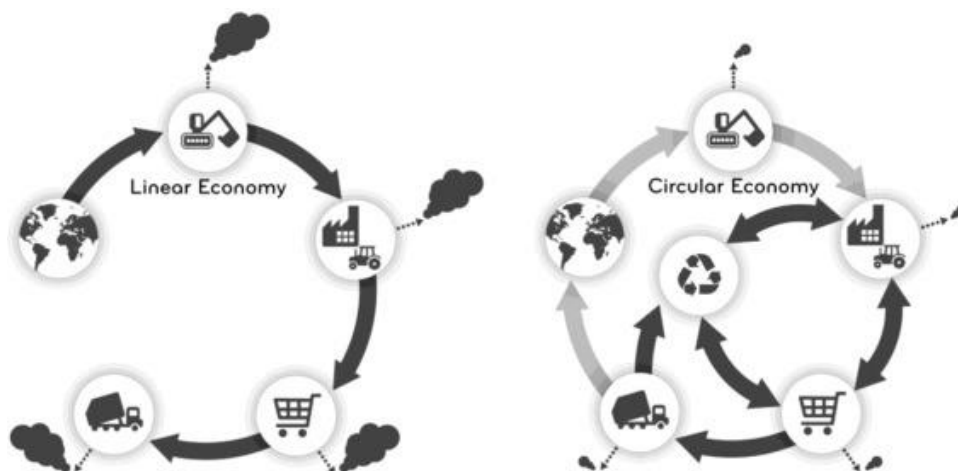
3. ábra: Az ESRS csomag tartalma (forrás: Financial Software Architects GmbH. How will the European Sustainability Reporting Standards (ESRS) affect your company? Envoria (2024, January 10).

Az életciklus-szemlélet szempontjából fontos E1-E5 szekció tartalmazza a környezeti szempontokat, melyen belül az E5 szabvány a körforgásos gazdasággal és az erőforrás-gazdálkodással releváns jelentéstartalmat foglalja össze [21]. Az E5 szabvány kulcsfontosságú szerepet tölt be a körforgásos gazdaság előmozdításában, segítséget nyújtva a hatékony felmérésben és a közlésben. Lehetővé teszi a vállalatok számára az erőforrás-gazdálkodás ismertetését, külön figyelmet fordítva a hulladékkezelésre, nyersanyag- és

energiafelhasználásra. Hozzájárul a körforgásos gazdaság elveinek integrálásához. Egy strukturált és átlátható keretet biztosít a vállalatoknak a körforgásos gazdaságra vonatkozó teljesítményüknek bemutatásában, a jelentés elkészítésében [22]. Az E5 nagy mértékben támogatja a vállalatok megfelelését a fentebb tárgyalt Európai Unió fenntarthatósági célkitűzéseire.

1.2. Körforgásos gazdaság és 9R stratégia integrálása

Ahogy azt már korábban felvetettem, a lineáris és körforgásos gazdaság (Circular Economy, CE) fogalmának szembeállítása nem elhanyagolható a fenntarthatóság és az életciklus-értékelés tekintetében, hiszen a gazdaság egy körben zajlik, ahol bolygónk biztosítja a természeti erőforrásokat és szerepet tölt be a hulladékok és szennyezések „elnyelésében”. Ez addig tart, amíg teherbíróképességét nem haladjuk meg. A körforgásos gazdaság figyelembe veszi az erőforrás-fogyasztást és a hulladékkezelés környezetre gyakorolt hatásait, ahogy az a 4. ábrán is látható. [23].



4. ábra: A lineáris és a körforgásos gazdaság kontrasztja [23]

Jelenleg soha nem látott igény keletkezett a hulladékokra épülő modellek gazdaságba történő integrálására, amire a körforgásos gazdaság számos elméleti koncepciót és gyakorlati megoldást ötvöz [24]. Áttörést hozott, amikor az Európai Bizottság 2015 decemberében elfogadott egy ezzel kapcsolatos olyan jogalkotási csomagot, amely a jövőben hatékonyan elősegíti az EU áttérését erre a modellre, ösztönözve a fenntartható gazdasági növekedést, új munkahelyek teremtését, illetve fokozni kívánja a nemzetközi versenyképességet [25]. Bár a körforgásos gazdaság meghatározására megannyi fogalom létezik, a legtöbbet megtalált változat szerint „a körforgásos gazdaság olyan gazdasági rendszer, amely olyan üzleti modellen alapul, amely az „életciklus vége” koncepciót felváltja az anyagok használatának

csökkentésével, alternatív felhasználásával, újrafeldolgozásával és hasznosításával a termelés, forgalmazás és fogyasztás folyamataiban” [26]. Egy nem fenntartható lineáris gazdaságból körforgásosra történő átállás egy radikális és átformáló megoldás. Az egész rendszert érintő változásokra van szükség, melyekre különböző stratégiák léteznek. Az átmenet kiindulópontja a körforgásos gazdaság három alapelve:

1. Természeti tőke megóvása és fejlesztése: A kimerülő készletek szabályozott használatának és a megújuló erőforrások termelésbe történő bevonásának egyensúlyára összpontosít.
2. Erőforrás-kihozatal optimalizálása: Célja növelni a gazdasági, technikai és biológiai hatékonyságot a termékek, alkatrészek és anyagok körforgásba hozása révén.
3. Negatív externáliák minimalizálása: Káros, toxikus anyagok eliminálása, csökkentése vagy helyettesítése, a gyakorlatban elsősorban a hulladék- és károsanyag-kibocsátás mérséklése megfelelő alapanyag és technológia megválasztása által [27-29].

A körforgásos gazdaság erre a fenti három célkitűzésre épül, melyeket az angol nyelvű szakirodalmakban gyakran „design-driven principle” vagy „driven by design” -ként említnek. A három tervező-vezérlő elv betartása az újratervezésről szól, hiszen a legtöbb dolog, amit használunk a lineáris gazdasághoz készült, ezt át kell alakítani. A körforgásos gazdaság megvalósítása tervezés kérdése, ahol a karbonlábnyom csökkentése vezérel bennünket [30]. A vállalati környezetmenedzsment szempontjából, fontos a minél pontosabb meghatározás egy vállalat számára annak érdekében, hogy ténylegesen mit kellene tenniük a legkedvezőbb környezeti hatás elérése érdekében. Ezeket a cselekvési útmutatásokat 9 stratégiai kulcstényező írja le, melyek különböző preferenciák és prioritások alapján kerültek rögzítésre. A 9R stratégia elnevezést onnan kapta, hogy a stratégiai elvek angol kezdőbetűi pedig mind „R” kezdőbetűvel íródnak [31]. Az első 3 tényező 1970-es évekig nyúlik vissza, amikor az európai és amerikai környezetvédelmi mozgalmak kíséretében egyre nagyobb érdeklődés irányult a 3R (reduce - csökkent, reuse – újrahasználg, recycling - újrahasznosít) koncepciója felé. Mára már a 3R a világ számos nemzeti hulladékszabályozásában általánossá vált [32]. Később kiegészült további három ponttal (rethink - újratervezés, remanufacture - újragyártás, recover - visszanyerés) 6R-re, egyes szerzők szerint pedig idekapcsolódik a zéró kibocsátás, az erőforrás-hatékonyság és az életciklus-értékelés is [33]. Később a 6R-t Potting, Hekkert, Worrel és Hanemaaijer kiterjesztette 9R-re (hozzáadva a hulladék elutasítást - refuse, a felújítást - refurbish és az újrafeldolgozást - repurpose) [34]. Számos „R” vagy körkörös stratégia ismert, úgy, mint 3R [35], 4R [36] és 9R [37]. Az összes R keretrendszer közül a legátfogóbb gyűjtési stratégia a 9R Framework, ami gyakorlatilag 10R, mivel kiegészült a „rethink” – újragondol

elemmel, így R0-tól indulunk. Az LCA vonatkozásában is ezt a keretrendszert alkalmazzuk [38]. A körkörös gazdasági modell életciklus-alapú megközelítése túlmutat a termékek pusztai anyagi újrahasznosításán. A cél az, hogy a termék hozzáadott értékét és minőségét a lehető leghosszabb ideig megőrizzük és csak ezt követően történik meg az anyag újrahasznosítása, majd az energiává alakítás (például hulladékégetés útján hőenergia-kinyerés), végül a hulladék lerakás. Ezzel a megközelítéssel jelentősen növelhető a gazdasági körforgásban eltöltött idő, ami komoly erőforrás-megtakarítást eredményezhet [39]. Az 5.ábra illusztrálja a körkörösség és az életciklus szemlélet prioritási hierarchiáját, valamint kifejti a stratégiai pontokat.



