

**MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR**



**AZ ESG RENDSZER LEHETSÉGES HATÁSA
A RECYCLING LOGISZTIKAI FOLYAMATOK
FELÉPÍTÉSÉRE ÉS MŰKÖDÉSÉRE**

CÍMŰ Ph.D. ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Készítette:

Latorcai Zsombor Lóránd

okleveles környezetmérnök / energiagazdálkodási specialista (MSc)

**HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
ANYAGÁRAMLÁSI RENDSZEREK ÉS LOGISZTIKAI INFORMATIKA
TÉMATERÜLET
LOGISZTIKAI INTÉZET**

Doktori Iskola Vezető
Prof. Dr. Kovács László
egyetemi tanár

Tématerület vezető
Prof. Dr. Illés Béla
professor emeritus

Témavezető
Prof. Dr. Illés Béla
professor emeritus

Társtémavezető
Prof. Dr. Tamás Péter
egyetemi tanár

**Miskolc
2026**

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	1
2. A szakirodalom áttekintése, a kutatás módszertana és célkitűzései	3
3. ESG rizikófaktorokon alapuló modell megalkotása	7
4. Új tudományos eredmények és tézisek ismertetése.....	19
5. Összefoglalás.....	22
6. New scientific result.....	24
7. Summary	27
8. Irodalomjegyzék, értekezés témakörében használt saját publikációk	29

1. BEVEZETÉS

A fenntarthatósági szemlélet napjainkban az ESG (Environmental, Social, Governance – Környezeti, Társadalmi, Irányítási) keretrendszerben ölt testet, amely rendszerszintű megközelítést kínál a vállalatok számára a három szempont összehangolt kezelésére. Az ESG keretrendszerben a gazdasági növekedés és a környezeti, társadalmi felelősségvállalás nem egymást kizáró, hanem egymást kifejezetten erősítő elemek. Napjainkban az ESG már nem csupán egy értékalapú iránytű, hanem egyre inkább befektetési és működési követelmény is, amely lehetővé teszi a fenntarthatósági kockázatok és lehetőségek adataalapú kezelését. Az ESG tehát a fenntartható fejlődés operatív eszköztára, amely képessé teszi az érintett szervezeteket arra, hogy hozzájáruljanak a gazdasági növekedés, a társadalmi jólét és a környezeti egyensúly egyidejű fenntartásához, miközben biztosítják hosszú távú versenyképességüket.

A fenntarthatósági célkitűzések elérésében az újrahasznosítási (recycling) logisztika kulcsfontosságú szerepet játszik, hiszen ez a terület nem csupán a hulladékkezelésről szól, hanem az erőforrások hatékony felhasználásáról és a környezeti terhelés csökkentéséről is. A recycling logisztika magában foglalja a hulladékok gyűjtését, szállítását, válogatását, feldolgozását és az újrahasznosított anyagok újbóli bevezetését a gyártási folyamatokba. Azonban ez a folyamat számos komplex kihívással néz szembe, amelyek megoldása alapvető fontosságú a körforgásos gazdaság eléréséhez.

A logisztikai infrastruktúra hiányosságai, mint például a nem megfelelő gyűjtőpontok vagy a drága szállítás, jelentősen gátolják a hatékony újrahasznosítási folyamatokat, a fogyasztói magatartás is kulcskérdésként jelenik meg, így a tudatosság hiánya vagy a helytelen (szelektív) hulladékgyűjtés közvetlenül rontja a rendszer összteljesítményét és hatékonyságát. Ezen a ponton az ESG szempontok kiemelt jelentőséget kapnak, mivel valós beavatkozási és ellenőrzési lehetőséget biztosítanak a recycling logisztika fejlesztésére. Az ESG elvek iránymutatást adnak a vállalatoknak a fenntartható működésre, beleértve a hulladékcsökkentést és az újrahasznosítási ráták növelését. Az ezen kritériumoknak való megfelelés ma már mérhető gazdasági előnyökkel is jár, hiszen növeli a befektetői bizalmat, csökkenti a működési költségeket és javítja a márka hírnevét a piacon.

A globalizáció folyamata tovább árnyalja a recycling logisztika helyzetét, egyfelől lehetőséget teremt a globális újrahasznosítási piacok kialakulására, hogy

a hulladékanyagok a legmegfelelőbb feldolgozó üzemekbe kerülhessenek, másfelől viszont komoly környezeti és etikai kockázatokat vet fel. A határokon átnyúló hulladékszállítás, különösen ha az szabályozatlan módon történik, veszélyezteti a környezeti egyensúlyt. A globális ellátási láncok komplexitása nehezíti a hulladékáramok nyomon követését és ellenőrzését, ami különösen problematikus a fogyasztói társadalom által generált hatalmas mennyiségű hulladék, az egyszer használatos termékek és az „eldobható kultúra” fényében.

A kutatás során kiemelt hangsúlyt kap az a felismerés, hogy az ESG keretrendszer környezeti, társadalmi és vállalatirányítási szempontjainak integrálása a fenntarthatósági vizsgálatok alapkövévé vált. Az ESG szempontok logisztikai alkalmazása nemcsak a fenntarthatósági célkitűzések megvalósítását segíti elő, hanem a gazdasági teljesítmény növeléséhez is érdemben hozzájárul. A recycling folyamatok és az életciklus-szemlélet az ESG célok gyakorlati megvalósításának kulcsfontosságú elemei, amelyek lehetővé teszik az ellátási láncok környezeti hatásainak radikális csökkentését és a hosszú távú fenntarthatósági stratégiai tervezést. A logisztikai folyamatok, mint a globális gazdaság gerincét alkotó funkciók, kulcsszerepet töltenek be ebben az átalakulásban, hiszen az ellátási láncok optimalizálása, a szállítási hálózatok energiahatékony működtetése, valamint a hulladékgazdálkodási stratégiák integrálása jelenti a valódi potenciált a környezeti lábnyom mérséklése terén.

2. A SZAKIRODALOM ÁTTEKINTÉSE, A KUTATÁS MÓDSZERTANA ÉS CÉLKITŰZÉSEI

A disszertáció témájának és kutatási céljainak megválasztását az alábbiakban részletezem. A következőkben megfogalmazom ezeket a célkitűzéseket és ismertetem a kutatás módszertanát.

Kutatási témámnak azért választottam az ESG rendszer lehetséges hatását a recycling logisztikai folyamatokra, mert felismertem, hogy a recycling logisztikai folyamatok jelenleg nem vagy csak kis mértékben veszik figyelembe a környezetvédelmi és társadalmi felelősségvállalási kérdéseket. A kutatásom fókuszába azért helyeztem a recycling logisztika tervezését és optimalizálását, mert e rendszerek komplexitása olyan elméleti modellek alkalmazását teszi szükségessé, amelyek képesek a gazdasági és ESG célok egyidejű kezelésére, kiváltképp olyan szegmensben ami az ESG jogszabályi keretek fókuszában található.

2.1. Kutatási célkitűzések

A kutatásom célkitűzéseit az alábbiakban foglalom össze:

1. Elsődleges célom az ESG követelmények és a logisztikai folyamatok szinergiájának feltárása volt. Ezen célkitűzésemnél fontos volt azonosítani azokat a kritikus érintkezési pontokat, ahol a környezeti, társadalmi és vállalatirányítási szempontok közvetlenül befolyásolják a logisztikai teljesítménymutatókat. Kiemelt figyelmet fordítottam a jogszabályi megfelelés és az operatív hatékonyság közötti összefüggések elemzésére.
2. Célul tűztem ki a recycling logisztikai folyamatok ESG keretrendszerben használható rendszerszemléletű modellezését, azonosítva a releváns kritikus pontokat a hálózatban. Olyan optimalizációs paraméterek és módszertanok meghatározására törekedtem, amelyek gyakorlati útmutatást nyújthatnak a logisztikai hálózatok ESG szemléletű, hatékony működtetéséhez.
3. Egy ESG fókuszú recycling logisztikai modell kidolgozásával, olyan komplex modellt kívántam megalkotni, amely a hagyományos recycling logisztikai folyamatokat a körforgásos gazdaság elvei szerint újraértelmezi. A modell a hulladékáramok és az információáramlás olyan zárt láncú integrációját célozza, amely biztosíthatja az anyagok nyomon követhetőségét és a vállalat ESG hitelességét.

4. A kutatásom végső célja a logisztikai folyamatok optimalítása ESG szempontú célfüggvények mentén, ahol olyan matematikai optimalizációs eljárások kidolgozására törekedtem, amelyek a klasszikus költség- és időminimalizálás mellett környezeti és társadalmi kockázati paramétereket is tartalmaznak.

