

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Bencz? László

Gödöll?

2025

A vasúti talpfák környezetkímélő újrahasznosításának aspektusai

Bencző László

Gödöllő

2025

Doktori Iskola neve: Gazdaság- és Regionális Tudományok Doktori Iskola
tudományága: regionális tudományok

Doktori Iskola vezetője: Prof. Dr. Bujdosó Zoltán PhD

egyetemi tanár

Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem

Vidékfejlesztés és Fenntartható Gazdasági Intézet

Témavezetők: Prof. Dr. Bujdosó Zoltán PhD

Prof. Dr. Habil. Szabó Lajos Professzor Emeritus Az MTA doktora
(DSc)

.....

Iskola vezetőjének jóváhagyása

.....

Doktori Témavezetők jóváhagyása

Tartalomjegyzék

1. MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	9
2.1. Szekunder kutatás	9
2.2. Primer kutatás	9
2.3. Adatgyűjtési körülmények és módszerek	10
2.4. Módszertani standardok alkalmazása	10
2.5. Adatbázisok és értékelési szempontok	11
2.6. Elemzési módszerek és módszertani források	11
2.7. Az eredmények fejezettel való összhang	11
3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE.....	12
3.1. Szekunder kutatás eredményei	12
3.2. Primer kutatás eredményei: Esettanulmányok	14
3.2.1. Esettanulmány 1.: Diósgyőr: A vasúti infrastruktúra újrahasznosításának történeti és jelenkori tanulságai	14
3.2.2. Esettanulmány 2. Budakalász: A kis méretű telephelyek gazdasági kihívásai	17
3.2.3. Esettanulmány 3.: Püspökladány- a vasúti talpfák konzerválásának öröksége	22
3.2.4. Esettanulmány 4.: Dunaújváros: A meddő és salak újrahasznosításának gazdasági lehetőségei.....	24
3.2.5. Esettanulmány 5: Energiatárolási lehetőségek az energiaközösség számára: A vanádiumos akkumulátor lehetőségei	27
3.2.6. Esettanulmányok összefoglalása és következtetések	30
3.3. Primer kutatás eredményei: A remediációs eljárás: Innovatív technológiák szerepe	32
4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	37
5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	41
6. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI ..	44

1. MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

Dolgozatomban a vasúti talpfák újrahasznosításának lehetőségeit vizsgálom a környezetkímélő technológiák alkalmazásának szempontjából. A kutatás kiindulási pontját az adja, hogy a vasúti talpfák – amelyek veszélyes hulladéknak minősülnek – újrahasznosítása egyaránt jelent környezeti és gazdasági kihívást. A probléma relevanciáját erősíti, hogy az Európai Unió szigorú környezetvédelmi szabályozásai ellenére a használt talpfákat javarészt selejtezik, újrahasznosításuk technológiai és jogi akadályokba ütközik.

A témaválasztásom személyes szakmai tapasztalatokon alapul, hiszen közel 20 éve dolgozom az újrahasznosítási iparágban, ahol több állami vállalattal (például MÁV Zrt., BKV Zrt.) működtem együtt. Munkáim során közel 19.000 metrikus tonna használt vasúti talpfát azonosítottam különböző helyszíneken. Ezek az elemek – veszélyességük és kreozot-tartalmuk miatt – kiemelt figyelmet igényelnek, ugyanakkor gazdaságilag és környezetileg is jelentős lehetőségeket rejtenek.

A kutatás relevanciáját tovább növeli, hogy a fenntartható fejlődés, a környezetbarát gazdálkodás és a hulladékgazdálkodás kérdései globálisan is kiemelt figyelmet kapnak. Az újrahasznosítás jelentősége túlmutat a hulladékkezelésen: hozzájárulhat az energiahatékonyság növeléséhez, a szén-dioxid-kibocsátás csökkentéséhez és a gazdasági hatékonyság javításához.

A kutatás kiindulópontját az is alátámasztja, hogy a vasúttársaságok társadalmi felelősségvállalási stratégiáik részeként egyre nagyobb hangsúlyt helyeznek a fenntarthatóságra, ugyanakkor a meglévő technológiák és jogi keretek gyakran nem elégítik ki a környezetvédelmi követelményeket.

Célkitűzések

Általános célom, hogy feltárjam a használt vasúti talpfák újrahasznosításának technológiai és gazdasági lehetőségeit, és olyan megoldásokat dolgozzak ki, amelyek hozzájárulnak a fenntarthatósági célok eléréséhez. A kutatás során az alábbi specifikus célkitűzéseket fogalmaztam meg:

1. **Jogsabályi környezet elemzése:** Vizsgálni, hogy a jelenlegi jogi és szabályozási környezet milyen mértékben támogatja vagy gátolja a vasúti talpfák újrahasznosítását.
2. **Technológiai megoldások feltárása:** Azonosítani azokat a technológiákat, amelyek minimalizálják a környezeti terhelést és gazdaságilag is életképesek a használt talpfák újrahasznosítására.
3. **Prototípus-fejlesztés:** Kidolgozni egy gyakorlati prototípust, amely bemutatja a vasúti talpfák újrahasznosításának gyakorlati lehetőségeit.

4. **Gazdasági elemzés:** Kimutatni, hogy a megfelelő újrahasznosítási technológiák alkalmazásával hogyan csökkenthetők a hulladékgazdálkodási költségek, és hogyan teremthető gazdasági érték a vasúttársaságok számára.
5. **Fenntarthatósági hatások vizsgálata:** Elemzésekkel bizonyítani, hogy a használt vasúti talpfák újrahasznosítása miként járul hozzá a környezetvédelmi célokhoz, például a széndioxid-kibocsátás csökkentéséhez.

Hipotézisek

A kutatás során az alábbi hipotéziseket fogalmaztam meg:

H1: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.

H2: A Németországban, Hollandiában, Svájcban, Lengyelországban és Brazíliában alkalmazott használt vasúti talpfák újrahasznosítási gyakorlata jelentős eltéréseket mutat a Magyarországon alkalmazott gyakorlathoz képest.

H3: Az érintett, újrahasznosítással megbízott gazdálkodók csak az energetikai újrahasznosítást választják környezetbarát gazdálkodási módszernek.

H4: A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.

H5: A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.