5. ábra: A körkörösség értéknövelő stratégiái (forrás: [40], saját szerkesztés)

2. Kutatási célkitűzések

A kutatásom fő célkitűzése egy fröccsöntési technológiai folyamat környezeti terhelésének elemzése és értékelése volt bölcsőtől-kapuig történő életciklus-értékelés által. Az általam szimulált és megvizsgált fröccsöntési folyamat során, polietilén granulátumból állítottam elő polietilén terméket sűrített levegő és hűtővíz felhasználása mellett.

Az általam tervezett technológiára három gyártási forgatókönyvet vizsgáltam meg:

1. nyitott rendszer (looping alkalmazása nélkül) – bázis forgatókönyv
2. félig zárt hurkú rendszer (a hűtővíz szürke vízként visszaforgatásra kerül)
3. zárt hurkú rendszer (a hűtővíz szürke vízként visszaforgatásra kerül és a gyártásközi hulladék a nyers granulátumhoz kerül visszaforgatásra)

Ezen túlmenően, egy olyan fröccsöntési technológiát szerettem volna javasolni, amely környezetbarát mérnöki megoldásokat kínál.

A dolgozat első része bemutatja a kutatási módszertant, beleértve a célt, a forgatókönyveket, a funkcionális egység és a rendszerhatárok rögzítését és az alkalmazott szoftvert. A következő szakasz ismerteti az életciklus-leltár (LCI) módszertanát és ismerteti az életciklus-hatásvizsgálat (LCIA) módszerét.

Továbbá, a dolgozat bemutatja és megvizsgál 11 környezeti hatáskategóriát, az anyag- és energiaforrásokat, valamint a kibocsátási adatokat. A főfejezetben ismertetem a kapott kutatási eredményeket, az utolsó fejezetek pedig a kutatómunka következtetéseit és az összefoglalást tartalmazzák. Az eredmények felhasználhatók a kisebb környezeti terheléssel járó gyártási folyamatok tervezéséhez és egy fröccsöntési folyamat környezeti teljesítményének javításához. Ez a kutatómunka azért fontos, mert az erőforrásokkal való takarékoság és a körforgásos gazdaság gyártáson belüli megvalósítása napjainkban jelentős szerepet tölt be az életciklus-értékelésben.

2.1. Anyagok és kutatási módszertan

Mivel az alapanyagok jelentős szerepet töltenek be a termékek környezetterhelésének meghatározásában, ezért a fenntarthatóság biztosítása érdekében, kiemelt figyelmet kell fordítani a megfelelő anyag kiválasztására egy adott funkcióhoz. Kutatásaim során

feltételeztem azt, hogy a fröccsöntési folyamat alapanyagaként használt polietilén granulátumot az Európai Unióban állítják elő és egy helyi fröccsöntő üzemében dolgozzák fel.

Az életciklus-értékelés módszertanát az ISO 14040 és 14044 szabványok ajánlásainak megfelelően alkalmaztam [4,5]. Ez a megközelítés lehetővé teszi a vizsgált polietilén termék valamennyi életciklus szakaszához kapcsolódó környezeti hatás elemzését, a fröccsöntéshez szükséges nyersanyagok kinyerésétől a felhasznált termék műanyag hulladékká történő válásáig. Ugyanakkor a 9R stratégiát illetően, az R0, R2 és R8 stratégiákra vonatkozóan, különböző elméleti lehetőségeket és módszereket dolgoztam ki az anyag- és energiafogyasztásra, valamint a kibocsátásokra és a keletkező hulladékáramok elosztására a gyártási szakaszban, amit az 1. táblázat foglal össze.

1. táblázat: R9 stratégia megvalósítása saját tervezett technológián belül

R stratégia megnevezése	Lehetőségek	Módszerek
R0 Refuse (elutasítás)	1.) Kevesebb termék ugyanazon funkció ellátásához 2.) Radikális technológiai innováció	1.) A technológiai selejt reciklálása az új nyersanyaghoz, ezáltal csökkentve az eredetileg felhasználandó nyersanyagtömeget. 2.) Visszaforgatás alkalmazása mind a technológiai selejtre, mind pedig a hűtővízre.
R2 Reduce (csökkentés)	1.) Nyersanyag hatékonyabb felhasználása 2.) Optimálisabb energiafelhasználás 3.) Kevesebb természeti erőforrás (víz) felhasználás 4.) Kevesebb keletkezett hulladék (gyártási selejt) a gyártás során	1.) Looping módszer alkalmazása a technológiai selejt újrahasznosítására. 2.) Energiamix összetételének megváltoztatása 3.) Looping módszer: szürkevíz keringtetése 4.) Looping módszer alkalmazása a technológiai selejt újrahasznosítására.
R8 Recycle (újrahasznosítás)	1.) Újrahasznosítás a termékgyártásnál 2.) Visszanyert technológiai selejt nyersanyagokban történő újrahasznosítása	1.) a) A technológiai selejt újrahasznosítása egy másik gyártási folyamathoz vagy az adott gyártási folyamaton belül (looping). b) A szürkevíz újrahasznosítása hűtővízként visszaforgatással (looping) 2.) Technológiai selejt visszavezetése az eredeti nyersanyaghoz az elvárt minőség megtartása mellett.

Az 1. táblázatban ismertetett lehetőségek és módszerek alapján három különböző forgatókönyvet hoztam létre és értékeltem ki a polietilén termék gyártási életciklus szakaszát meghatározó környezeti hatások tekintetében, Ez a munka az életciklus-értékelés fázisaiból, az életciklus-leltár (LCI) elemzéséből, az életciklus-hatásvizsgálatból (LCIA) és a kutatási eredmények értelmezéséből áll mindhárom forgatókönyvet illetően. Az első, alapforgatókönyvben a fröccsöntési folyamatot looping módszer nélkül határoztam meg. Ebben az esetben a technológiai selejt műanyag hulladékként hagyományos égetőműbe kerül kezelés céljából, a hűtési folyamatból származó vizet pedig szennyvízként kezelik egy szennyvíztisztító üzemben. A második forgatókönyvben a fröccsöntést a gyártási szakaszban looping módszerrel valósítom meg, a polietilén hulladék visszaforgatásra kerül. A harmadik forgatókönyvben looping történik a technológiai selejt és a szennyvíz esetében is, mindkettő reciklálásra kerül. Meghatározom, hogy a három forgatókönyv közül környezetvédelmi szempontból (kibocsátás és erőforrások) melyik a legelőnyösebb.

2.2. Funkcionális egység és rendszerhatár

Az életciklus-értékelések során a választott funkcionális egység 28.5 kg polietilén termék, amely mennyiség 100db 3dl-es PE kulacsot jelent. Ennyit szeretnénk legyártani 1 műszak alatt, mely során 5% technológiai selejt polietilén hulladékot realizálunk. Az LCA rendszerhatára bölcsőtől-kapuig terjed és a szállításokat figyelmen kívül hagyjuk.

2.3. Alkalmazott LCA szoftver

A polietilén termék gyártási szakaszára vonatkozóan meghatároztam az anyag- és energiaforrásokat, a kibocsátásokat és a környezeti hatáskategóriákat egy professzionális adatbázis felhasználása által kalkuláltam. A környezeti hatások számszerűsítését és az og diagramokon történő megjelentetését a GaBi Education 9.2.1 thinkstep szoftver (Sphera Solutions Ltd., Stuttgart, Németország) alkalmazásával végeztem el.