2.2. Kutatás módszertana

– Szisztematikus irodalomkutatás

A kutatási tevékenységem során szisztematikus irodalomkutatással feltártam a témakörre vonatkozó hazai és nemzetközi releváns forrásokat, publikációkat, elemeztem a bennük lévő megállapításokat és eredményeket. A disszertációban megfogalmazott hipotézisek valódiságát, aktualitását először a hazai és a nemzetközi szakirodalom ismertetésével végeztem el. Segítségül hívtam a szakirodalom feltárásához a Scopus, Web of Science és Google Scholar interneten megtalálható tudományos publikációs gyűjtőhelyeket.

– Modellalkotás

A modell megalkotásához definiáltam a recycling logisztikai folyamatokat, az azok résztvevőit és tevékenységeiket, továbbá az ESG keretrendszer szerinti működéshez szükséges adatok általános körét és fajtáit, valamint a rendszer elemei közötti anyag- és információáramlást. Vizsgálataim során a hálózatoptimalizációs modellek jelentették a kiindulópontot és a többcélú optimalizást helyeztem a fókuszba.

2.3. A témához kapcsolódó szakirodalom áttekintése

A téma megértéséhez elengedhetetlen a témátörténeti ismereteinek és definícióinak ismertetése, valamint a hazai és nemzetközi irányok és szabályozások tematikus feldolgozása. Az ESG mozaikszóval először a 2004-ben megjelent Who Cares Wins ENSZ jelentésében lehetett találkozni, ugyanakkor az ESG rendszerekről a tudományos életben csak 4-5 éve beszélnek (korábban fenntarthatóság kifejezést használták gyakrabban) és foglalkoznak. Mindemellett az ESG keretrendszerekhez kapcsolódó szakirodalmi részek igen gazdagok (többek között: logisztika, optimalizálás, hálózati rendszerek, stb.). Ennek okán kifejezetten olyan szakirodalmakat kerestem, amelyek az ESG rendszerekben található különböző kapcsolódó rendszerek együttműködésével foglalkoznak. Fő

problémát az jelentette, hogy bár az előbb említett részrendszerek hazai és nemzetközi szakirodalma viszonylag gazdag, de az ESG keretrendszerekkel kapcsolatos alrendszerek elemzése nem, viszonylag szűk szegmensben fellelhető. Általánosságban elmondható, hogy a legtöbb szakirodalom az ESG rendszerek jogi, gazdasági hátterét elemzi és kevésbé térnek ki ezen elvárások valóságban történő megvalósítására és működésének optimalizálására. A szakirodalom feldolgozásával célom az volt, hogy következtetéseket tudjak levonni a logisztikai hálózatok ESG teljesítménye, az innováció, az ESG célok elérése, a recycling szerepe, a logisztikai láncok, az életciklus-szemlélet szakmai alkalmazása, valamint ezek integrációja, továbbá a fenntartható logisztikai hálózatok tervezése, és közöttük kialakítható kapcsolatok vonatkozásában. Kiemelt szempont az ESG rendszereknél a hálózatok szerepe, ezért a szakirodalom alapján, a kutatás célja érdekében feltártam az ESG rendszerek a logisztikai hálózatok működtetésével összefüggő kapcsolatokat.

A publikációs trendek elemzése alapján az ESG, recycling és életciklus-szemlélet területeken egyértelműen megfigyelhető a növekvő kutatói érdeklődés. Az elemzések rámutatnak, hogy az iparágak és az akadémiai szféra közötti együttműködés jelentős szerepet játszik a fenntarthatósági célok elérésében.

Az elmúlt évtizedben a fenntarthatóság kérdései az akadémiai és üzleti élet középpontjába kerültek, különösen a globális környezeti és társadalmi kihívások kezelésének szükségessége miatt. A fenntarthatóság megközelítése az ESG keretrendszer, az újrahasznosítás, valamint az életciklus-szemlélet köré épül, amelyek szorosan kapcsolódnak a logisztikai menedzsment rendszerekhez. Az ESG keretrendszer, amely a környezeti, társadalmi és vállalatirányítási szempontokat foglalja magában, alapvető eszköz a fenntarthatósági célok vállalati integrációjához. A környezeti kérdéskör különösen hangsúlyos a logisztikai ágazatban, amely jelentős hatással van az energiafogyasztásra, a kibocsátásokra és a hulladékgazdálkodásra. A logisztikai hálózatok optimalizálása, például a zöld szállítási megoldások és az energiahatékony raktározás közvetlenül hozzájárulnak az ESG teljesítmény növeléséhez.

Az újrahasznosítás és az életciklus-szemlélet szintén meghatározó elemek a fenntartható logisztikai láncok kialakításában. Az újrahasznosítás integrációja az ellátási láncokba lehetővé teszi a hulladék csökkentését, valamint az erőforrások hatékonyabb felhasználását, ami gazdasági előnyökkel is jár. Az LCA módszertan segíti a termékek és szolgáltatások teljes életút környezeti hatásainak átfogó értékelését, különös tekintettel a nyersanyagok kitermelésétől egészen a

használat utáni ártalmatlanításig. Ezek az eszközök a logisztikai hálózatok fenntarthatósági szempontú újratervezésében is kiemelt szerepet játszanak, hozzájárulva az ellátási láncok környezeti hatásainak csökkentéséhez és a fenntarthatósági célok eléréséhez.

A tudományos publikációk elemzése rávilágított arra, hogy az ESG, az újrahasznosítás és az életciklus-szemlélet iránti érdeklődés az elmúlt évtizedben jelentős növekedést mutatott. Az ESG témakörben megjelent publikációk száma évente átlagosan 15%-kal növekedett, tükrözve a fenntarthatósági elvek vállalati stratégiákba való fokozott integrációját. Az újrahasznosítással kapcsolatos publikációk szintén folyamatos emelkedést mutattak, különösen a körforgásos gazdasági modellek népszerűségének köszönhetően. Az LCA publikációk stabil növekedése azt jelzi, hogy a fenntartható terméktervezési és logisztikai stratégiák tervezése során az életciklus-elemzés egyre meghatározóbb eszközzé vált. Az elemzések igazolják, hogy ezek a kutatási területek nemcsak a környezetvédelem szempontjából fontosak, hanem a gazdasági teljesítményt és a versenyképességet is növelik.

A fenntartható logisztikai hálózatok tervezésében az ESG keretrendszer, az újrahasznosítási folyamatok és az LCA módszertan integrációja egyaránt nélkülözhetetlen. Ezek az eszközök lehetővé teszik, hogy a vállalatok a fenntarthatósági célok elérése mellett gazdasági előnyökhöz is jussanak, például a költséghatékonyság és a fogyasztók bizalmának növelése révén. Az elemzett publikációk egyértelműen rámutattak arra, hogy a fenntarthatósági törekvések és a logisztikai innovációk egymást erősítő hatása révén hosszú távon mind az ipari, mind az akadémiai szféra jelentős eredményeket érhet el. Ez a szisztematikus áttekintés hozzájárulhat a logisztika fenntarthatósági kérdéseinek és kapcsolódásainak mélyebb megértéséhez és a további kutatások irányának kijelöléséhez.

3. ESG RIZIKÓFAKTOROKON ALAPULÓ MODELL MEGALKOTÁSA

Az ESG alapjaiban írja felül a hagyományos logisztikai hálózatok tervezési és működtetési elveit. Az értekezésemben rávilágítok arra, hogy az ESG keretrendszer alkalmazása nem csupán egy adminisztratív kötelezettség, hanem a logisztikai folyamatokat - különösen a recycling logisztika területén - egy teljesen új típusú, hálózatszerű működési modellbe kényszeríti. A recycling logisztika feladata a hulladékok gyűjtésének, szállításának, válogatásának és feldolgozásának olyan szintű megszervezése, amely garantálja az anyagok termelési körforgásba történő hatékony visszavezetését. Az ESG elvárások mentén a logisztikai lánc minden egyes elemét a teljes transzparencia és a precíz mérhetőség kell, hogy jellemezze, elmozdulva a lineáris folyamatoktól a komplex hálózati megoldások felé.

A recycling logisztika mint hálózatszerűen működő termelő-szolgáltató rendszer értelmezésekor figyelembe kell venni, hogy a gyűjtőpontok, az átrakóállomások, a válogatóművek és az újrahasznosító üzemek közötti kapcsolatok már nem tekinthetők statikusnak. Ezek a csomópontok dinamikus interakcióban állnak egymással, és az ESG szempontú működés alapfeltétele, hogy ezek a pontok ne csak fizikai, hanem informatikai értelemben is integráltak legyenek. Ez az integráció teszi lehetővé a valós idejű adatszolgáltatást, amely a környezeti (E) és az irányítási (G) pillérek szempontjából egyaránt elengedhetetlen, ennek megvalósításához a recycling logisztika egyik leghatékonyabb szerveződési formája a klaszter. A klaszterben részt vevő vállalatok közötti ipari szimbiózis lehetőséget ad a szinergiák maximális kihasználására, ahol az egyik szereplőnél keletkező hulladék vagy melléktermék a másik szereplő számára értékes nyersanyagként vagy energiaforrásként szolgál. Ez a fajta együttműködés közvetlenül és igazolhatóan javítja a klaszter minden tagjának ESG besorolását a körforgásos gazdasági mutatók javításán keresztül.