1. sz. táblázat: Összefüggéseket bemutató táblázat

Kutatási cél	Kutatási kérdés	Hipotézis	Vizsgálati módszer
<p>C1: Megvizsgálni, hogy a jelenlegi jogszabályi és engedélyezési környezet mennyiben támogatja vagy gátolja a használt vasúti talpfák újrahasznosítását.</p>	<p>K1a. Milyen újrahasznosítási elveket és gyakorlati megoldásokat alkalmaznak a megkérdezett vasúttársaságok, illetve az újrahasznosításban részt vevő alvállalkozók a használt vasúti talpfák kezelésében?</p> <p>K1b. Működtetnek-e környezetközpontú irányítási rendszert (pl. ISO 14001), illetve minőségbiztosítási rendszert (pl. ISO/TS 9002-2016) ezek a szervezetek, és milyen módon kapcsolódnak ezek az újrahasznosítási gyakorlatukhoz?</p> <p>K2. Milyen újrahasznosítási elveket és eljárásokat alkalmaznak a megkérdezett szereplők (vasúttársaságok, alvállalkozók) a használt vasúti talpfák (faaljak) kezelésére, és ezek mennyiben tükröznek környezettudatos gondolkodást vagy viselkedést?</p>	<p>H1.: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.</p> <p>H2: A Németországban, Hollandiában, Svájcban, Lengyelországban és Brazíliában alkalmazott használt vasúti talpfák újrahasznosítási gyakorlata jelentős eltéréseket mutat a Magyarországon alkalmazott gyakorlathoz képest.</p>	<p>Dokumentumelemzés a jogszabályokról és engedélyezési környezetről; nemzetközi összehasonlítás a hazai és más országok gyakorlatával.</p>

<p>C2: Feltárni a technológiai megoldásokat a használt vasúti talpfák újrahasznosítására, minimális környezeti terhelés és maximális gazdasági hatékonyság mellett.</p>	<p>K3. Hogyan változott a környezettudat a gazdálkodók mindennapjaiban? K4. Mennyire tartják fontosnak a fenntarthatóságot?</p>	<p>H3: Az újrahasznosítással megbízott gazdálkodók csak az energetikai újrahasznosítást választják környezetbarát gazdálkodási módszernek.</p>	<p>Technológiai elemzés; prototípus-fejlesztés és bemutatás; interjúk a gazdálkodókkal és a technológiákat alkalmazó szervezetekkel.</p>
<p>C3: Bizonyítani, hogy megfelelő technológiák alkalmazásával a használt vasúti talpfákból előállított termékek versenyképesek lehetnek, és hozzájárulhatnak a környezetvédelmi célok eléréséhez.</p>	<p>K5. Rész-e a pályagazdálkodásuknak a környezeti monitoring? K6. Milyen mértékben járul hozzá a vasúti talpfák újrahasznosítása a környezeti állapot javulásához és a fenntarthatóbb szemlélet kialakulásához a vasúttársaságok körében?</p>	<p>H4: A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.</p>	<p>Piaci versenyképességi elemzés; prototípus validáció; visszajelzések gyűjtése a környezeti hatások elemzéséhez.</p>
<p>C4: Gazdaságilag kimutatni, hogy a használt talpfák újrahasznosítása költségcsökkentést és gazdasági előnyt is jelenthet, ezzel támogatva a fenntartható gazdálkodást.</p>	<p>K7. Milyen pozitív és negatív visszajelzések érkeztek a gazdálkodó szervezetektől és alvállalkozóktól a vasúti talpfák újrahasznosítási lehetőségeivel, környezeti hatásaival és gazdasági hasznosíthatóságával kapcsolatban?</p>	<p>H5: A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.</p>	<p>Költség-haszon elemzés; interjúk és kérdőívek a gazdálkodó szervezeteknél, elemzése a hulladékkezelési költségekről és potenciális bevételekről.</p>

Forrás: Saját szerkesztés, 2024

Az 1. táblázat bemutatja az egyes kutatási célokat, hozzájuk tartozó kutatási kérdéseket, hipotéziseket és vizsgálati módszereket, segítve az értekezés logikai struktúráját és az összefüggések átláthatóságát.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A kutatás módszertani megközelítése a primer és szekunder kutatási módszerek együttes alkalmazásán alapul, melyek célja a környezetkímélő technológiák és újrahasznosítási eljárások vizsgálata, különös tekintettel a vasúti faaljak fenntartható kezelésére. E módszerek lehetővé teszik a téma mélyreható feltárását és a gazdasági, környezeti szempontból releváns következtetések levonását (Yin, 2014).

Saját kutatásaim során kvalitatív és kvantitatív megközelítést egyaránt alkalmaztam, amelyek megalapozzák a prototípusok értékelését és a gazdasági elemzéseket.

2.1. Szekunder kutatás

A szekunder kutatás során már meglévő adatokat és információkat gyűjtöttem össze és elemeztem, amelyek más kutatások vagy szervezetek által korábban gyűjtött adatokon alapulnak. Ez a megközelítés lehetővé teszi a kutatási probléma pontosítását és a meglévő ismeretek feltárását.

A kutatás során felhasznált adatbázisok és források között szerepeltek:

1. Magyar Államvasutak (MÁV) dokumentációi: Ezek a belső dokumentumok betekintést nyújtottak a vasúti faaljak jelenlegi kezelésébe és az alkalmazott újrahasznosítási gyakorlatokba.
2. BKV Zrt.-től kapott belső adatok: A budapesti közlekedési vállalat adatai segítettek megérteni a városi vasúti infrastruktúrában alkalmazott faaljak kezelését és azok újrahasznosítási lehetőségeit.
3. Európai Unió vonatkozó direktívái és irányelvei (pl. 76/769/EEC, 98/8/EC): Ezek az irányelvek meghatározzák a veszélyes anyagok kezelésére és az újrahasznosításra vonatkozó szabályozásokat, amelyek alapvetőek a kutatás szempontjából.

A szekunder kutatás során elemeztem más nemzetközi tanulmányokat is, amelyek a faanyagok kezelésének környezeti hatásait és újrahasznosításának lehetőségeit vizsgálják (Lave et al., 1995). Ez hozzájárult a fenntarthatóság és a környezetvédelmi szabályozások hatásainak mélyebb megértéséhez.