2.4. Leltárelemzés (Life Cycle Inventory)

A fröccsöntött termékrendszerek modellezéséhez termékspecifikus bemeneti adatokat használtam. Az életciklus-leltár (Life Cycle Inventory, LCI) módszer pontossága közvetlenül az adatok minőségével függ össze, és meghatározza az adatok objektivitását. Az alkalmazott módszer magába foglalja és számszerűsíti az input-output anyagáramlásokat és az energiaszükségletet valamennyi egységfolyamatra vonatkozóan. Ez a módszer az energiaszükségleteket és a környezeti kibocsátásokat a tömeg szerint osztja fel a fröccsöntött polietilén termékek között. A 2. táblázat az alapforgatókönyv leltárelemzési adatait foglalja össze.

2. táblázat: LCI adatok az alapforgatókönyvnél

INPUT/OUTPUT adatok	Érték és mértékegység
INPUTOK	
HDPE granulátum sűrűsége	0.95 g/cm ³
Granulátum típusa és származási helye: keverék, Németország	30 kg
EU-28 energiamix	55 MJ
Sűrített levegő (7 bar, átlagos hatékonyság)	100 Nm ³
Csapvíz (felszíni forrásból)	220 kg
OUTPUTOK	
Szennyvíz: szennyvíztisztító üzemben (kémiai redukció + oxidációs folyamat)	220 kg
Technológiai selejt: hagyományos égetés (energiavisszanyerés)	1,5 kg 13,1% villamos- és 30,2% hőenergia
PE termék)	28.5 kg

2.5. Életciklus hatásértékelés (Life Cycle Impact Assessment)

Az életciklus-hatásvizsgálat (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) szakaszának célja a vizsgált rendszer lehetséges környezeti hatásainak vizsgálata. Az életciklus-hatásvizsgálati módszer segítségével meghatározhatjuk a vizsgált rendszerből származó kibocsátások emberre vagy környezetre gyakorolt relatív kockázatát. A hatásértékelés során, dolgozatomban meghatároztam az anyag- és energiaerőforrásokat, a primer energia értékeket, a környezeti kibocsátásokat és 11 hatáskategóriát a három forgatókönyvre. Egy műszak alatt legyártott termék mennyiséget vettem alapul, 28.5 kg polietilén termék és 1.5 kg technológiai selejt teljes életciklus-erőforrásigényének és környezeti kibocsátásának meghatározásához.

Az Európában rendelkezésre álló hatásértékelési módszerek közül ebben a kutatómunkában a CML 2016 (Centrum voor Milieukunde Leiden) módszert alkalmaztuk. A CML-módszernél a Leideni Egyetem Környezettudományi Központja dolgozta ki a hatáskategóriákat. A hatáskategória-mutatók összehasonlításának megvalósítása érdekében, CML 2016 módszer szerinti normalizálást és LCIA Survey 2012 módszer szerinti súlyozást alkalmaztam (a biogén szén kizárása mellett).

Nyolc fő környezeti hatást - globális felmelegedési potenciál, savasodási potenciál, eutrofizációs potenciál, humán toxicitás, abiotikus kimerülés (fosszilis és elemek) édesvízi ökototoxicitás és tengervízi ökototoxicitás - használtam a kutatási elemzéshez, illetve vizsgáltam az anyag- és energiafelhasználást, valamint az emisszió kibocsátást is.

Korunk társadalmában fontos szempont az éghajlatváltozással kapcsolatos közérdeklődés, aggodalom, és ezt a környezeti hatást a globális felmelegedési potenciálon keresztül mérik. A globális felmelegedési potenciál értéke 100 évre vonatkozik, kivéve a biogén szenet. Az ökoszisztéma-védelem olyan anyagokkal kapcsolatos, mint a kén, a nitrogén-oxidok és a foszforvegyületek, amelyek közvetlenül kapcsolódnak a savasodási potenciálhoz és az eutrofizációs potenciálhoz. A tengervízi ökototoxicitás a kibocsátott toxikus anyagok tengeri vízi ökoszisztémákra gyakorolt hatására utal. A humán toxicitás a mérgező anyagoknak való kitettséget és azok hatásait írja le. Az abiotikus erőforrások kimerülése az egyik legvitatottabb hatáskategória, hiszen ez az ökológiailag élettelen, de az élethez szükséges tényezőkre utal.