A hálózati modellezés során a tervezéséhez és irányításához olyan összetett matematikai modellek szükségesek, amelyek képesek kezelni a környezeti paramétereket és a vállalatirányítási szabályrendszereket egyaránt.

Az LP modellek segítségével határozható meg az optimális gyűjtési gyakoriság és a szükséges raktározási kapacitás, szem előtt tartva a logisztikai ökológiai lábnyom minimalizálását. A hálózatoptimalizációs modellek a csomópontok közötti anyagáramlás precíz meghatározását teszi lehetővé. Itt a cél

a szállítási távolságok és az üzemanyag-fogyasztás radikális csökkentése. Az életciklus-elemzési (LCA) modellek szerepe a recycling logisztikában a környezeti hatások teljes körű kiszámíthatósága. A "bölcstől a sírig" szemléletmód az LCA módszertanán keresztül válik alkalmazhatóvá, amely négy szigorú szakaszra oszlik: a cél- és hatókör-meghatározásra, a leltáranalízisre, a hatásbecslésre és az eredmények értelmezésére. Az LCA-modellek segítenek azonosítani azokat a pontokat a logisztikai láncban, ahol a környezeti terhelés a legmagasabb, lehetőséget adva a célzott beavatkozásra. A körforgásos gazdasági modellekkel való összefonódás révén a recycling már nem egy lineáris sor végpontja, hanem egy új ciklust elindító fázis. A transzparencia és a hitelesség zálogaként hasznos lehet a blokklánc (blockchain) alapú nyomon követési rendszereket alkalmazni, amelyek az adatok manipulálhatatlanságát garantálják a teljes ellátási láncban, ami az ESG "G" pillére szempontjából alapvető elvárás.

Ennek megfelelően az ESG szempontokból alkalmazható recycling logisztikai hálózat tehát nem pusztán egy technikai megoldás, hanem egy átfogó, stratégiai megközelítés, amelyben a klaszter-működés, a fejlett modellezési eszközök és a transzparencia kulcsfontosságú szerepet játszanak. Annak érdekében, hogy a rendszer képes legyen egyszerre a fenntarthatósági célokat hatékonyan integrálni a napi logisztikai műveletekbe, és valós, mérhető hozzájárulást is adni egy körforgásos és fenntartható működéshez, kiemelten fontos az a modell, amely egyszerre több célfüggvény alapján keresi a rendszer optimumát. Az ilyen típusú vizsgálatokat nevezik többcélú optimálásnak. Az ESG rendszereknél is jól alkalmazható. Adott rendszer működtetése, tervezése a megoldandó feladatból, a rendelkezésre álló lehetséges műszaki elemekből és megadott különféle kötöttségekből és kapcsolatokból áll össze. A vizsgált rendszer különböző paraméterekkel jellemezhető és különböző modellek feladatait egyszerre tudja ellátni. Ezek a modellek nem csupán a profit maximalizálására törekszenek, hanem olyan célfüggvényeket és korlátrendszereket alkalmaznak, amelyek figyelembe veszik az ESG, így például a környezetiparamétereket és korlátokat is. A paraméterek meghatározásakor az alábbi összefüggést rögzítem alapfeltételként:

$$p_{ia} \leq p_i \leq p_{if}; i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

ahol:

- i – a paraméter futóindex $i=1, 2, \dots, n$,
- P_{ia} – az i . paraméter alsó határértéke,
- P_{if} – az i . paraméter felső határértéke.

A paraméterekre vonatkozó előírásokat korlátfüggvényként kezelem.

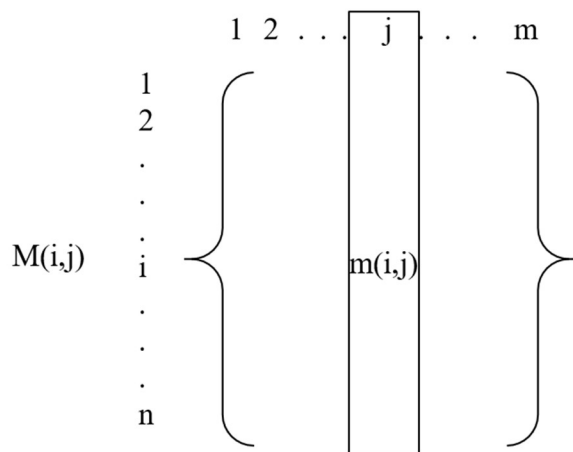
A fentiekén kívül szükséges meghatározni a különböző paraméterek közötti szabványokban, előírásokban megadott függőségi kapcsolatokat. Ezt a 2. képlet szerinti kapcsolati mátrix megadásával tudom figyelembe venni.

$$K_{(i,j)} = \{\text{érték } 1 \text{ vagy } 0\} \quad (2)$$

ahol:

- $K_{(i,j)}$ – a kapcsolati mátrix eleme az i és a j paraméter között;
- ha $K_{(i,j)} = 1$ akkor van kapcsolat
- ha $K_{(i,j)} = 0$ akkor nincs kapcsolat
- $i = 1, 2, \dots, n$ és
- $j = 1, 2, \dots, m$

A kapcsolati mátrixok szabta korlátozások tovább szűkítik a megoldás folyamán a teljes permutációból lehetséges megoldásváltozatokat. A megmaradó megoldásváltozatok közül célfüggvények alkalmazásával keresem az optimálisat. A célfüggvények a megoldásváltozatok paramétereire vonatkoznak. A lehetséges megoldásváltozatokat az M megoldásmátrix foglalja össze. Ezt mutatja a 1. ábra.



1. ábra Az M megoldásmátrix felépítése (Saját szerkesztés)

Az 1. ábrán szereplő M mátrix mutatja, hogy egy lehetséges j . megoldás ($j = 1, 2, \dots, m$) milyen paraméterekkel ($i = 1, 2, \dots, n$) rendelkezik. Paraméterként meghatározható a paraméter optimális értéke a lehetséges megoldások közül. Ez a matematikai kényszer biztosítja, hogy a logisztikai hálózat működése soha ne lépje át a környezetvédelmi vagy technológiai fenntarthatóság kereteit.

Az ESG rendszer modellje egy olyan integrált és holisztikus keretrendszerként kerül meghatározásra, amely képes szintetizálni a környezeti hatásokat, a társadalmi felelősségvállalást és a vállalatirányítási mechanizmusokat. A modellalkotás alapvető célja, hogy a logisztikai folyamatok ne csupán izolált műveletek sorozataként jelenjenek meg, hanem egy olyan átfogó stratégia részeként, amely biztosítja a vállalat hosszú távú fenntarthatóságát és megfelelőségét a modern gazdasági elvárásoknak. Az ESG modellben a pillérek közötti kölcsönhatások vizsgálata kiemelt jelentőségű, hiszen egy-egy környezeti beavatkozás közvetlen hatással van a társadalmi megítélésre és a vállalatirányítási átláthatóságra is.

A környezeti (E) pillér elemeinek részletes bontása során megállapítást nyert, hogy a recycling logisztika kontextusában a legmeghatározóbb tényezők a szén-dioxid-kibocsátás, a fajlagos energiafelhasználás, a vízlábnyom, valamint a keletkező hulladék mennyisége és annak újrahasznosítási aránya. Ezek az elemek nem csupán statisztikai adatok, hanem olyan dinamikus változók, amelyek a logisztikai hálózat minden pontján jelen vannak. A környezeti pillér modellezése során figyelembe kell venni a nyersanyagok kitermelésétől a gyártáson át a hulladékká válásig tartó folyamatokat. Az ESG modell ezen szakasza hangsúlyozza, hogy a környezeti hatások mérése és csökkentése csak akkor lehet sikeres, ha a logisztikai hálózat minden szereplője (beszállítók, szállítók, feldolgozók) azonos módszertan alkalmaznak és lehetőség szerint működésüket is összehangolják, amelyre alkalmas a klaszteralapú működés.