2.2. Primer kutatás

A primer kutatás során saját adatgyűjtést végeztem, amely kifejezetten a kutatási kérdések megválaszolására irányult. Ez lehetővé tette, hogy első kézből származó, releváns adatokat gyűjtsek a vizsgált problémáról.

A primer kutatás fő módszerei:

1. Esettanulmányok készítése: Részletes elemzéseket végeztem magyar és külföldi vasúttársaságok újrahasznosítási gyakorlatairól. Az esettanulmányok kiválasztásánál figyelembe vettem a technológiai fejlettséget, a környezeti terhelés csökkentésére irányuló törekvéseket és a szabályozási környezetet.

2. Talajminták vizsgálata: A vasúti faaljakból származó szennyező anyagok környezeti hatásainak felmérése érdekében talajmintákat gyűjtöttem és elemeztem. Ez a vizsgálat konkrét adatokat szolgáltatott a faaljakból kioldódó anyagok mennyiségéről és azok környezeti hatásairól. Ez a megközelítés biztosította, hogy a kutatás során mind a meglévő ismereteket, mind a saját adatgyűjtés eredményeit felhasználjam, ezáltal átfogóbb és megalapozottabb következtetéseket vonhassak le a vasúti faaljak fenntartható kezelésével kapcsolatban.

2.3. Adatgyűjtési körülmények és módszerek

Az adatgyűjtés fő forrását a MÁV és a BKV szakembereivel készített interjúk, valamint az általuk biztosított belső dokumentumok és adatok jelentették, amelyek révén részletes betekintést nyertem a magyar hulladékgazdálkodási gyakorlatokba és a költségoptimalizálási lehetőségekbe. Az interjúk során olyan információkat gyűjtöttem, amelyek közvetlenül hozzájárultak a vasúti talpfák újrahasznosítási eljárásainak és szabályozásainak mélyebb megértéséhez (Maxwell, 2013).

Emellett a kutatás részeként nemzetközi adatgyűjtést is végeztem telefonon, e-mailen, valamint különböző online kommunikációs platformokon (Skype, Teams, Zoom) keresztül, több ország – köztük Dánia, Hollandia, Belgium, Finnország, Norvégia, Németország, Ausztria, Lengyelország, Svájc, Magyarország, Brazília és Ausztrália – vasúttársaságainak szakembereivel. A kvalitatív adatgyűjtés során félig strukturált kérdőívet alkalmaztam, amelyet előre kidolgozott tematikus kérdések mentén használtam fel, ugyanakkor lehetőséget adtam az interjúalanyoknak a szabad kifejtésre is. A kérdések minden interjúalany esetében azonos logika szerint követték az alábbi főbb témaköröket:

1. alkalmazott újrahasznosítási technológiák,
2. környezetvédelmi irányítási rendszerek (pl. ISO 14001) megléte,
3. a faaljak kezelésére vonatkozó jogi és műszaki kihívások,
4. a jövőbeni fejlesztési tervek és jógyakorlatok.

Az adatgyűjtés nem ad hoc jelleggel történt, hanem szisztematikusan előre egyeztetett struktúra szerint. A válaszokat tematikus tartalomelemzéssel csoportosítottam és összegeztem.

E kapcsolattartási módszerek biztosították a rugalmas, időzónákon és földrajzi határokon átívelő adatgyűjtést, amely lehetővé tette a vizsgált országok eltérő környezeti és szabályozási megközelítéseinek feltárását (Patton, 2002). Az információk közvetlen beszerzése révén a vasúti faaljak újrahasznosítására irányuló megoldások sokrétűségébe és a kapcsolódó szabályozási kihívásokba nyerhettem betekintést.

2.4. Módszertani standardok alkalmazása

Az adatgyűjtés során alkalmazott módszereket az ISO 9001:2015 szabvány minőségirányítási követelményeivel is összevettem. Ez a minőségirányítási szabvány lehetőséget adott arra, hogy az adatgyűjtési és feldolgozási folyamatok megfelelőségét értékeljem, valamint felmérjem, hogy

mennyire integrálhatók a fenntarthatósági elvek a vizsgált vasúttársaságok hulladékgazdálkodási és újrahasznosítási gyakorlataiba (ISO, 2015). Az ISO szabványnak való megfelelés vizsgálata fontos eleme volt a kutatásnak, mivel ez megalapozta a fenntarthatósági elvek technikai alkalmazhatóságát és a kutatás szilárd metodológiai alapját képezte.

2.5. Adatbázisok és értékelési szempontok

A szekunder kutatás során használt adatbázisokban található adatok a 2000–2023 közötti időszakot ölelik fel, melyek relevánsak a hulladékgazdálkodási folyamatok és újrahasznosítási gyakorlatok elemzéséhez. A primer kutatás során használt esettanulmányokat többek között a MÁV, BKV, valamint külföldi vasúttársaságok (pl. DB AG, SNCB, NSB) adatai és gyakorlatai alapján választottam ki. A kutatás során figyelembe vettem az európai uniós direktívák által előírt környezetvédelmi követelményeket is (European Environment Agency, 2021).

2.6. Elemzési módszerek és módszertani források

Az adatok feldolgozása és értékelése során különféle statisztikai és kvalitatív elemzési módszereket alkalmaztam. A módszertani fejezet elkészítéséhez olyan szakirodalmi forrásokra támaszkodtam, mint Babbie (2017) *A társadalomtudományi kutatás gyakorlata*, valamint más módszertani források, amelyek az esettanulmányok alkalmazásával kapcsolatos legjobb gyakorlatokat mutatják be (Bryman, 2016).

2.7. Az eredmények fejezettel való összhang

Az eredmények fejezetben részletesen bemutatom az egyes esettanulmányok alapján levont következtetéseket, amelyek tükrözik a módszertani fejezetben ismertetett kutatási célok és hipotézisek vizsgálatát. Az esettanulmányok alapján lehetőség nyílik a környeztikímélő technológiai fejlesztések gyakorlati alkalmazására és a fenntartható hulladékkezelési megoldások feltárására.

A kutatás során alkalmazott módszerek kiválasztása saját korábbi vizsgálataim tapasztalataim alapult, melyek során az újrahasznosítás technológiai és környezeti aspektusait egyaránt vizsgáltam.