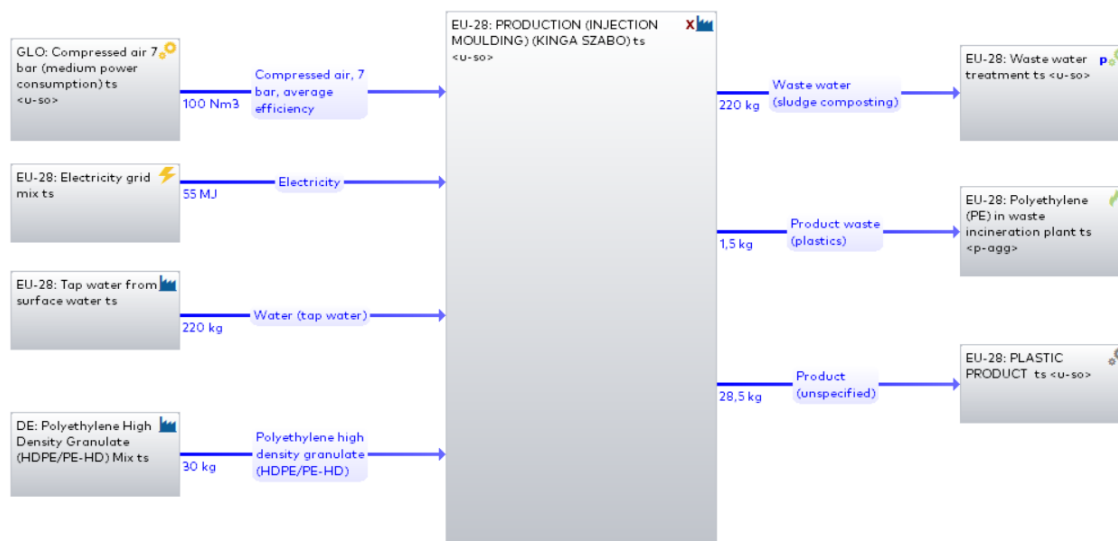
3. Eredmények

3.1. Eredmények az 1. számú forgatókönyvre vonatkozóan

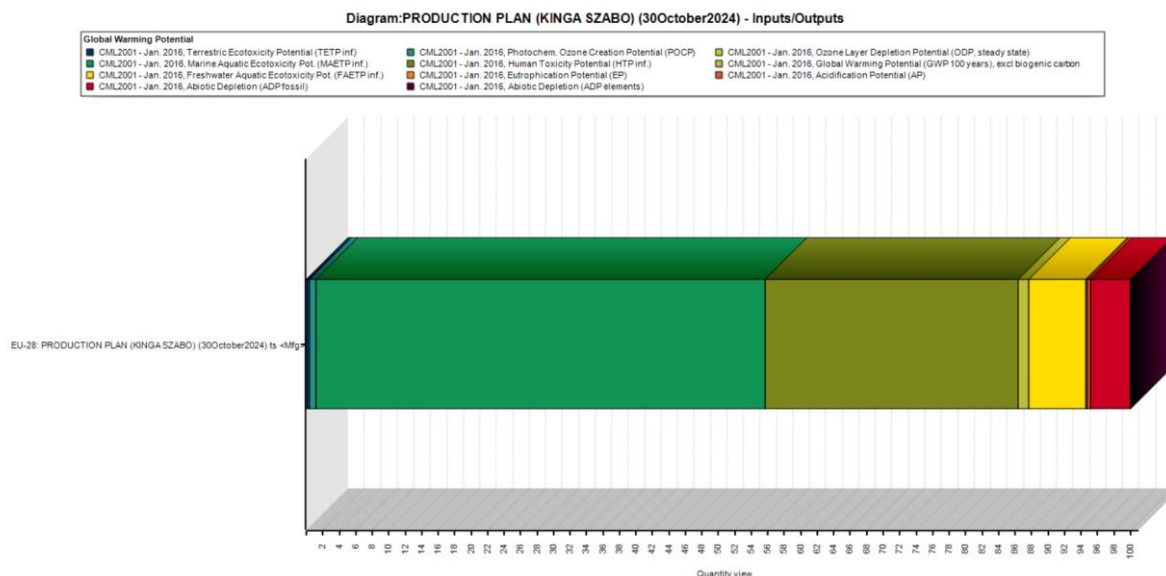
A vizsgált fröccsöntési folyamat alapanyaga nagy sűrűségű polietilén granulátum (HDPE), sűrített levegő és csapvíz, ahol 30 kg polietilén granulátumból 28.5 kg fröccsöntött termék képződik 1 műszak alatt. A polietilén granulátum Németországból származó technológias keverék, melynek átlagsűrűsége $0,95 \text{ g/cm}^3$. A gyártási szakaszban maximum 5%-os termékvesztéssel terveztem, ami 1.5 kg technológiai selejtet jelent. Villamosenergiaként a legfrissebb az általam alkalmazott LCA szoftver adatbázisán alapuló magyar energiamixet használtam. A 6. ábrán bemutatott gyártási folyamat eredményeképpen, a primer energiafelhasználás $2,17 \cdot 10^3 \text{ MJ}$ nem megújuló, és $91,1 \text{ MJ}$ megújuló energiát vett igénybe. Az emisszió levegőbe $909,17 \text{ kg}$, míg az emisszió édesvízbe $53085,49 \text{ kg}$. A fosszilis- és elemi abiotikus kimerülés $3,84 \cdot 10^{-10}$ illetve $4,33 \cdot 10^{-13} \text{ kg}$ -nak bizonyult. A savasodási potenciál $3,21 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$, az eutrofizációs potenciál $1,63 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$, az édesvízi ökototoxicitás $5,47 \cdot 10^{-11} \text{ kg}$, a globális felmelegedési potenciál $1,05 \cdot 10^{-10} \text{ kg}$, a humán toxicitás $2,44 \cdot 10^{-9} \text{ kg}$, a tengervízi ökototoxicitás pedig $4,33 \cdot 10^{-9} \text{ kg}$ -nak mutatkozik.

PRODUCTION PLAN (KINGA SZABO) (30October2024)

Process plan Reference quantities
The names of the basic processes are shown.



6. ábra: LCA plan fröccsöntési folyamatra GaBi Education 9.2.1. szoftverben (1. sz. forgatókönyv)

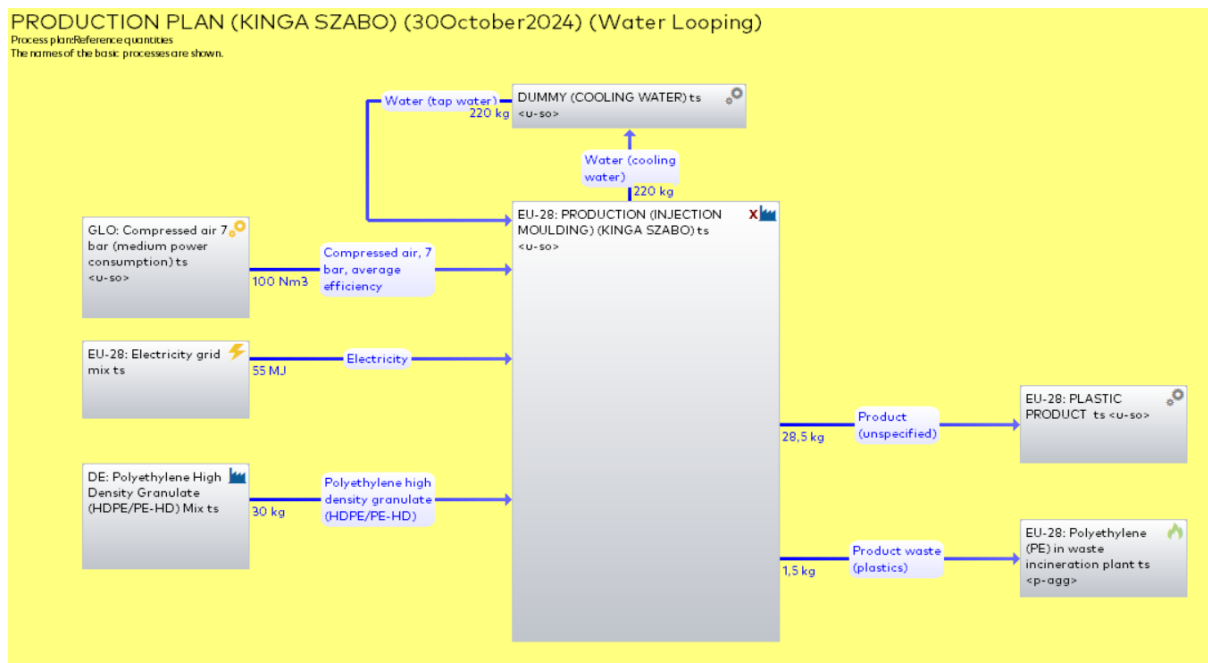


7. ábra: Környezeti hatáskategóriák százalékos megoszlása az 1. számú forgatókönyvre

A 7. ábrán a környezeti hatáskategóriák közül láthatjuk, hogy négy dominál, ezek pedig a tengervízi ökotoxicitás 55%, humán toxicitás 30%, édesvízi ökotoxicitás 7% és a fosszilis abiotikus kimerülés mely pedig 5%. Ez a 4 domináns hatás összesen 97%-ot tesz ki a 100%-ból, a továbbiakban megvizsgálom, hogy ez az arány javul-e.

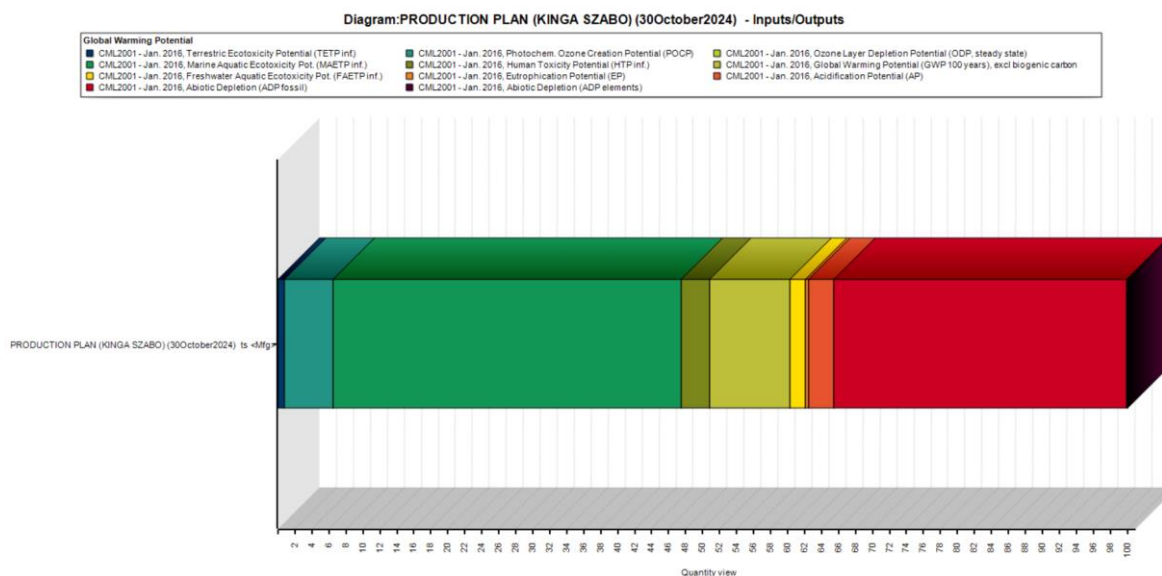
3.2. Eredmények az 2. számú forgatókönyvre vonatkozóan

A második forgatókönyv esetében a vizet 100%-ban visszaforgatjuk, looping módszert alkalmazunk.