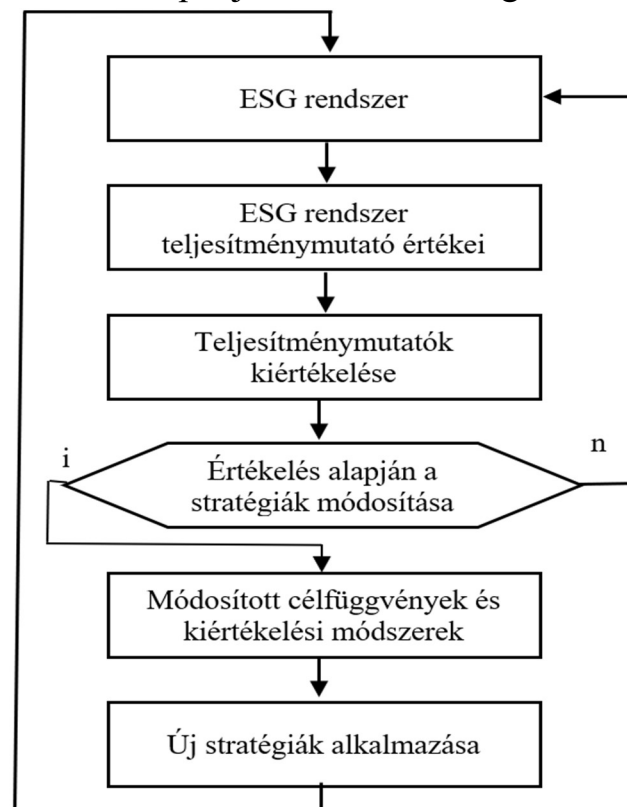
A társadalmi (S) pillér elemei a logisztikai rendszerekben a humán erőforrás és a társadalmi környezet védelmére irányulnak. Ide tartoznak a munkavédelmi mutatók, a munkahelyi egészségvédelem, a dolgozói elégedettség, valamint a lokális integráció. A recycling logisztika esetében a társadalmi hatás kiterjed a gyűjtőhálózatok mentén élő lakosság életminőségére is. A modell rögzíti, hogy a fenntartható logisztika nem csupán az emisszió csökkentéséről szól, hanem a biztonságos és etikus munkakörülmények megteremtéséről is a válogatóművekben és a szállítási folyamatok során. Az ESG szemléletben a társadalmi pillér erősítése növeli a vállalat iránti bizalmat, ami közvetett módon javítja a logisztikai rendszer hatékonyságát.

Az irányítási (G) pillér a rendszer szabályozottságát, az etikus üzleti magatartást és a transzparens adatszolgáltatást foglalja magában. Ebben a körben a modell meghatározza a felelősségi rendszereket, a kockázatkezelési protokollokat és a jelentéstételi csatornákat. A recycling logisztikában az

irányítási pillér biztosítja, hogy a környezeti és társadalmi célkitűzések ne csak deklaratív szinten létezzenek, hanem beépüljenek a napi operatív folyamatokba. Az átlátható vállalatirányítás teszi lehetővé a befektetők és a szabályozó hatóságok számára, hogy hiteles képet kapjanak a logisztikai hálózat fenntarthatósági teljesítményéről. A modell szempontjából az adatok integritása és a hamisítás elleni védelem (például blokklánc technológiával) az irányítási pillér alapkövét képezi.

A pillérek közötti szinergiák erősítik egymást, például a logisztikai útvonaltervezés optimalizálása (E pillér) közvetlenül csökkenti a gépjárművezetők munkaidejét és fáradtságát (S pillér), miközben az ehhez kapcsolódó digitális menetlevelek biztosítják a tevékenység ellenőrizhetőségét (G pillér). A modell tehát nem statikus elemek halmaza, hanem egy önszabályozó rendszer, amelyben a kimeneti adatok (outputok) visszacsatolásként szolgálnak a rendszer folyamatos fejlesztéséhez.

A működtetés során az ESG rendszer kétirányú ciklikus kapcsolatban működik (2. ábra): az értékelési és visszacsatolási folyamatok hatással vannak a stratégiai és operatív döntéshozatalra, míg ezek a döntések új ESG célokat, intézkedéseket és teljesítménymutatókat generálnak. Ez a tanuló jellegű dinamika teszi lehetővé, hogy a vállalatok folyamatosan reagáljanak a külső és belső környezet változásaira, és adaptálják fenntarthatósági törekvéseiket.



2. ábra Az ESG rendszer kétirányú ciklikus kapcsolatának folyamatábrája (saját szerkesztés)

Az ESG rendszer modellje csak akkor töltheti be funkcióját, ha a modellelemek közötti adatátvitel automatizált, szabványosított és valós idejű, lehetővé téve a proaktív beavatkozást a logisztikai hálózat működésébe.

A fenntartható logisztika alapfeltétele a fizikai anyagáramlás és a hozzá kapcsolódó információáramlás tökéletes szinkronizációja, amely lehetővé teszi a transzparenciát és a folyamatos optimalizálást. Az anyagáramlás a recycling folyamatok során a hulladék keletkezési helyétől (például lakossági vagy ipari kibocsátók) indulva, a gyűjtőhálózaton, az átrakóhelyeken és a válogatóműveken keresztül egészen a végfelhasználóig vagy a másodlagos nyersanyag-feldolgozóig tart. Az információáramlás ezzel párhuzamosan biztosítja ezen fizikai mozgások nyomon követhetőségét, a minőségi paraméterek rögzítését és a környezeti lábnyom kiszámításához szükséges adatok rögzítését.

A kutatásomban részletesen kifejtem, hogy az információáramlás során alkalmazott technológiák – mint a szenzorhálózatok, az intelligens konténerek és az IoT (Internet of Things) megoldások – közvetlenül támogatják a környezeti (E) pillér célkitűzéseit. A valós idejű telítettség-adatok például lehetővé teszik a gyűjtőjárművek útvonalainak dinamikus újratervezését, ami csökkenti a feleslegesen megtett kilométerek számát és az ezzel járó károsanyag-kibocsátást. Az adatok nemcsak horizontálisan (a logisztikai lánc szereplői között), hanem vertikálisan is áramlanak: a telephelyi szinten rögzített mérlegelési adatok és minőségi tanúsítványok aggregálódnak és a klaszter virtuális logisztikai központban kerülnek feldolgozásra. Az irányítási (G) szempontok érvényesítése érdekében az információáramlásnak manipulálhatatlannak és visszakereshetőnek kell lennie. A blokklánc technológia szerepe kiemelt, mivel ez rögzíti digitális főkönyvként az anyagáramlás minden egyes mozzanatát. Ezzel megakadályozható a "zöldmosás" (greenwashing), mivel minden egyes újrahasznosított tonna anyagnak igazolható életútja van a keletkezéstől a feldolgozásig. A társadalmi (S) pillér kapcsán az információáramlás a transzparenciát szolgálja a lakosság és a hatóságok felé, növelve a rendszerszintű bizalmat.

A jól szervezett adat- és anyagáramlás nemcsak a környezeti hatások csökkentését segíti elő, hanem lehetővé teszi a társadalmi és vezetési célkitűzések hatékony megvalósítását is. Az ESG rendszerek sikeressége azon múlik, hogy a vállalat képes-e ezeket az áramlásokat átláthatóan, megbízhatóan és integrált módon kezelni. A recycling logisztikai rendszereknél egy klaszter alapú kialakítás jó lehetőséget biztosít az ESG alapú működtetésre.

A modell kidolgozása során az alapvető kritérium, hogy a fenntartható logisztikai irányítás nem valósítható meg egyetlen dimenzió mentén; szükség van egy olyan többszemponútú matematikai keretrendszerre, amely képes egyensúlyt teremteni a gazdasági racionalitás, a környezeti integritás és a társadalmi felelősségvállalás között. Az ESG és a recycling logisztikai rendszerek összefüggéseinek formalizálása során a modell első lépésben a releváns döntési paraméterek és változók azonosítását végzi el, majd ezeket rendeli hozzá a rendszerszintű célkitűzésekhez.

A matematikai modell magját a célfüggvények rendszere alkotja, amely az ESG szemléletnek megfelelően kettős orientációjú. Az elsődleges feladat a rendszer hatékonyságát gátló tényezők minimalizálása. Ezt a törekvést a minimalizáló célfüggvény meghatározásával biztosítom:

$$M_{opt(i)} = \min_j \{M(i,j)\} \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

ha az i. paraméter minimalizáló.

Ezzel párhuzamosan a modellnek biztosítania kell a pozitív hozadékok, mint például az újrahasznosítási arányok, a másodlagos nyersanyagok minőségének és a társadalmi hasznosságnak a növelését. Ezt a törekvést a maximalizáló célfüggvény biztosítja:

$$M_{opt(i)} = \max_j \{M(i,j)\} \quad (4)$$

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

ha az i. paraméter maximalizáló.