3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

3.1. Szekunder kutatás eredményei

A szekunder kutatás során a vasúti talpfák újrahasznosításának gazdasági, környezetvédelmi és technológiai lehetőségeit vizsgáltam, különös tekintettel a magyarországi és nemzetközi gyakorlatokra. Emellett elemzésre kerültek az alumíniumprofilok és napelemek költségei, valamint az energiahatékonyság növelésének lehetőségei. Az alábbi részletes eredmények foglalják össze a kutatás főbb megállapításait.

1. Vasúti talpfák újrahasznosítása – Gazdasági elemzés

Adatok a BKV Zrt.-től

A BKV Zrt. az elmúlt években jelentős mennyiségű vasúti talpfát szállított el veszélyes hulladékként, magas költségekkel. Az alábbi táblázat a rendelkezésre álló adatokat foglalja össze:

2.táblázat: Veszélyes hulladékként kezelt vasúti talpfák költségei és alternatív árbevételi lehetőségek (2018–2020)

Év	Első kezelés költsége (Ft)	Mennyiség (kg)	Alternatív értékesítési árbevétel (Ft)	Potenciális nyereség (Ft)
2018	763 200	8 480	84 800	848 000
2019	1 697 400	18 860	188 600	1 886 000
2020	540 900	6 010	60 100	601 000

Forrás: Borbás, 2021 adatai alapján saját szerkesztés

A 2. táblázat a BKV Zrt. vasúti talpfáinak veszélyes hulladékként való kezelésének költségeit és az alternatív újrahasznosításból származó potenciális árbevételi lehetőségeket mutatja 2018–2020 között. Az adatok alapján a költségek és mennyiség szoros összefüggést mutatnak, miközben az alternatív értékesítés jelentős gazdasági előnyökkel járhatna. Az újrahasznosítás nemcsak költségmegtakarítást eredményezne, hanem fenntarthatóbb hulladékgazdálkodást és kisebb környezeti terhelést biztosítana.

Gazdasági potenciál:

Az elszállítás költségének elmaradásával és az értékesítésből származó bevétellel évente jelentős költségmegtakarítás érhető el.

Értékesítési potenciál és szabályozási akadályok

A talpfák értékesítésére vonatkozó szabályozás jelenleg szigorú kereteket szab, különösen a veszélyes hulladékok kategóriájában. A megfelelő környezetvédelmi engedélyekkel rendelkező

vállalatok számára történő nyílt licit során azonban a hulladék árbevétele és az elszállítási költségek csökkentése jelentős gazdasági előnyt eredményezhet.

2. Fenntarthatósági szempontok

Környezetvédelmi előnyök

A talpfák megfelelő újrahasznosítása mérsékli a környezeti terhelést:

Kreozot tartalom eltávolítása: Csökkenti a talaj- és talajvízszennyezést.

CO₂-megtakarítás: A megfelelő újrahasznosítás és energiahatékony napelemek telepítése évente több millió kilogramm CO₂-t takaríthat meg (Budapest Airport, 2021).

A Budapest Airport Zrt. által biztosított adatok alapján a parkolók fölé telepített napelemek éves CO₂-megtakarítása akár 1 296 000 kg is lehet (Budapest Airport, 2021).

3. Alumíniumprofilok és napelemek költség számítása

Költség számítás a napelemekhez szükséges profilok alapján:

- 1 tonna alumíniumprofil ára: 4 320 USD, amely 2021-es árfolyamon kb. 1 594 080 HUF
- Egy napelemprofil súlya: 30 kg.
- Egy darab napelemprofil költsége: **47 822,4 HUF.**

3.táblázat: Napelemes rendszerek telepítési költségei és megtérülése

Telepítési helyszín	Alumíniumprofil költsége (HUF)	Napelem darabszám	Éves energiahozam (kWh)	Éves megtakarítás (HUF)
Parkoló 1	76 268 000	1 412	635 400	31 770 000
Parkoló 2	130 900 000	2 398	1 079 100	53 550 000

Forrás: Budapest Airport Zrt., 2021 alapján saját szerkesztés

Következtetések:

1. Gazdaságosság: A 3. táblázat rávilágít a napelemes rendszerek telepítésének költségeire és az azokból származó éves megtakarításokra.
2. Megtérülés: Az alumíniumprofil költsége jelentős tétel a beruházásban, de az éves energiamegtakarítás hosszú távon megtéríti ezt az összeget.
3. Skálázhatóság: A nagyobb rendszer (Parkoló 2) nagyobb beruházási költséggel jár, de az energiahozam és a megtakarítás is arányosan magasabb.

Összefoglalóul megállapíthatjuk, hogy a 3. táblázat átfogó képet nyújt a napelemes rendszerek telepítési költségeiről és azok megtérülési potenciáljáról.

4. Szekunder adatok összefoglalása

- A vasúti talpfák újrahasznosításának éves szinten akár **1–2 millió Ft nettó megtakarítást** eredményezhet a BKV Zrt. számára.
- A napelemes rendszerek telepítése jelentős hosszú távú energia- és költségmegtakarítást kínál, miközben csökkenti a CO₂-kibocsátást.

Összegzés

A kutatás eredményei rámutattak, hogy az újrahasznosítás és a környezetbarát technológiák alkalmazása nemcsak fenntarthatósági szempontból, hanem gazdasági értelemben is jelentős előnyökkel jár. A számítások és vizualizációk alátámasztják, hogy a vasúti talpfák újrahasznosítása és a napelemek telepítése stratégiai fontosságú lehet a fenntartható gazdasági működés megteremtésében.

3.2. Primer kutatás eredményei: Esettanulmányok

3.2.1. Esettanulmány 1.: Diósgyőr: A vasúti infrastruktúra újrahasznosításának történeti és jelenkori tanulságai

A diósgyőri meddőhányó rekultivációja jól példázza, hogyan alakítható át egy elhagyott ipari terület környezetbarát módon, gazdasági és társadalmi előnyöket teremtve. A 36 hektáros salakdomb a vas- és acélgégyártás melléktermékeként halmozódott fel a volt Lenin Kohászati Művek területén. Az esettanulmány célja a salak újrahasznosításának és a rekultiváció gazdasági, társadalmi hatásainak vizsgálata, valamint a fenntartható fejlődési célokhoz való kapcsolódás elemzése.