8. ábra: LCA plan fröccsöntési folyamatra GaBi Education 9.2.1. szoftverben (2. sz. forgatókönyv)

A víz reciklálása javulást eredményezett egyes környezeti hatáskategóriában, nevezetesen a humán toxicitásban, az eutrofizációs potenciálban és a tengervízi ökototoxicitásban, valamint jelentős javulás mutatkozott az édesvízi ökototoxicitásban: $5,47 \cdot 10^{-11}$ kg-ról $2,01 \cdot 10^{-11}$ kg-ra csökkent az érték.



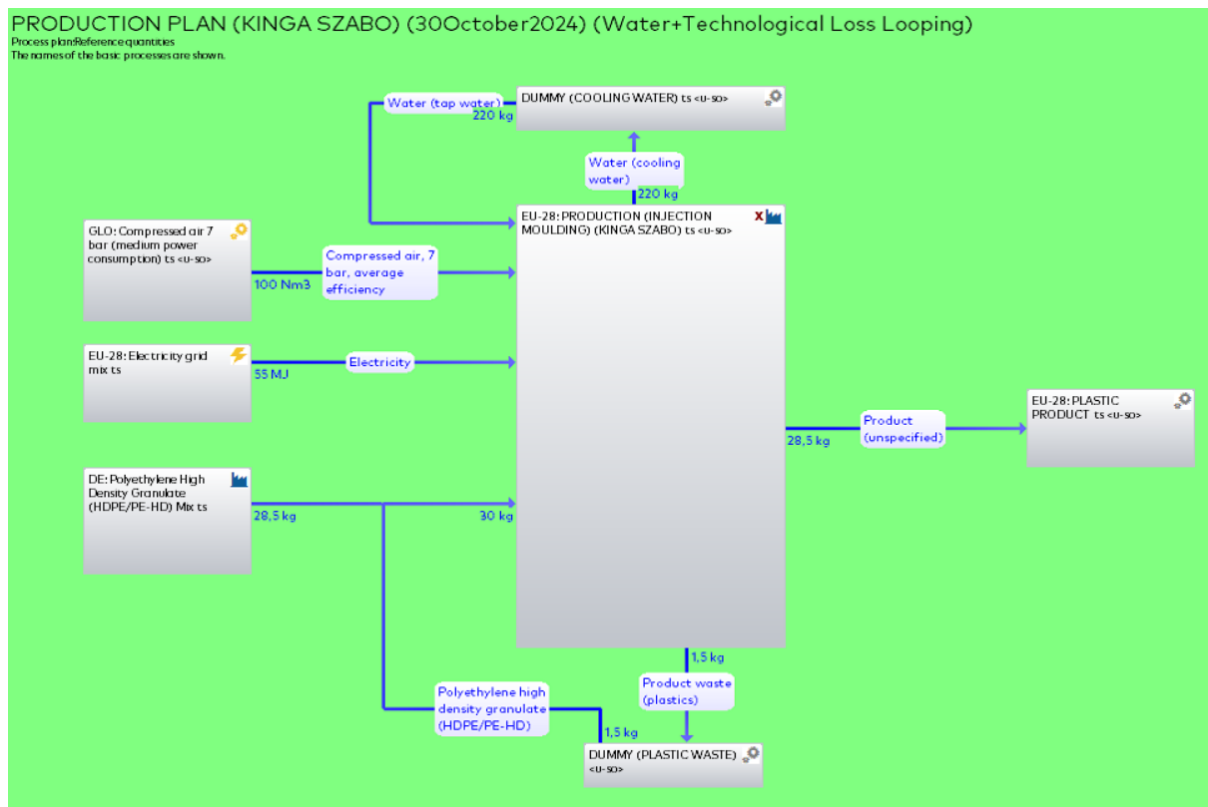
9. ábra: Környezeti hatáskategóriák százalékos megoszlása a 2. számú forgatókönyvre

Ezzel a forgatókönyvvvel sikerült megvalósítani a következő R9 stratégiai pontjaimat: R0/1, R0/2, R2/1, R2/3, R2/4, és R8/1.

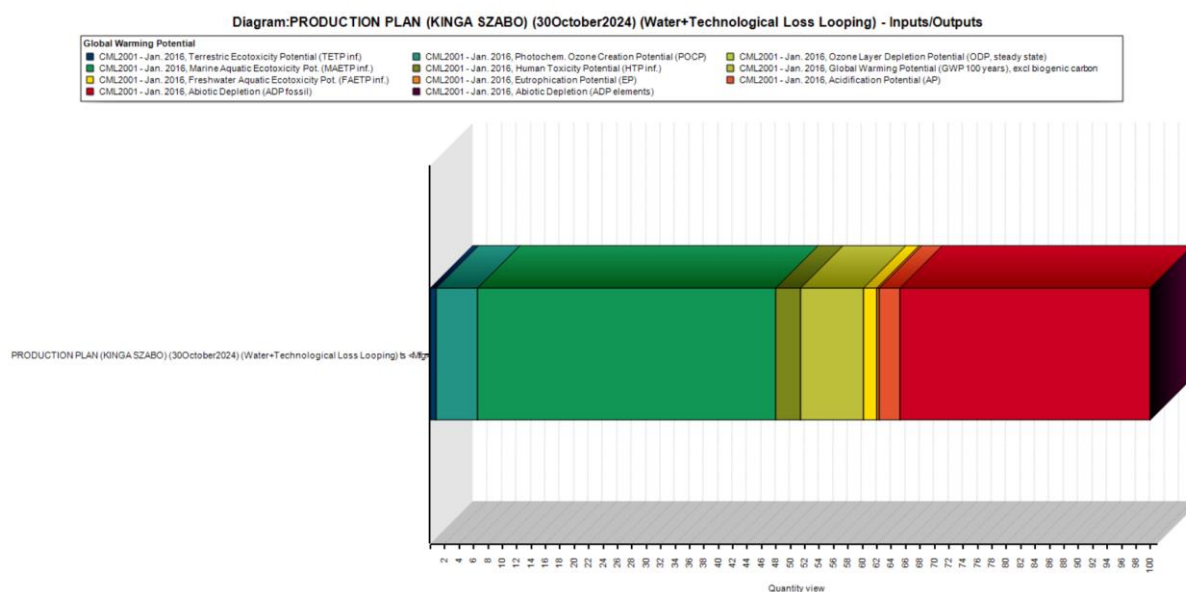
A 9. ábrán látható hogyan alakult a 4 domináns hatás aránya. Javulás volt tapasztalható, a 4 domináns hatás összességében az első forgatókönyvhöz képest 97%-ról 80%-ra csökkent, ennyit tesz ki a 100%-ból.

3.3. Eredmények az 3. számú forgatókönyvre vonatkozóan

A harmadik forgatókönyvben 100% mértékben visszaforgatjuk, azaz loopingoljuk a felhasznált hűtővizet és emellett a termékveszteséget (1.5 kg) is visszavezetjük és újrahasznosítjuk anyagként a fröccsöntési folyamat nyersanyagához hozzákeverve, az eredeti termékminőség megtartása mellett. Ezáltal a fröccsöntési folyamatot még alacsonyabb környezeti terhelés jellemzi. Ezzel a forgatókönyvvvel sikerült megvalósítani a következő R9 stratégiai pontjaimat: R2/1, R2/3.