Mivel kétféle célfüggvényt kezelnek a rendszerben, a megoldás érdekében a normalizált célfüggvényt az alábbiak szerint számolom:

$$\left\{ C(i,j) \left\{ 1 - \frac{M_{opt(i)}}{M(i,j)} \right\}; \text{ ha minimalizáló az } i. \text{ paraméter} \right\} \quad (5)$$

$$\left\{ C(i,j) \left\{ 1 - \frac{M(i,j)}{M_{opt(i)}} \right\}; \text{ ha maximalizáló az } i. \text{ paraméter} \right\} \quad (6)$$

A C mátrixban lévő normalizált célfüggvényértékek minimalizálásával kereshető az optimális megoldás. Amennyiben maximalizálásra vezetem vissza a feladatot, akkor az alábbiak szerint számolom:

$$\left\{ D(i,j) \left\{ 1 - \frac{M_{opt}(i)}{M(i,j)} \right\}; \text{ ha minimalizáló az } i. \text{ paraméter} \right\} \quad (7)$$

$$\left\{ D(i,j) \left\{ 1 - \frac{M(i,j)}{M_{opt}(i)} \right\}; \text{ ha maximalizáló az } i. \text{ paraméter} \right\} \quad (8)$$

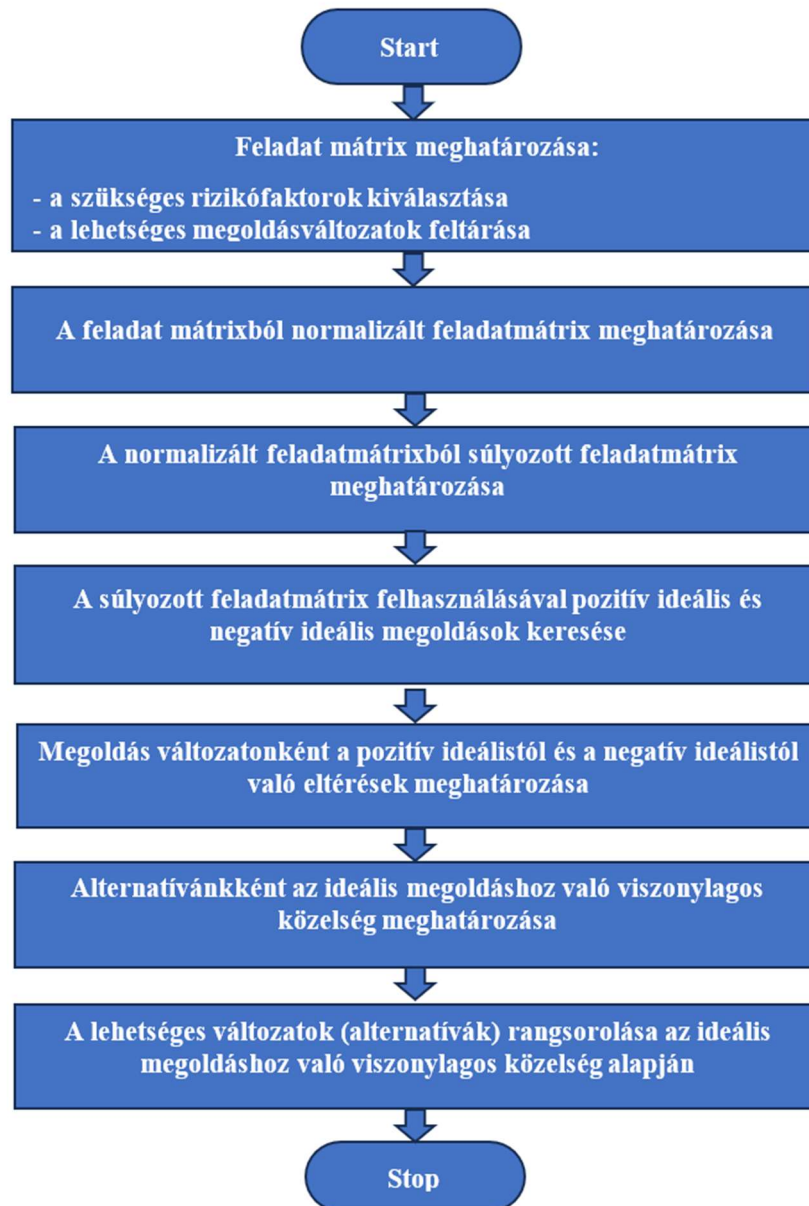
A C(i,j) és D(i,j) eredménymátrixok alapján többféle megoldáskeresés lehetséges:

- normalizált célfüggvények súlyozott összege legyen maximális vagy minimális,
- lépcsőzetes optimálás,
- játékelmélet.

Az ESG-alapú logisztikai modell nem tekinthető statikusnak; számolnia kell a bizonytalansági tényezőkkel, legyen szó piaci áringadozásról vagy környezetvédelmi válsághelyzetekről. A kockázatkezelési modell három kritikus dimenziót vizsgál: az adott kedvezőtlen esemény előfordulásának valószínűségét, a hálózatra gyakorolt hatás mértékét, valamint a meglévő ellenőrzési és beavatkozási mechanizmusok hatékonyságát. Ezen tényezők integrálása lehetővé teszi a logisztikai hálózat rezilienciájának (ellenálló képességének) növelését.

A döntési mechanizmus finomhangolása érdekében, amikor több, egymással gyakran versengő logisztikai alternatíva közül kell kiválasztani a legmegfelelőbbet, a TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) módszert alkalmazom. Ez a többkritériumos döntéstámogató eljárás az ideális megoldáshoz való hasonlóság, közelség elvén alapul, és képes kezelni a recycling logisztika heterogén paramétereit.

A végső rangsor a relatív közelségen alapul, ami jól alkalmazható az ESG kontextusban a kockázatok azonosítására és kezelésére. A 3. ábra vizuálisan bemutatja az eljárás lépéseit, elősegítve a folyamat megértését és gyakorlati alkalmazását.



3.ábra Kockázatkezelési eljárás (saját szerkesztés)

A TOPSIS módszer alkalmazásának részletes matematikai menete a Feladatmátrix (F) felállításával kezdődik, ahol az alternatívák teljesítményét rögzítik az ESG kritériumokhoz viszonyítva.

$$F(i,j) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & j & \dots & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ m \end{matrix} & \left\{ \begin{matrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & f(i,j) & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{matrix} \right\} \end{matrix}$$

4. ábra Feladatmátrix (F) felépítése (saját szerkesztés)

ahol

$i = 1, 2, \dots, m$ jelöli a lehetséges megoldás változatokat (alternatívákat),
 $j = 1, 2, \dots, n$ jelöli a rizikófaktorok értékeit az adott alternatívánál.

Ezt követi a normalizálás és a súlyozás, amelyek biztosítják az összehasonlíthatóságot és a prioritások érvényesítését.

$$G(i,j) = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & \dots & j & \dots & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ m \end{matrix} & \left\{ \begin{matrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & g(i,j) & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{matrix} \right\} \end{matrix}$$

5. ábra Normalizált feladatmátrix (G) (saját szerkesztés)

ahol

$i = 1, 2, \dots, m$ jelöli a lehetséges megoldás változatokat (alternatívákat),
 $j = 1, 2, \dots, n$ jelöli a rizikófaktorok értékeit az adott alternatívánál.

Az összefüggés F és G elemei között:

$$q_{(i,j)} = \frac{f_{(i,j)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^j f_{(i,j)}^2}} \quad (9)$$

ahol

$$i = 1, 2, \dots, m \text{ és } j = 1, 2, \dots, n$$

A következő lépésben súlyozom ezeket a normalizált értékeket, érvényesítve a vállalati stratégia vagy a szabályozói környezet prioritásait A súlyozott, normalizált feladatmátrix (H) meghatározásánál figyelembe kell venni a súlyozási tényezőket. Ezek a súlyozási tényezők a rizikó faktorokra vonatkoznak.

Ezeket tartalmazza a h(j) vektor.

$$h(j) \text{ ahol } j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n h(j) = 1 \quad (11)$$

és

$$0 < h(j) < 1 \quad (12)$$

A normalizált feladatmátrix minden egyes oszlopának megszorozása a hozzátartozó súlyozási tényezővel adja meg a súlyozott, normalizált feladatmátrixot.

$$H(i,j) = h_j \times G(i, j) \quad (13)$$

ahol

$$i = 1, 2, \dots, m \text{ és}$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Ezt követően meghatározom a két szélsőséges referenciapontot: a pozitív ideális megoldást, amely minden kritérium mentén a legjobb elméleti értékeket tartalmazza, és a negatív ideális megoldást, amely a legrosszabbakat gyűjti össze, ehhez a H(i,j), ahol $i = 1, 2, \dots, m$ és $j = 1, 2, \dots, n$ mátrixot használom fel. A pozitív ideális megoldásokat $M^+(j)$ vektor tartalmazza, ahol

$$M^+(j) = \max H(i,j), \text{ ha } j \in J \quad (14)$$

és a negatív ideális megoldásokat tartalmazza, ahol

$$M^-(j) = \min H(i,j), \text{ ha } j \in J' \quad (15)$$

ahol J és J' a haszon és a veszteség jellemzők halmaza.

A rangsor felállítása előtt ki kell számítani minden vizsgált logisztikai alternatíva távolságát ezektől az ideális pontoktól. A pozitív és negatív ideális megoldásoktól való eltérést az alábbi távolságfüggvények mérik

A számításoknál a $H(i,j)$ súlyozott normalizált feladatmátrixot és a pozitív ideális (M^+), valamint a negatív ideális megoldásokat (M^-) tartalmazó vektorokat használom fel.