A kutatás kiemeli, hogy a rekultiváció után megújulóenergia-közösségek is létrehozhatók, melyek hosszú távon fenntarthatóan működhetnek, elősegítve a helyi gazdaság és közösségek fejlődését. E modellek más európai térségekben is sikeresen alkalmazhatók. Az 1989-es rendszerváltás utáni gazdasági változások eltérően érintették a régiókat: míg egyesek fejlődtek, mások hanyatlottak. Az elhagyott ipari területek megfelelő újrahasznosítása azonban gazdasági és társadalmi előnyökkel járhat.

Az Európai Unió és a magyar hulladékgazdálkodási irányelvek támogatják az ipari melléktermékek, például kohósalak, fenntartható hasznosítását. A kohászati salak, mint ipari kőzet, bizonyítottan alkalmas út- és betonalapanyagként. A diósgyőri példa modellértékű lehet a fenntartható területhasználat és energiaközösségek létrehozása terén, hazai és nemzetközi szinten egyaránt.

A gazdasági és társadalmi előnyök kihasználása

Az ipari hulladéklerakók újrahasznosítása nemcsak környezetvédelmi szempontból jelentős, hanem elősegíti a helyi közösségek fenntartható fejlődését is. Az urbanizációval és multinacionális cégek betelepítésével járó folyamatok figyelmeztetnek arra, hogy a hazai vállalkozásoknak és önkormányzatoknak is prioritásként kell kezelniük az újrahasznosítási lehetőségeket és a munkahelyteremtést. A miskolci Nádasrét, amely 2003 óta magántulajdonban van, jól példázza, hogy az ilyen területeket egyedi módon kell kezelni a kistérségi problémák megoldása és a regionális fejlődés érdekében (Horváth, 2009; Káposzta et al., 2016).

Az acélsalak, mint fenntartható építőanyag

Az építőmérnöki anyagok iránti globális kereslet növekedésével párhuzamosan az ipari hulladék, például az acélsalak, ígéretes alternatívát kínál a természetes aggregátumok helyettesítésére. Az acélsalak, amely a vas- és acélgyártás mellékterméke, kiváló tulajdonságai miatt hasznosítható cementben vagy betonban ásványi adalékanyagként (Dong et al., 2021). A diósgyőri meddőhányó rekultivációja során ezek az alapanyagok kinyerhetők, és akár az energiaközösségek infrastruktúrájában is felhasználhatók.

Kutatási célok és lehetséges hasznosítás

Kutatásom célja, hogy bemutassam, miként válhat a diósgyőri meddőhányó rekultivációja modellértékűvé:

Az újrahasznosított terület energiatermelésre történő alkalmassá tétele.

Az onnan kinyert alapanyagok, például acélsalak, építőipari felhasználásának lehetőségei.

Az energiaközösségek létrehozásának gazdasági, társadalmi és környezetvédelmi aspektusai.

A rekultivált terület hosszú távú társadalmi és gazdasági előnyeinek feltárása.

Az esettanulmány példaként szolgálhat a hasonló adottságokkal rendelkező térségek számára, hogyan érhető el a fenntartható területhasználat a gazdasági és társadalmi célok integrált megvalósításával.

Kutatási cél és hipotézisek

Az esettanulmány elsősorban az alábbi hipotéziseket kívánja igazolni:

- **H3:** Az újrahasznosítással foglalkozó gazdálkodók döntően az energetikai újrahasznosítást részesítik előnyben.
- **H5:** Az újrahasznosított anyagok értékesítése gazdasági előnyökkel járhat, hozzájárulva a hulladékkezelési költségek csökkentéséhez és bevételek generálásához.

A kutatási cél, hogy a diósgyőri terület példáján keresztül bemutassam, hogyan alakíthatók ki megújulóenergia-közösségek, illetve ezek milyen formában és hogyan működhetnek hosszú távon a vizsgált területen (Shen et al., 2020; Nagy, 2003).

Módszerek

A kutatási módszer magában foglalta a helyszíni mintavételt, laboratóriumi elemzéseket és gazdasági modellezést.

Öt különböző ponton gyűjtöttem mintákat a salakdomb felszínéről (ÚT/A-1-től ÚT/A-5-ig), amelyek fizikai és kémiai tulajdonságait vizsgáltam. A laboratóriumi eredmények alapján meghatároztam a salak újrahasznosíthatóságának lehetőségeit, különös tekintettel az építőipari alkalmazásra.

Eredmények

A salak kémiai összetétele

A laborvizsgálatok során a következő fő összetevőket azonosítottam a mintákban:

4. táblázat: A salak kémiai összetevői

Összetevő	Tömegarány (%)
Kalcium-oxid (CaO)	32,5
Szilícium-dioxid (SiO ₂)	28,7
Magnézium-oxid (MgO)	8,2
Vas-oxid (Fe ₂ O ₃)	12,1

Forrás: saját kutatás alapján saját szerkesztés

A vizsgálatok alapján a diósgyőri salak nagy mennyiségben tartalmaz cementiparban használható ásványokat, így alkalmas lehet építőanyagok, például beton vagy útalap készítésére.

Újrahasznosítási lehetőségek

A feldolgozatlan salakot osztályozással, homogenizálással és fémkivonással lehet előkészíteni további felhasználásra. A minták feldolgozása során olyan anyagkeveréket állítottam elő, amely kötőanyag nélküli burkolatalapok készítésére alkalmas.

Gazdasági elemzés

A salak újrahasznosításának gazdasági előnyeit az alábbi táblázat foglalja össze:

5. táblázat: A salak újrahasznosításának gazdasági előnyei

Felhasználási mód	Költség (€)	Bevétel (€)	Nettó haszon (€)
Útalap építés	10 000	25 000	15 000
Beton adalékanyag	15 000	40 000	25 000
Fémkivonás	20 000	50 000	30 000

Forrás: saját kutatás alapján saját szerkesztés

Az 5. táblázat a salak újrahasznosítási módjainak gazdasági előnyeit elemzi költségek, bevételek és nettó haszon alapján. A feldolgozás mértékének növekedésével a nettó haszon is nő.

Legjövödelmezőbb: A fémkivonás magas nettó hasznot biztosít, különösen magas fémkoncentráció esetén.

Fenntartható alternatíva: A beton adalékanyagként való alkalmazása piaci értékkel bír és támogatja a fenntartható építőanyag-gyártást.