10. ábra: LCA plan fröccsöntési folyamatra GaBi Education 9.2.1. szoftverben (3. sz. forgatókönyv)

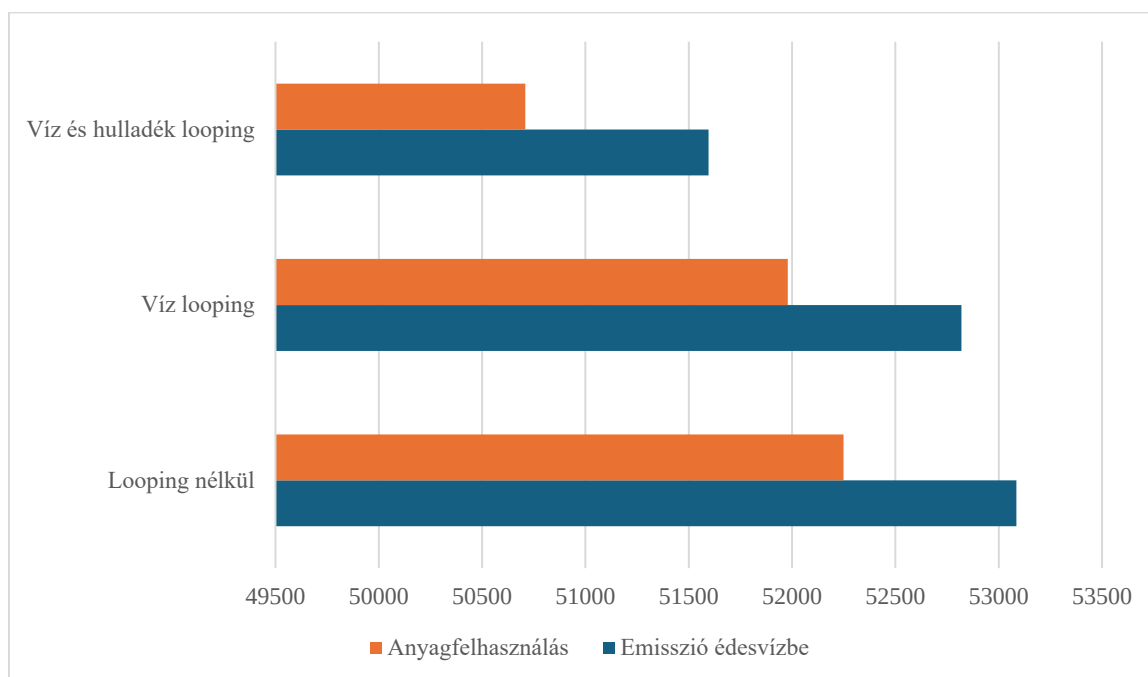


11. ábra: Környezeti hatáskategóriák százalékos megoszlása a 3. számú forgatókönyvre

A 11. ábrán látható hogyan alakult a 4 domináns hatás aránya a 3. forgatókönyv esetén. Az 1. és a 2. forgatókönyvhöz képest is javulást értem el, összességében a 4 domináns hatás a második forgatókönyvhöz képest 80%-ról 78%-ra csökkent, ennyit tesz ki a 100%-ból.

3.4. Összesített eredmények a három forgatókönyvre

A 12. ábrán szemléltetem az anyagi erőforrások és az édesvízbe történő kibocsátások értékeit a három vizsgált forgatókönyv esetében a gyártási szakaszban. Az anyagfelhasználás és az édesvízbe történő kibocsátások nagyobbak a többi áramláshoz képest, ezért ezeket a paramétereket ábrázoltam.



12. ábra: Az anyagfelhasználás és az édesvízi emissziók értékei a gyártási szakaszban a vizsgált termelési megoldások esetében

A 3. táblázat a három forgatókönyvre vonatkoztatott anyag- és energiafelhasználást, a környezeti hatásokat és az emissziókat foglalja össze kg-ban.

3.táblázat: Környezeti hatások a vizsgált forgatókönyvekre [kg]

	Forgatókönyv 1	Forgatókönyv 2	Forgatókönyv 3
Anyagfelhasználás	52249	51979,55	50709,43
Energiafelhasználás	51,96	51,95	49,479
Fosszilis abiotikus kimerülés	$3,84 \cdot 10^{-10}$	$3,83 \cdot 10^{-10}$	$3,65 \cdot 10^{-10}$
Elemi abiotikus kimerülés	$4,33 \cdot 10^{-13}$	$4,31 \cdot 10^{-13}$	$4,12 \cdot 10^{-13}$
Savasodási potenciál	$3,21 \cdot 10^{-11}$	$3,21 \cdot 10^{-11}$	$3,06 \cdot 10^{-11}$
Eutrofizációs potenciál	$1,63 \cdot 10^{-11}$	$3,95 \cdot 10^{-12}$	$3,76 \cdot 10^{-12}$
Édesvízi ökototoxicitás	$5,47 \cdot 10^{-11}$	$2,01 \cdot 10^{-11}$	$1,91 \cdot 10^{-11}$
Globális felmelegedési potenciál	$1,05 \cdot 10^{-10}$	$1,05 \cdot 10^{-10}$	$9,26 \cdot 10^{-11}$
Humán toxicitás	$2,44 \cdot 10^{-9}$	$3,73 \cdot 10^{-11}$	$3,56 \cdot 10^{-11}$
Tengervízi ökototoxicitás	$4,33 \cdot 10^{-9}$	$4,54 \cdot 10^{-10}$	$4,36 \cdot 10^{-10}$
Emisszió édesvízbe	53085,49	52819,37	51595,61
Emisszió levegőbe	909,17	908,42	828,48

4. Konklúziók

Napjainkban a rohamos gazdasági növekedés és a természeti erőforrások szűkössége között egyre nagyobb a szakadék. Az európai zöld megállapodás, a fenntartható fejlődési célok és a körforgásos gazdaságra vonatkozó stratégia keretében, Európa 2050-re igyekszik elérni a klímasemlegességet [41]. Ezen célkitűzések megvalósítása egy olyan holisztikus megközelítést követel, amely átfogó vizsgálatot tesz lehetővé a termékek és a technológiák környezetterhelése szempontjából. Az életciklus-értékelés alkalmazása során számszerűsíthető az, hogy egy termék teljes élettartama (előállítás, elhasználás, a belőle képződő hulladék ártalmatlanítása) mennyi természeti erőforrást használ fel, és milyen környezeti terhelést okoz, ideértve az energiahatékonysági kérdéseket is. Az életciklus-értékelés lehet a vállalatok fenntartható fejlődésének egyetlen átfogó ökoinnovációs mutatója és végrehajtási technikájának eszköze. Ennek tükrében, fenntarthatósági szempontból, elengedhetetlen a gyártási szakasz értékelése és a gyártásközi hulladék elkerülése.

Tekintettel a fentiekre, dolgozatomban megvizsgáltam a környezeti hatások és a primerenergia értékeit annak megállapítása érdekében, hogy melyik gyártási-forgatókönyv az optimálisabb. Eredményeim alapján, a környezeti hatáskategóriák reciklált víz és műanyag hulladék esetében a legalacsonyabbak.

A kialakított LCA-modell további környezeti tényezőkkel is integrálható, például a települési szilárd hulladék kezelését (Municipal solid waste management, MSWM) egyre gyakrabban illesztik be az értékelésbe [43]. Az életciklus-fenntarthatósági értékelés (Life Cycle Sustainability Assessment, LCSA) és a környezeti kockázatértékelés integrálását is egyre több esetben alkalmazott módszer a természeti erőforrások hatékony felhasználásával kapcsolatos döntéshozatalban [44-46]. Az LCA és körforgásos gazdaság integrációja kombinálható gazdasági mutatókkal. A környezeti teljesítmény értékeléséhez olyan tényezőket állapítottak meg, amelyek a hulladék összetételére, a SWOT- és a PESTEL-elemzésre is kiterjednek [47]. A szervezeti életciklus-fogyasztásfelmérés (Organizational Life Cycle Consumption Assessment) során bemutatásra kerülnek a leggyakrabban felmerülő módszertani választási lehetőségek [48]. A növekvő energiaköltségek részletesebb és szisztematikusabb életciklus-alapú döntéshozatalt tesznek szükségessé [49].