A pozitív eltéréseket az

$$S(i)^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m [H(i,j) - M^+(j)]^2} \quad (16)$$

ahol $i = 1, 2, \dots, m$ alapján határozom meg.

A negatív eltéréseket az

$$S(i)^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [H(i,j) - M^-(j)]^2} \quad (17)$$

ahol $i = 1, 2, \dots, m$ alapján határozom meg.

A döntési folyamat zárásaként meghatározom az egyes alternatívák relatív közelségét az ideális állapothoz. Ez az érték szolgál a végső rangsor alapjául:

Ezt az értéket a

$$C(i) = \frac{S^-(i)}{S^+(i) - S^-(i)} \quad (18)$$

ahol

$$(i = 1, 2, \dots, m)$$

alapján határozom meg, ahol:

$$0 \leq c_i \leq 1, \text{ ahol } (i = 1, 2, \dots, m) \quad (19)$$

Ez az érték mutatja az i . alternatíva viszonylagos közelségét a pozitív ideális megoldás tekintetében.

A $C(i)$ értékek alapján felállítható egy sorrend a lehetséges alternatívák között.

A kidolgozott módszertan alkalmas arra, hogy a recycling logisztikai folyamatokat az ESG keretrendszer szigorú követelményeihez igazítsam, biztosítva a megalapozott döntéshozatalt.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK ÉS TÉZISEK ISMERTETÉSE

I. Tézis: Feltártam és meghatároztam az ESG keretrendszerek alkalmazásának szükségességét, valamint a recycling logisztika meghatározó szerepét ezen rendszerekben. Meghatároztam az ESG recycling logisztikai rendszerének komplexitását, valamint megadtam a lehetséges optimalizációs paramétereket és a lehetséges módszereket. [S1] [S3] [S8]

Kutatómunkám során abból a felismerésből indultam ki, hogy a modern gazdasági környezetben a fenntarthatóság már nem csupán etikai elvárás, hanem a hosszú távú versenyképesség alapfeltétele. Részletesen megvizsgáltam az ESG keretrendszerek térnyerését, és elemeztem, miként kényszeríti ez a vállalatokat környezeti, társadalmi, valamint irányítási tényezőiknek számszerűsítésére és ez hogyan befolyásolja a tevékenységüket. E folyamatban figyelembe vettem a recycling logisztika kritikus szerepét, és feltártam, hogy az anyagkörforgás zárása közvetlenül meghatározza a vállalatok eredményességét. Megállapítottam, hogy az ESG integrálása az recycling logisztikai folyamatokba kényszer, amely alapjaiban határozza meg a vállalat hatékonyságát és piaci megítélését.

A tézis megalkotásakor alaposan elemeztem a rendszer komplexitását, amely a recycling logisztika és az újrahasznosítási technológiák, az ESG kötelezettségek és lehetőségek összehangolásából adódik. Megvizsgáltam a releváns matematikai és hálózati modellezési eljárásokat, amelyek segítségével rögzítettem a lehetséges optimalizációs paramétereket és a lehetséges módszertanokat. Ezzel olyan tudományos alapot hoztam létre, amely lehetővé teszi a recycling logisztikai folyamatok ESG szempontú, egzakt módon történő irányítását és optimalizálását.

II. Tézis: Meghatároztam az ESG rendszerek által a logisztikával kapcsolatban támasztott követelményeket. Megalkottam az ESG keretrendszerek működéséhez szükséges új típusú recycling logisztikai rendszer modelljét. Lehatároltam a modell elemeit, funkcióit, és kapcsolatrendszerét. [S4] [S5] [S6] [S7]

Kutatómunkám során átfogóan megvizsgáltam és rendszereztem a hazai és nemzetközi szakirodalmat, hogy feltárjam az ESG szempontok és a logisztikai folyamatok közötti szinergiákat. Ezzel párhuzamosan részletesen elemeztem a hazai és nemzetközi jogszabályi hátteret, amelyek pontosan rögzítik a vállalatok

fenntarthatósági kötelezettségeit és jelentéstételi kényszereit. Ezen elméleti és jogi alapokra támaszkodva meghatároztam azokat a követelményeket, amelyeket az ESG rendszerek támasztanak a logisztikai, kiemelten a recycling logisztikai szektorral szemben, rávilágítva arra, hogy a hagyományos ellátási láncoknak milyen transzformációs folyamatokon kell keresztülmenniük a megfelelőség érdekében. A feltárt követelményrendszerre építve, megalkottam egy új típusú recycling logisztikai rendszer modelljét, amely már szervesen integrálja az ESG-szemléletet. A modellalkotás során tudatosan lehatároltam a rendszer elemeit, funkcióit és a köztük lévő komplex kapcsolatrendszert, biztosítva ezzel a folyamatok átláthatóságát és mérhetőségét.

Összességében megállapítottam, hogy a kidolgozott modellek nélkülözhetetlen eszközei az ESG-nek megfelelő recycling logisztikai rendszer tervezésének és értékelésének. Segítségükkel a vállalatok nem csupán a jogszabályi előírásoknak és a szigorodó piaci elvárásoknak felelnek meg, hanem proaktívan hozzájárulnak a fenntartható fejlődéshez azáltal, hogy csökkentik negatív ESG hatásaikat és optimalizálják erőforrásfelhasználásukat a termékek teljes életciklusa során. Az ESG alapú gondolkodás így az operatív hatékonyság, a társadalmi felelősségvállalás és az etikus vállalatirányítás integrációján keresztül olyan stratégiai eszközzé válik, amellyel a logisztikai szereplők tartós versenyelőnyt és hosszú távú fenntarthatóságot érhetnek el.

III. Tézis: Feltártam az ESG rendszerek elemei közötti anyag- és információáramlást, és megalkottam az ESG keretrendszerekhez kapcsolódó logisztikai modellt. Kidolgoztam a lehetséges működtetési stratégiákat, és a vizsgálatokhoz meghatároztam az alkalmazható célfüggvényeket. [S8] [S9]

Kutatómunkám során részletesen feltártam és modelleztem az ESG rendszerek elemei között zajló komplex anyag- és információáramlási folyamatokat, amelynek eredményeként megalkottam az ESG keretrendszerekhez kapcsolódó logisztikai modellt. A vizsgálat során figyelembe vettem, hogy az ilyen rendszerek értékelése a környezeti, társadalmi és irányítási tényezők szoros összefüggései miatt kizárólag komplex, többkritériumos módszerekkel végezhető el hatékonyan. Ennek szellemében kidolgoztam a lehetséges működtetési stratégiákat, amelyek közül kiemelt figyelmet fordítottam a klaszter alapú működtetésre, mint optimális megoldásra. Megállapítottam, hogy a szereplők hálózatos együttműködése nemcsak az erőforrásfelhasználást optimalizálja,

hanem a kockázati tényezők sokrétű jellege miatt elengedhetetlen strukturált azonosítást és kezelést is hatékonyabbá teszi.

A stratégiai szintű döntések alátámasztására meghatároztam az alkalmazható célfüggvényeket, és vizsgáltam a TOPSIS módszer alkalmazhatóságát, amely alkalmas eszköznek bizonyult a lehetséges megoldási alternatívák összehasonlítására. A módszer segítségével meghatározhatóvá válik a kockázati változók hatása. A megbízhatóság további növelése érdekében elemeztem a mesterséges intelligencia integrálásának lehetőségeit a szubjektív kockázatazonosítás folyamatába. Ez az összetett megközelítés támogatja a fenntarthatósági célok elérését, és rugalmasan alkalmazkodik a különböző szervezeti vagy ipari kontextusokhoz, növelve ezzel az általam kidolgozott modell gyakorlati relevanciáját és tudományos megalapozottságát.

A vizsgálatom során figyelembe vettem az anyag- és információáramlási sajátosságokat és a szabályozói környezet által előírt kötelezettségeket is, így a modell nemcsak elméleti síkon, hanem a gyakorlati alkalmazás tükrében is megállja a helyét.

IV. Tézis: A kapott megoldásokra vonatkozóan kidolgoztam egy rizikófaktorokon alapuló újfajta meghatározását az eredményeknek. [S9]

A kutatás során felismertem, hogy a logisztikai rendszerek teljesítményét nem lehet kizárólag statikus mutatókkal mérni, ezért kidolgoztam egy rizikófaktorokon alapuló újfajta megközelítést az eredmények értékelésére. Megvizsgáltam, hogy a környezeti, piaci és operatív bizonytalanságok miként módosítják a hagyományos hatékonysági mutatókat, és figyelembe vettem ezen kockázatok hatását az ESG megfelelésre is. Eredményeim egyértelműen alátámasztják a szimulációs modellek és a fejlett döntéstámogató rendszerek alkalmazásának szükségességét, mivel ezek képesek kezelni a dinamikusan változó logisztikai környezet kihívásait.