Költséghatékony megoldás: Az útalap építése egyszerű és kevésbé költséges, ideális kevésbé komplex igényekre.

Az újrahasznosítás gazdasági és környezeti előnyöket nyújt, az optimális módszer a helyi erőforrások és igények alapján választható ki.

Fenntarthatósági szempontok

Az újrahasznosítás nemcsak gazdasági előnyöket, hanem jelentős környezetvédelmi hasznot is eredményez.

Összefoglalóul megállapítható, hogy az újrahasznosítás hozzájárul a hulladéklerakók terhelésének csökkentéséhez, a természetes alapanyagok helyettesítésével az építőipar fenntarthatóságához, valamint az üvegházhatású gázok kibocsátásának mérsékléséhez (van der Zwan & Henneveld, 2017).

Helyi és nemzetközi párhuzamok

Az esettanulmány kontextusában megvizsgáltam az EU-ban és más régiókban található, hasonló adottságokkal rendelkező ipari területek példáit. A rekultiváció és újrahasznosítás gyakorlata jelentős gazdasági és társadalmi előnyökkel járhat, különösen az energiatermelésre és munkahelyteremtésre alkalmas területeken (Forman, 2001; Káposzta, 2019).

Következtetések

A diósgyőri salak rekultivációja gazdaságilag életképes és környezetvédelmi szempontból fenntartható megoldás. Az újrahasznosított anyagok értékesítése hosszú távú bevételeket biztosíthat, miközben csökkenti a környezeti terhelést. Az esettanulmány tanulságai más ipari meddőhányók fenntartható fejlesztésére is alkalmazhatók (Schimmoller et al., 2000, Reid, 2000). A rekultiváció utáni területek megújuló energiaforrásként való hasznosítása és közösségi bevonása elősegíti a fenntartható fejlődési célok megvalósítását, és példaként szolgálhat az EU más régiói számára is.

3.2.2. Esettanulmány 2. Budakalász: A kis méretű telephelyek gazdasági kihívásai

A Budakalász 1291/24-25 hrsz. alatti ingatlan környezeti állapotfelmérése a földtani közeg és talajvíz szennyezettségét vizsgálta, különös tekintettel az egykori vasúti talpfákból (faaljak) származó szennyeződésekre. A kreozottal kezelt talpfák, melyek toxikus és rákkeltő policiklikus aromás szénhidrogéneket (PAH) tartalmaznak, jelentős környezeti kockázatot okoztak.

A nem megfelelő hulladékgazdálkodás hiánya talaj- és talajvízszennyezéshez vezetett, amit a Kármentesítési Útmutató alapján készült kockázatelemzés támaszt alá. Hasonló problémák más országokban is előfordultak, ahol a vasúti hulladékkezelési lehetőségek korlátozottak voltak, súlyosbítva a szennyezőanyagok talajba és talajvízbe jutását.

Kutatási hipotézisek

A kutatás az alábbi hipotézisek vizsgálatára irányult:

- **H1:** Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.
- **H3:** Az érintett gazdálkodók elsősorban az energetikai újrahasznosítást választják.
- **H5:** Az újrahasznosítás gazdasági előnyökkel járhat, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.

Módszerek

Az állapotfelmérés során földtani közegből és talajvízből vett minták vizsgálata történt meg. A mintavételi pontokat úgy választottuk ki, hogy azok reprezentálják a terület szennyezőanyag-koncentrációinak változatosságát, figyelembe véve a korábbi tevékenységek lehetséges hatásait.

Elemzett szennyezőanyagok:

- TPH (összes kőolajszénhidrogén)
- BTEX (benzol, toluol, etil-benzol, xilolok)
- PAH (policiklikus aromás szénhidrogének)
- Nehézfémetek (arzén, króm, réz, cink)

Eredmények és elemzések

Talajszennyezés

A talajminták elemzése alapján a szennyezettség az 1-es pontban volt a legnagyobb, ahol TPH, BTEX és PAH komponensek magas koncentrációját mértük. A szennyezőanyag-koncentrációkat az alábbi táblázat foglalja össze:

6. táblázat: A talajminták elemzése alapján a szennyezőanyag-koncentrációk

Mintavételi pont	TPH (mg/kg)	BTEX (mg/kg)	PAH (mg/kg)	Nehézfémek (mg/kg)
1. pont	6681	103266	229	83,8
2. pont	45	63	2,32	45,2
3. pont	32	205	13,2	350,9

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A szennyezőanyagok terjedése a talajban című diagram mutatja a legszennyezettebb mintavételi pontokat:

Talajvíz szennyezés

A talajvízben mért szennyezőanyag-koncentrációk szintén jelentős eltéréseket mutattak. Az 1. pontnál olajszennyezést figyeltünk meg, amely a TPH-tartalom meghaladta a 100 000 µg/L értéket. Az alábbi táblázat mutatja az eredményeket:

7. táblázat: Talajvíz szennyezés

Mintavételi pont	TPH (µg/L)	PAH (µg/L)	Nehézfémek (µg/L)
1. pont	>100000	100000	983
2. pont	45	521	18,4
3. pont	<10	1034	6,35

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A talajvíz szennyezés táblázat szemlélteti a szennyezési csóva alakulását:

1. Kockázatelemzés

A szennyezőanyagok egészségügyi és környezeti kockázatainak elemzése során megállapítottuk, hogy a terület nyugati részén a talajvíz szennyezettsége jelentős kockázatot jelenthet a tervezett óvoda számára. Az állapotfelmérés eredményei alapján javasolt intézkedések:

- Az érintett talaj és talajvíz kármentesítése.
- A BTEX és PAH komponensek helyspecifikus kezelésének kidolgozása.

2. Gazdasági számítások

A hagyományos és biológiai remediációs módszerek költségeit összehasonlítva az alábbi eredményeket kaptuk:

8. táblázat: A hagyományos és biológiai remediációs módszerek költségeinek összehasonlítása

Módszer	Kezdő költség (€)	Üzemeltetési költség (€)	Teljes költség (€)	Hatékonyság (%)
Hagyományos módszer	60 000	30 000	90 000	80
Biológiai remediáció	25 000	15 000	40 000	90

Forrás: Saját kutatás, 2024

A biológiai remediáció olcsóbb és hatékonyabb, mivel in situ technológiával a szennyezőanyagokat közvetlenül a helyszínen bontja le, csökkentve a földmunka és hulladékkezelés költségeit. Ez a módszer különösen előnyös ott, ahol a hagyományos eljárás túl drága vagy nehezen megvalósítható.