Mivel az alapanyagok jelentős szerepet töltenek be a termékek és a szolgáltatások környezetterhelésének meghatározásában, a fenntarthatóság biztosítása érdekében kiemelt figyelmet kell fordítani a megfelelő anyag kiválasztására egy adott funkcióhoz. A szakirodalomban vannak példák olyan tanulmányokra, ahol az LCA-t a környezet szempontjából jobb anyagok kiválasztására használják [50-52]. Ennek kapcsán a jövőben az általam vizsgált forgatókönyvek kibővítéseként, a műanyag granulátumot ki lehetne váltani biopolimerekkel, például PLA-val, ezzel megvalósítva az R0 stratégiát. További javaslatom, a technológiai selejt feldolgozása termikus kezeléssel, ezzel energiát visszanyerve, amivel teljesíteném az R8 és az R9 egyes stratégiai pontjait.

5. Összefoglalás

Dolgozatomban egy fröccsöntési folyamatot vizsgáltam meg több forgatókönyv alapján polietilén palackra. Próbáltam minél környezetbarátabb megoldást találni, minél több 9R stratégiai szempontot megvalósítani, illetve meghatározni a környezetre gyakorolt hatásokat. 28.5 kg terméket állítottam elő nagy sűrűségű polietilén granulátumból, ez 100db 3 dl-es palackot tesz ki 1 műszak alatt. Az alapvető célkitűzésem az volt, hogy meghatározzam az erőforrás-felhasználások, a kibocsátások és a környezeti hatáskategóriák értékét egy professzionális adatbázissal rendelkező szoftver segítségével. A környezeti hatáskategóriák számszerűsítését GaBi 9.2.1. thinkstep szoftverrel végeztem, ahol CML 2016 hatásértékelési módszert alkalmaztam. Az első forgatókönyv szerinti looping nélküli módszerhez képest alacsonyabb értékeket kaptunk a második, a technológiai vizet recikláló, víz-loopingos forgatókönyvben. Azonban a harmadik, polietilénhulladék- és vízloopingot alkalmazó forgatókönyvben a környezeti hatáskategóriák látványosabban csökkentek, különös tekintettel az édesvízi ökototoxicitásra. Következésképpen, a technológiai selejt és a víz visszavezetése a folyamatba mutatja a legkedvezőbb gyártási megoldást a környezetterhelés szempontjából. Amíg az első két esetben a globális felmelegedési potenciál értéke 62.3 kg CO₂ egyenérték volt, addig a harmadik forgatókönyvnél ez az érték lecsökkent 55 kg CO₂ egyenértékre.

Az első és a harmadik, mint legeredményesebb forgatókönyvet összehasonlítva a 4 domináns hatás – tengervízi ökototoxicitás, humán toxicitás, édesvízi ökototoxicitás, fosszilis abiotikus kimerülés – számottevő javulást mutatott, összességében az első forgatókönyvhöz képest 97%-ról 78%-ra csökkent, ennyit tesz ki a 100%-ból.

6. Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Mannheim Viktóriának, hogy a tevékenységemet teljes szakmai odaadással és figyelemmel kísérte, munkám során mindvégig segítségemre volt és támogatott.

Köszönettel tartozom a BGE által szervezett Fenntarthatóság mérése a vállalati gyakorlatban (LCA, körforgásos gazdaság, ESG)-(B/2020/000356) megnevezésű felnőttképzés okán, mely során elmélyíthettem elméleti és gyakorlati tudásom az LCA és a környezetmenedzsment kapcsán.

Köszönöm a Műszaki Menedzsment és Vállalkozási Tanszék valamennyi dolgozójának, hogy segítséget nyújtott TDK dolgozatom elkészülése érdekében.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Mannheim, V., & Simenfalvi, Z. (2020). Total life cycle of polypropylene products: Reducing environmental impacts in the manufacturing phase. *Polymers*, 12(9), 1901.
- [2] Polimerek Magazin. (2021, September 30). A fröccsöntés helyzete Magyarországon 2019-ben - Polimerek. <http://polimerek.hu/2020/12/14/a-froccsontes-helyzete-magyarorszagon-2019-ben/>
- [3] Tóthné Szita, K., Pintér, J. M., & Radomszki, L. (2022). A BIM és az LCA szerepe a hatékony épületüzemeltetésben. *MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE*, 12(2), 220-231.
- [4] International Organisation for Standardization. ISO 14040:2006, Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework; ISO: Geneva, Switzerland, 2006; Elérhető online: <https://www.iso.org/standard/37456.html> (Letöltve: 2024.10.10.)
- [5] International Organisation for Standardization. ISO 14044:2006, Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines; ISO: Geneva, Switzerland, 2006; Elérhető online: <https://www.iso.org/standard/38498.html> (Letöltve: 2024.10.10.)
- [6] Bakosné Böröcz, M. (2016). AZ ÉLETCIKLUSLEMLÉZÉS MÓDSZERÉNEK HASZNÁLATA ÉS KARBONLÁBNYOM SZÁMÍTÁS ALAPJAI.
- [7] Tracex tech, & Tracex tech. (2024, July 14). ISO 14044: Guidelines and Standards. Blockchain for Food Safety, Traceability and Supplychain Transparency. <https://tracex tech.com/iso-14044-guidelines-and-standards/>
- [8] Civancik-Uslu, D.; Puig, R.; Ferrer, L.; 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.* 2019, 212, 925–940.
- [9] Tóth Szita, K. (2017). The application of life cycle assessment in circular economy. *Hungarian Agricultural Engineering*, 31, 5-9.
- [10] Fenntartható fejlődés - EUR-Lex. (n.d.). Utolsó felülvizsgálat: 2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=LEGISSUM:sustainable_development
- [11] Fenntartható fejlődés. (n.d.). ISO-Plus. (Letöltve: 2024. 10. 15.) <https://www.isoplus.hu/koernyezet/fenntarthato-fejlodes.html>

- [12] Maier, S.D.; Beck, T.; Francisco Vallejo, J.; Horn, R.; Söhlemann, J.-H.; Nguyen, T.T. Methodological Approach for the Sustainability Assessment of Development Cooperation Projects for Built Innovations Based on the SDGs and Life Cycle Thinking. *Sustainability* 2016, 8, 1006. <https://doi.org/10.3390/su8101006>
- [13] Bojarska, J., Złoty, P., & Wolf, W. M. (2021). Life cycle assessment as tool for realization of sustainable development goals-towards sustainable future of the world: mini review. *Acta Innovations*.
- [14] Fenntartható fejlődési célok. (n.d.). (2020) https://www.ksh.hu/sdg/archive_index.html
- [15] Katits, E., Magyari, K., & Varga, Z. (2023). A vállalati fordulatkezelési tanácsadás aktualitásai a fenntarthatósági elvek keretében. *Új Munkaügyi Szemle*, 4(1), 43-61.
- [16] Rivas, S., Urraca, R., Bertoldi, P., & Thiel, C. (2021). Towards the EU Green Deal: Local key factors to achieve ambitious 2030 climate targets. *Journal of cleaner production*, 320, 128878.
- [17] Schaffhauser T. (2024, March 4). A 2040-es uniós klímapolitikai célok – a hiányzó láncszem a klímasemlegességhez. [greenpolicycenter.com](https://www.greenpolicycenter.com/2024/02/07/a-2040-es-unios-klimapolitikai-celok-a-hianyzo-lancszem-a-klimasemlegesseghez/). <https://www.greenpolicycenter.com/2024/02/07/a-2040-es-unios-klimapolitikai-celok-a-hianyzo-lancszem-a-klimasemlegesseghez/>
- [18] Judit, S. ZÖLD PÉNZÜGYEKKEL A FENNTARTHATÓ GAZDASÁGÉRT. PÉNZÜGY-SZÁMVITEL FÜZETEK VII. (2023), 8.
- [19] Magyar Tudomány 2024/02. Akadémiai Kiadó (2024). (Letöltve: 2024. 10. 17. https://mersz.hu/dokumentum/matud202402__5/#matud202402_po-heading-id_yaRN9ntDSEOAtR_kR8Rttw_p2)
- [20] PETRA, T. I. B. Fenntarthatósági jelentéseknek való megfelelés az Európai Unió szabályozási környezetben. (2024) COMITATUS Önkormányzati Szemle – 34. évfolyam 249. szám 2024
- [21] Marijke-Janz. (2024, July 10). Az európai fenntarthatósági jelentéstételi szabványokról (ESRS) dióhéjban. [denkstatt sustainability consulting](https://denkstatt.hu/esrs-szabvanyok-magyarazat/). <https://denkstatt.hu/esrs-szabvanyok-magyarazat/>
- [22] EFRAG. (2022, November). DRAFT EUROPEAN SUSTAINABILITY REPORTING STANDARDS, ESRS E5 Resource use and circular economy. <https://www.efrag.org/sites/default/files/sites/webpublishing/SiteAssets/12%20Draft%20ESRS%20E5%20Resource%20use%20and%20circular%20economy.pdf>