A jelen kutatásommal érdemben hozzájárulok az ESG orientált recycling logisztikai rendszerek elméleti fejlődéséhez és gyakorlati megvalósításához egyaránt. Ugyanakkor rögzítettem, hogy a jövőbeli kutatásoknak magukban kell foglalniuk a kidolgozott módszertan tesztelését konkrét ipari eseteken keresztül. Az általam javasolt módszerrel az eredményeket nem csupán abszolút értékükben, hanem a hozzájuk kapcsolódó kockázati kitettség tükrében értelmeztem, így egy megbízhatóbb, a gyakorlati bizonytalanságokat is kezelni képes értékelési rendszert hoztam létre.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A disszertáció bevezetőjében ismertettem a téma aktualitását, a témában rejlő nehézségeket és a tudományos kihívásokat, hangsúlyozva, hogy az ellátási láncok, a kockázatok azonosíthatósága és a digitalizáció összekapcsolódása mára a fenntartható gazdasági működés kulcsfontosságú tényezőjévé vált. Feltártam, hogy a szakirodalomban is megfigyelhető az ESG alapú logisztikai rendszerek, valamint a körforgásos gazdaság és az újrahasznosítási logisztika témakörének dinamikus felfutása, amely új szemléletmódot igényel a kutatóktól és a gyakorlati szakemberektől egyaránt. A recycling logisztika, mint a logisztikai folyamatok rendszere, a fenntarthatósági célok egyik legfontosabb eleme, hiszen a nem megfelelő működés jelentős gazdasági és környezeti veszteségekhez vezethet, amelyek az egész értékteremtő lánc hatékonyságát befolyásolják.

A dolgozat első részeiben bemutattam a témához illeszkedő nemzetközi szakirodalmat, kiemelve, hogy a 2020-as évek elejétől az Európai Unió fenntarthatósági politikái miként ösztönözték az akadémiai kutatásokat. Ismertettem azon tudományos módszertanokat, amelyek segítségével alátámasztottam téziseimet, rávilágítva arra, hogy a hagyományos, lineáris logisztikai rendszereknek fokozatosan át kell alakulniuk a körforgásos gazdaság alapelveit támogató, zárt láncú struktúrákká. Kifejtettem, hogy a logisztikai döntéshozatal napjainkban egyre inkább többdimenziós keretben történik, amelyben a gazdasági racionalitás mellett az ESG elvek meghatározó szerepet kapnak.

Részletesen elemeztem a jogi és szabályozási környezet változásait, különös tekintettel a hazai és az uniós irányelvekre. Megállapítottam, hogy ezek az előírások alapvetően átalakítják a vállalatok működését, mivel megkövetelik, hogy a szervezetek ne csupán pénzügyi, hanem környezeti és társadalmi szempontból is számot adjanak az ellátási láncuk teljesítményéről. Megállapítottam, hogy a megfelelés rövid távon többletterhet jelent, hosszú távon a vállalatok reputációjának erősödését és versenyképességük növekedését eredményezi. Ehhez azonban elengedhetetlen a döntéshozatali folyamatok precíz kidolgozása, valamint az adatvezérelt kockázatelemzés alkalmazása, amely képessé teszi a vállalatokat a fenntarthatósági elvárások teljesítésére a dinamikus változó piaci környezetben.

A disszertációban alkalmazott tudományos módszertan kapcsán rávilágítottam, hogy egyre nagyobb hangsúly helyeződik a kockázati tényezők strukturált azonosítására és értékelésére, különösen az ESG keretrendszerek

kontextusában. Kutatásom szerint a kockázatok összetett jellege miatt az értékelés csak többkritériumos módszertanokkal végezhető hatékonyan. Ennek megfelelően vizsgálataim során az optimális eredmény kereséséhez a leghatékonyabbnak a TOPSIS módszert találtam. Ez a módszer lehetővé teszi az alternatív megoldások összehasonlítását és az optimális döntések kiválasztását az egyes kockázati tényezők számszerűsített hatásai alapján. Az alkalmazott módszer emellett alkalmas a különböző ipari és szervezeti környezetekhez való adaptálásra, ami növeli gyakorlati relevanciáját. Kitértem a digitalizációs fejlesztések szerepére is, bemutattva, hogy a mesterséges intelligencia, a blockchain és az IoT-alapú adatgyűjtés miként teszi a recycling folyamatokat átláthatóvá és mérhetővé. Ezek nemcsak a hatékonyságot növelik, hanem közvetlenül támogatják a jogszabályi megfelelést, lehetővé téve a fenntarthatósági kockázatokra való valós idejű reakciót a logisztikai hálózatokban.

Megállapítottam, hogy a vállalati gyakorlatban az ESG kritériumokhoz való alkalmazkodás egyre inkább stratégiai kérdéssé válik. A megfelelés nem pusztán kötelezettség, hanem versenytényező is. A jogszabályi előírások folyamatos szigorodása mellett a befektetői és fogyasztói elvárások is fokozzák az ESG szempontok beépítésének szükségességét. A vállalatok számára tehát a digitalizált, ESG kompatibilis recycling logisztikai rendszerek nem csupán a jogszabályi megfelelés eszközei, hanem az innováció, a hatékonyság és a versenyképesség fenntartásának kulcselemei. A jövő gazdasági modellje így egyértelműen a fenntarthatósági és technológiai fejlődés metszéspontjában rajzolódik ki.

A disszertációban megfogalmazott tézisek rendszerszemléletű és innovatív választ adnak a recycling logisztika területén felmerülő problémákra. Kutatásomban feltártam és lehatároltam az ESG keretrendszerek működéséhez szükséges új típusú recycling logisztikai rendszer feladatkörét, valamint az alkalmazható modelleket. Meghatároztam a rendszer tevékenységi területeit, és ezek alapján megalkottam egy olyan értékelési módszert, amely képes a fenntarthatósági és gazdasági szempontokat egyidejűleg kezelni.

Az általam kidolgozott modell integrálja az ESG szempontokat a recycling logisztikai folyamatok egészébe. Ez lehetővé teszi, hogy az újrahasznosítási és visszagyűjtési folyamatok a körforgásos gazdaság alapelvei mentén, mérhető ugyanakkor szabályozott módon működjenek, hozzájárulva az elméleti fejlődéshez és a jövő értékteremtő láncainak felelős kialakításához.

6. NEW SCIENTIFIC RESULT

I. Thesis: I identified and determined need to apply the ESG frameworks and the key role of recycling logistics in these systems. I defined the complexity of the ESG recycling logistics system and specified the possible optimization parameters and methods. [S1] [S3] [S8]

My research was based on the recognition that, in the modern economic environment, sustainability is no longer just an ethical expectation, but a basic prerequisite for long-term competitiveness. I examined in detail the rise of ESG frameworks and analyzed how this forces companies to quantify their environmental, social, and governance factors and how this affects their activities. In this process, I took into account the critical role of recycling logistics and revealed that closing the material cycle directly determines the effectiveness of companies. I concluded that the integration of ESG into recycling logistics processes is a necessity that fundamentally determines a company's efficiency and market reputation.

In writing my thesis, I thoroughly analyzed the complexity of the system, which arises from the coordination of recycling logistics and recycling technologies, ESG obligations, and opportunities. I examined the relevant mathematical and network modeling procedures, which I used to identify possible optimization parameters and methodologies. In doing so, I created a scientific basis that enables the precise management and optimization of recycling logistics processes from an ESG perspective.

II. Thesis: I defined the logistics requirements imposed by ESG systems. I created the model for a new type of recycling logistics system necessary for the operation of ESG frameworks. I defined the elements, functions, and relationships of the model. [S4] [S5] [S6] [S7]

During my research, I comprehensively examined and systematized domestic and international literature to explore the synergies between ESG aspects and logistics processes. At the same time, I analyzed the domestic and international legal background in detail, as these strictly define corporate sustainability responsibilities and reporting requirements. Based on these theoretical and legal foundations, I defined the requirements that ESG systems place on the logistics sector, with a particular focus on recycling logistics, highlighting the transformation processes that traditional supply chains must undergo in order to achieve compliance. Building on the identified requirements,

I created a model for a new type of recycling logistics system that already integrates the ESG approach. When creating the model, I consciously defined the elements and functions of the system and the complex network of relationships between them, thus ensuring the transparency and measurability of the processes.

Overall, I have concluded that the models developed are indispensable tools for designing and evaluating ESG-compliant recycling logistics systems. With their help, companies not only comply with legal requirements and increasingly stringent market expectations, but also proactively contribute to sustainable development by reducing their negative ESG impacts and optimizing their resource use throughout the entire product life cycle. ESG-based thinking thus becomes a strategic tool through the integration of operational efficiency, social responsibility, and ethical corporate governance, enabling logistics players to achieve a lasting competitive advantage and long-term sustainability.