Megtérülési számítások

A biológiai remediáció alkalmazásának megtérülését az alábbi tényezők figyelembevételével számítottuk ki:

- Hulladékkezelési költségek csökkenése: 50%-os költségmegtakarítás a hagyományos módszerhez képest.
- Potenciális bevétel: A biológiai remediáció során keletkező biomassza értékesítése vagy energetikai hasznosítása.

A megtérülési számítás az alábbi adatokat veszi alapul:

- Kezdő beruházási költség: 25 000 €
- Üzemeltetési költség: 15 000 €
- Költségcsökkenés: 50 000 €
- Potenciális bevétel: 10 000 € (biomassza értékesítése)

A költségek és bevételek nem azonos időpontban jelentkeznek, ezért a megtérülési számításhoz a nettó jelenérték (NPV) módszert alkalmaztuk:

$$NPV = \sum (C_t / (1 + r)^t) - C_0$$

ahol:

- C_t = a t-edik év pénzárama
- r = diszkontráta (pl. 5%)
- t = év

- C_0 = kezdeti költség (25 000 €)

A beruházás megtérülési ideje mindössze 5 hónap, ami rendkívül gyorsnak számít a környezeti remediációs projektek viszonylatában.

A megtérülés egyszerűsített formában a ROI (Return on Investment) mutatóval is kifejezhető:

$$\text{ROI} = (\text{Befektetés jelenlegi értéke} - \text{Befektetés költsége}) / \text{Befektetés költsége}$$

A számítás alapján a biológiai remediáció gazdaságosabb és fenntarthatóbb alternatíva, mint a hagyományos kármentesítési eljárás, különösen az in situ megoldások esetében

Megállapíthatjuk, hogy a biológiai remediáció gazdaságilag fenntarthatóbb és költséghatékonyabb, mint a hagyományos módszerek. A megtérülési idő mindössze 5 hónap, amely rendkívül rövid a környezeti remediációs projektek viszonylatában.

Következtetések

Az esettanulmány rámutatott, hogy a Budakalászon mért szennyezések jelentős környezeti kockázatot jelentenek. Az eredmények megerősítik a H1, H3 és H5 hipotéziseket, kiemelve, hogy a fenntartható remediációs technológiák alkalmazása nemcsak környezetvédelmi szempontból előnyös, hanem gazdaságilag is kedvezőbb.

A javasolt biológiai remediációs módszer alkalmazása révén az érintett terület hatékonyan és költséghatékonyan kármentesíthető, hozzájárulva a fenntartható hulladékgazdálkodási stratégiák kialakításához.

Összegzés és javaslatok

Az állapotfelmérés feltárta, hogy a Budakalász 1291/24-25 hrsz. alatti területen jelentős mértékű talaj- és talajvízszennyezés található, amely különösen a BTEX és PAH komponensek miatt környezeti és humánegészségügyi kockázatot jelent. A szennyezés a tervezett óvoda környezetében a „B” szennyezettségi határértéket jelentősen meghaladja, és potenciálisan veszélyezteti a terület biztonságos használatát.

Kulcsfontosságú megállapítások:

A BTEX és PAH vegyületek bizonyítottan karcinogének, koncentrációjuk az elfogadható határértékek többszöröse. Az 1. számú mintavételi pont szennyezettsége a talajvíz áramlása alapján a tervezett óvoda irányába terjedhet, jelentős egészségügyi kockázatot okozva, különösen gyerekek számára.

Javasolt intézkedések:

1. **Lokalizáció és kármentesítés:** A szennyezett talaj és talajvíz helyspecifikus kezelése, a terület nyugati részének további feltárása.
2. **Biológiai remediáció:** Költséghatékony mikrobiális törzsoldatok alkalmazása a szennyezőanyagok lebontására in situ.

- 3. Vízhatszálóat korlátozása:** A felszín alatti víz használatának tiltása, munkavédelmi intézkedések bevezetése.
- 4. Monitoring:** Folyamatos szennyezettsgkövetés és egészségkockázati vizsgálatok.
- 5. Beruházási előkészítés:** Szennyezőanyagok eltávolítása a beruházás megkezdése előtt.
- 6. Gazdasági előnyök:** A biológiai remediáció 50%-os költségmegtakarítást és 90%-os hatékonyságot biztosít, mindössze 5 hónapos megtérülési idővel.

Összegzés:

A biológiai remediáció gazdaságos és fenntartható megoldásként szolgálhat a Budakalászon található szennyezett terület kármentesítésére. Az alkalmazott módszerek hozzájárulnak a környezet biztonságossá tételéhez és a fenntartható hulladékgazdálkodási stratégiák megvalósításához, biztosítva ezzel a tervezett óvoda működésének biztonságos környezetét.

3.2.3. Esettanulmány 3.: Püspökladány- a vasúti talpfák konzerválásának öröksége

A Püspökladány belterületén található, 3284 helyrajzi számú ingatlan közel egy évszázadon át szolgált a vasúti talpfák konzerválásának helyszínéül. Az alkalmazott technológiák szénhidrogén-származékok, valamint króm- és rézvegyületek használatával jártak, amelyek jelentős környezetszennyezést okoztak. A kutatás célja a szennyeződések mértékének és terjedésének feltárása, valamint a terület rehabilitációs lehetőségeinek vizsgálata. Az esettanulmány alátámasztja a következő hipotéziseket:

- H1: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.
- H3: Az újrahasznosítással foglalkozó gazdálkodók jellemzően környezetbarát gazdálkodási módszereket alkalmaznak.
- H5: A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.

A vizsgált terület bemutatása

Az érintett ingatlan három lakóépületet és két melléképületet foglal magába. A területen végzett konzerválási tevékenység következtében a talaj és a talajvíz jelentősen elszennyeződött. A szennyező anyagok közé tartoznak a szénhidrogének, fenolok és nehézfémek, amelyek az emberi egészségre és a környezetre egyaránt kockázatot jelentenek.