- [23] Sauvé, S., Bernard, S., & Sloan, P. (2016). Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental development*, 17, 48-56.
- [24] Tóthné Szita, K., S Gubik, A., & Bartha, Z. (2017). A körforgásos gazdaságban rejlő lehetőségek a KKV-k számára.
- [25] EB (2015a): A Bizottság Közleménye Az Európai Parlamentnek, A Tanácsnak, Az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és A Régiók Bizottságának Az anyagkörforgás megvalósítása – a körforgásos gazdaságra vonatkozó uniós cselekvési terv, Brüsszel, 2015.12.2. COM (2015) 614 final
- [26] Costa, I., Massard, G., & Agarwal, A. (2010). Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European Countries. *Journal of Cleaner Production*, 18, 815-822.
- [27] Vanhamäki, S., Virtanen, M., Luste, S., & Manskinen, K. (2020). Transition towards a circular economy at a regional level: A case study on closing biological loops. *Resources, Conservation & Recycling*, 156, 1-11.
- [28] Németh, N., & Mészáros, K. (2022). Vidéki háztartások a körforgásos gazdaság megvalósulásáért: A háztartási hulladékok kezelése és a környezettudatos vásárlási döntések vizsgálata Sopronban és környékén= Rural Households for a Circular Economy. *GAZDÁLKODÁS: AGRÁRÖKONÓMIAI TUDOMÁNYOS FOLYÓIRAT*, 66(3), 260-281.
- [29] Ellen Macarthur Foundation (EMF) (2015): Towards A Circular Economy: Business Rationale For An Accelerated Transition, www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_EllenMacArthur-Foundation_9-Dec2015.pdf (2024.10.20.)
- [30] Circular economy principles. (n.d.-b). Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-principles> (2024.10.20.)
- [31] Walter J.V. Vermeulen, Denise Reike and Sjors Witjes: —CircularEconomy 3.0 (2019) https://www.researchgate.net/publication/335602859_Circular_Economy_30_-_Solving_confusion_around_new_conceptions_of_circularity_by_synthesising_and_reorganising_the_3R's_concept_into_a_10R_hierarchy
- [32] Khaw-ngern, K., Peuchthonglang, P., Klomkul, L., & Khaw-ngern, C. (2021). The 9Rs strategies for the circular economy 3.0. *Psychol. Educ. J*, 58, 1440-1446.

- [33] Winans, K., Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 825-833.
- [34] Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E. & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain – Policy Report. Hague: PBL Netherlands Environment Assessment Agency
- [35] Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *J. Clean. Prod.* 2016;114:11–32.
- [36] Towards Circular Economy in the Household Appliance industry: An Overview of cases. (2018, February 1). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/345320766_Towards_Circular_Economy_in_the_Household_Appliance_Industry_An_Overview_of_Cases
- [37] Kozma, D. E., Molnárné Barna, K., & Molnár, T. (2021). Rangsoroljunk vagy nem? A körforgásos gazdaság mérési lehetőségei és azok összehasonlítása az EU-tagországokban. *Vezetéstudomány-Budapest Management Review*, 52(8-9), 63-77.
- [38] Sitadewi D, Yudoko G, Okdinawati L. Bibliographic mapping of post-consumer plastic waste based on hierarchical circular principles across the system perspective. *Heliyon*. 2021 Jun;7(6):e07154. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07154. PMID: 34141922; PMCID: PMC8187834.
- [39] Nemes, Z. (2018). Körkörös gazdasági modell, ipari parkok és ipari ökoszisztémák. Székesfehérvár esettanulmánya.
- [40] Data-Driven Approaches for Circular Economy in Manufacturing for Digital Technologies: A Review of current research and proposed framework. (n.d.). (2018) ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/326946826_Data-Driven_Approaches_for_Circular_Economy_in_Manufacturing_for_Digital_Technologies_A_Review_of_Current_Research_and_Proposed_Framework
- [41] Kaczmarczyk, B., & Urych, I. (2022). Perception of the transition to a zero-emission economy in the opinion of Polish students. *Energies*, 15(3), 1102.
- [42] Mannheim, V. (2022, February). INNOVÁCIÓ, Polimer termékek teljes életciklusa, különös tekintettel az életciklus-vége szakaszra. *ZIP Magazin*.
- [43] Lara-Topete, G. O., Yebra-Montes, C., Orozco-Nunnelly, D. A., Robles-Rodríguez, C. E., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). An integrated environmental assessment

- of MSW management in a large city of a developing country: Taking the first steps towards a circular economy model. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 838542.
- [44] Walker, T. R., McGuinty, E., & Hickman, D. (2021). Marine debris database development using international best practices: A case study in Vietnam. *Marine Pollution Bulletin*, 173, 112948.
- [45] Peña, L. V. D. L., Taelman, S. E., Pr  at, N., Boone, L., Van der Biest, K., Cust  dio, M., ... & Dewulf, J. (2022). Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems: Review of the integration of Life Cycle Assessment, Environmental Risk Assessment and Ecosystem Services Assessment. *Science of the Total Environment*, 808, 152125.
- [46] Hackenhaar, I., Alvarenga, R. A., Bachmann, T. M., Riva, F., Horn, R., Graf, R., & Dewulf, J. (2022). A critical review of criticality methods for a European Life Cycle Sustainability Assessment. *Procedia CIRP*, 105, 428-433.
- [47] Loizia, P., Voukkali, I., Zorpas, A. A., Pedre  o, J. N., Chatziparaskeva, G., Inglezakis, V. J., ... & Doula, M. (2021). Measuring the level of environmental performance in insular areas, through key performed indicators, in the framework of waste strategy development. *Science of the Total Environment*, 753, 141974.
- [48] Rimano, M., Simboli, A., Taddeo, R., Del Grosso, M., & Raggi, A. (2021). The environmental impact of organizations: A pilot test from the packaging industry based on organizational life cycle assessment. *Sustainability*, 13(20), 11402.
- [49] Sany  -Mengual, E., and Sala, S. (2022). Life cycle assessment support to environmental ambitions of EU policies and the sustainable development Goals. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 00, 1–12.
- [50] Chang, F., Chen, K., Yang, P., & Ko, C. (2018). Environmental benefit of utilizing bamboo material based on life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 204, 60–69.
- [51] Broeren, M., Molenveld, K., Van Den Oever, M., Patel, M., Worrell, E., & Shen, L. (2016). Early-stage sustainability assessment to assist with material selection: a case study for biobased printer panels. *Journal of Cleaner Production*, 135, 30–41.
- [52] Calado, E. A., Leite, M., & Silva, A. (2018). Selecting composite materials considering cost and environmental impact in the early phases of aircraft structure design. *Journal of Cleaner Production*, 186, 113–122.