III. Thesis: I explored the flow of materials and information between the elements of ESG systems and created the logistics model related to ESG frameworks. I developed for the logistics model related to the ESG frameworks possible operational strategies. I created and defined the objective functions applicable to the analyses. [S8] [S9]

During my research, I explored and modeled in detail the complex material and information flow processes occurring between the elements of ESG systems, which resulted in the creation of a logistics model related to ESG frameworks. During the study, I took into account that, due to the close interrelationships between environmental, social, and governance factors, the evaluation of such systems can only be carried out effectively using complex, multi-criteria methods. In this spirit, I developed possible operating strategies, paying particular attention to cluster-based operation as the optimal solution. I found that network based cooperation stakeholders not only optimizes resource utilization, but also improves the effectiveness of structured risk identification and management, both of which are essential given the complex nature of the risks.

To support strategic-level decisions, I defined the applicable objective functions and examined the applicability of the TOPSIS method, which proved to be a suitable tool for comparing possible solution alternatives. This method makes it possible to determine the impact of risk variables. To further increase reliability, I analyzed the possibilities of integrating artificial intelligence into the subjective risk identification process. This complex approach supports the achievement of

sustainability goals and adapts flexibly to different organizational or industrial contexts, thereby increasing the practical relevance and scientific validity of the model I developed.

In my research, I also took into account the specific characteristics of material and information flows and the obligations imposed by the regulatory environment, so the model is valid not only on a theoretical level but also in terms of practical application.

IV. Thesis: Based on the solutions obtained, I developed a new method for determining results based on the risk factors. [S9]

During my research, I realized that the performance of logistics systems cannot be measured solely by static indicators, so I developed a new approach to evaluating results based on risk factors. I examined how environmental, market, and operational uncertainties modify traditional efficiency indicators, and I also considered the impact of these risks on ESG compliance. My results clearly support the need for simulation models and advanced decision support systems, as they are capable of handling the challenges of a dynamically changing logistics environment.

My current research contributes significantly to both the theoretical development and practical implementation of ESG-oriented recycling logistics systems. At the same time, I have noted that future research should include testing the developed methodology through specific industrial cases. With the method I proposed, I interpreted the results not only in terms of their absolute values, but also in terms of the associated risk exposure, thus creating a more reliable evaluation system that can also handle practical uncertainties.

7. SUMMARY

In the introduction to my dissertation, I discussed the relevance of the topic, the difficulties inherent in it, and the scientific challenges, emphasizing that the interconnection of supply chains, risk identification, and digitalization has become a key factor in sustainable economic operation. I revealed that the dynamic rise of ESG-based logistics systems, the circular economy, and recycling logistics can also be observed in the literature, which requires a new approach from both researchers and practitioners. Recycling logistics, as a system of logistics processes, is one of the most important elements of sustainability goals, as inadequate operation can lead to significant economic and environmental losses that affect the efficiency of the entire value chain.

In the first parts of the thesis, I presented the relevant international literature on the topic, highlighting how the European Union's sustainability policies have stimulated academic research since the early 2020s. I described the scientific methodologies supporting my theses, emphasizing that traditional, linear logistics systems must gradually transform into closed chain structures that support the principles of the circular economy. I explained that logistics decision-making today increasingly takes place within a multidimensional framework in which ESG principles play a decisive role alongside economic rationality.

I analyzed in detail the changes in the legal and regulatory environment, with particular regard to domestic and EU directives. I found that these regulations fundamentally transform the way companies operate, as they require organizations to account for the performance of their supply chains not only from a financial perspective, but also from an environmental and social perspective. I concluded that compliance represents an additional burden in the short term, but in the long term it will strengthen the corporate reputations and increase their competitiveness. However, this requires the development of precise decision-making processes and the application of data-driven risk analysis, which enables companies to meet sustainability expectations in a dynamically changing market environment.

In relation to the scientific methodology used in the dissertation, I highlighted that increasing emphasis is being placed on the structured identification and assessment of risk factors, particularly in the context of ESG frameworks. According to my research, due to the complex nature of risks, assessment can only be carried out effectively using multi-criteria methodologies.

Accordingly, in my investigations, I found the TOPSIS method to be the most effective for finding the optimal result. This method allows for the comparison of alternative solutions and the selection of optimal decisions based on the quantified effects of individual risk factors. The method used is also suitable for adaptation to different industrial and organizational environments, which increases its practical relevance. I also discussed the role of digitalization developments, showing how artificial intelligence, blockchain, and IoT-based data collection make recycling processes transparent and measurable. These not only increase efficiency but also directly support regulatory compliance, enabling real-time response to sustainability risks in logistics networks.

I have found that adapting to ESG criteria is increasingly becoming a strategic issue in corporate practice. Compliance is not just an obligation, but also a competitive factor. In addition to the continuous tightening of legal requirements, investor and consumer expectations are also increasing the need to incorporate ESG considerations. For corporets, digitized, ESG compatible recycling logistics systems are therefore not only a means of complying with regulatory requirements, but also key elements in maintaining innovation, efficiency, and competitiveness. The economic model of the future is thus clearly emerging at the intersection of sustainability and technological development.

The theses formulated in the dissertation provide a systematic and innovative response to the problems arising in the field of recycling logistics. In my research, I explored and defined the tasks of the new type of recycling logistics system necessary for the operation of ESG frameworks, as well as the applicable models. I defined the areas of activity of the system and, based on these, created an evaluation method that is capable of addressing sustainability and economic aspects simultaneously.

The model I have developed integrates ESG considerations into the entire recycling logistics process. This enables recycling and collection processes to operate in a measurable yet regulated manner, in line with the principles of the circular economy, contributing to theoretical development and the responsible design of future value chains.

8. IRODALOMJEGYZÉK, ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN HASZNÁLT SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [S1] Latorcai Zs; Illés B; Tamás P.: ESG-RENDSZEREK ÉS LOGISZTIKA KAPCSOLATA, Barabás, István (szerk.) OGÉT 2025 - XXXIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 33rd International Conference on Mechanical Engineering, Nagyvárad, Románia, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), 335-340, 2025
- [S2] Latorcai Zs; Illés B; Tamás P.: THE RELATIONSHIP BETWEEN ESG SYSTEMS AND LOGISTICS, In: Elke, Glistau; Sebastian, Trojahn; Fabian, Behrendt (szerk.) 18th International Doctoral Students Workshop on Logistics, Supply Chain and Production Management, Magdeburg, Németország: Otto von Guericke University Library, 99-106, 2025, <http://dx.doi.org/10.25673/119021>
- [S3] Vida L., Latorcai Zs., Illés B., Véha A.: ADVANCE CONTAINER HANDLING In: PMLO2025 - PMLO2025 (szerk.) 2025 4rd International Conference on Problems of Logistics, Management and Operation in the East-West Transport Corridor (PLMO), Baku, Azerbajdzsán: IEEE XPLORE, 1-5, 2025
- [S4] L. Vida, Zs. Latorcai, B. Illés, A. Véha: CONTAINER HANDLING ALONG THE SILK ROAD In: 2024 3rd International Conference on Problems of Logistics, Management and Operation in the East-West Transport Corridor (PLMO), Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1-6, 2024, <https://doi.org/10.1109/PLMO62307.2024.10887164>
- [S5] Vida L., Illés B., Latorcai Zs.: ESG RENDSZEREK, FEJLETT KONTÉNERKEZELÉS In: Barabás, István (szerk.), OGÉT 2025 - XXXIII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia: 33rd International Conference on Mechanical Engineering, Nagyvárad, Románia: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), 1-6, 2025, <https://ojs.emt.ro/oget/article/view/1942/1992>

- [S6] Latorcai Zs., Illés B., Tamás P.: PROJECT ORIENTED MANAGEMENT (POM) AND LOGISTICAL CHALLENGES IN MAINTENANCE AND NETWORK DEVELOPMENT SYSTEMS, *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice*, 17(4), 5-13, 2023, <https://doi.org/10.32971/als.2023.025>
- [S7] Latorcai Zs. (szerk.): MVM CSOPORT INTEGRÁLT ESG JELENTÉS 2022, 2023, https://mvm.hu/-/media/MVMHu/Documents/Befektetoknek/ESG/HU/2022/2022_MVM_Csoport_Integralt_ESG_Jelentese.pdf
- [S8] Latorcai Zs. (szerk.): MVM CSOPORT INTEGRÁLT JELENTÉS 2021, 2022, https://mvm.hu/-/media/MVMHu/Documents/Befektetoknek/ESG/HU/2021/MVM_Csoport_Integralt_Jelentes_2021.pdf
- [S9] Latorcai Zs., Illés B., Tamás P.: Risk assessment of ESG-based logistics systems using a TOPSIS-based approach, *Acta logistica – International Scientific Journal about Logistica*, Megjelenés alatt