Kutatási módszerek

A kutatás során öt helyszíni fúrást végeztek, amelyek a talaj és talajvíz szennyeződésének mértékét vizsgálták. A talajvízmintákban a szénhidrogének (TPH) és a fenolindex szintjét mérték. A korábbi kármentesítési dokumentumokat és a terület hidrogeológiai viszonyait is elemeztük.

Eredmények és elemzés

A terület szennyezettségi állapotának áttekintése: A talajvízszennyezés mértéke

A korábbi tényfeltárások és a mostani vizsgálatok alapján a talaj és talajvíz szennyezettsége a konzerválási technológiák következtében jelentős. A kimutatott fő szennyező anyagok: TPH, fenol és acenaftén. A szennyezés mértékét az alábbi táblázat szemlélteti:

A mintavételi pontokon mért TPH- és fenolkoncentrációkat az alábbi táblázat foglalja össze:

9. táblázat: A mintavételi pontokon mért TPH-és fenolkoncentrációk

Minta jele	TPH ($\mu\text{g/l}$)	Fenolindex ($\mu\text{g/l}$)
PL-1TV	590	<10
PL-2TV	610	<10
PL-3TV	480	<10
PL-4TV	370	<10
PL-5TV	500	<10

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A vizsgált anyagok szennyezettségi határértékei a 10/2000. (VI. 2.) KöM-EüM-FVM-KHVM együttes rendelet szerint:

- **TPH:** 100 $\mu\text{g/l}$
- **Fenol:** 20 $\mu\text{g/l}$

Az eredményekből látható, hogy a fenolindex minden mintában a kimutathatósági határ alatt volt. A TPH-koncentrációk azonban a határértéket jelentősen meghaladták, jelezve a talajvíz kiterjedt szennyezettségét.

Gazdasági hatás elemzése

A rehabilitáció gazdasági előnyei

A rehabilitáció gazdasági előnyei közé tartozik az ingatlan értékének növekedése és az újbóli hasznosítás lehetősége. Az alábbi táblázat mutatja a tervezett rehabilitáció költségeit és potenciális bevételeit:

10. táblázat: A tervezett rehabilitáció költségei és potenciális bevételei

Tevékenység	Költség (ezer Ft)	Bevétel (ezer Ft)
Talajcserek és technológia	25 000	0
Ingatlanérték növekedése	0	40 000
Lakóingatlanok eladása	0	20 000
Összesen	25 000	60 000

Forrás: Saját kutatáson alapuló saját szerkesztés

A gazdasági számítások alapján a rehabilitáció nettó haszna 35 millió forint, ami a beruházási költségek kétszeresének felel meg. Ez az eredmény hangsúlyozza a kármentesítés gazdasági megtérülését.

A különböző tevékenységek költségei és bevételei jól megfigyelhetők az oszlopdiagramon, amely hangsúlyozza a rehabilitáció gazdasági megtérülését.

Következtetések

A püspökladányi esettanulmány rávilágít, hogy a vasúti talpfák szennyeződéseinek kezelése nemcsak környezetvédelmi, hanem gazdasági és társadalmi előnyökkel is jár. A szennyezés eltávolítása növeli a terület ingatlanpiaci értékét és lehetővé teszi környezetbarát technológiák alkalmazását.

A rehabilitáció gazdaságilag és társadalmilag is hasznosíthatóvá teszi a területet, és példaként szolgálhat más hasonló helyszínek helyreállítására, alátámasztva a fenntartható hulladékgazdálkodás előnyeit.

3.2.4. Esettanulmány 4.: Dunaújváros: A meddő és salak újrahasznosításának gazdasági lehetőségei

A Dunaújvárosi Dunai Vasmű meddő- és salaklerakójának rekultivációja gazdasági és társadalmi szempontból egyaránt releváns kutatási téma. A terület újrahasznosításának lehetőségei közvetlenül kapcsolódnak az alábbi hipotézisekhez:

- **H1:** Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.
- **H3:** Az érintett gazdálkodók általában az energetikai újrahasznosítást preferálják környezetbarát gazdálkodási módszerként.
- **H5:** A meddő és salak újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat, csökkentve a hulladékkezelési költségeket és potenciális bevételt generálva.

Történeti áttekintés és konkrét kérdésfelvetés

A városok kulcsszerepet játszanak a regionális fejlődésben, amit ipari beruházások és külföldi tőkebefektetések is előmozdítanak, bár ezek gyakran társadalmi egyenlőtlenségekkel járnak (Enyedi, 2012; Lengyel & Vas, 2015; Gál & Lux, 2022). A fenntartható fejlődés érdekében kiemelt az energiahatékonyság, a megújuló energiaforrásokra való áttérés és az energiaközösségek támogatása (Szép et al., 2021; Nemes & Pomázi, 2022).

Dunaújváros esete különösen érdekes a Dunai Vasmű miatt, amely meghatározó a helyi gazdaságban (Páger – Deák, 2021). A város népessége a 20. század közepén gyorsan nőtt, de az 1980-as évektől csökkenés tapasztalható. A Dunai Vasmű több mint 70 éves működése során jelentős hulladék, például salak és meddő halmozódott fel. A 2023-as felszámolási eljárás lezárultával a terület hasznosításának kérdése, különösen a megújuló energia és újrahasznosítás szempontjából, központi jelentőségűvé vált, mivel ezek környezeti és gazdasági fenntarthatóságot is biztosíthatnak.

Gazdasági lehetőségek

Naperómű telepítése

A meddő- és salaklerakók rekultivációjának egyik legígéretesebb gazdasági hasznosítási formája a naperómű telepítése. Ez a megoldás nemcsak környezetbarát, hanem hosszú távon gazdaságilag is fenntartható.

Számítások:

- **Beruházási költség:** 2 milliárd HUF.
- **Éves energiahozam:** 10 GWh.
- **Éves bevétel:** 400 millió HUF.
- **Megtérülési idő:** 5 év.

Salak újrahasznosítása útalapként

A salak útalapanyagként történő újrahasznosítása hozzájárulhat az infrastruktúra-fejlesztéshez, miközben jelentős költségcsökkentést eredményezhet az építőiparban.

Gazdasági előnyök:

- **Tárolt salak mennyisége:** 500 000 tonna.
- **1 tonna salak piaci értéke:** 5 000 HUF.
- **Potenciális bevétel:** 2,5 milliárd HUF.

Munkahelyteremtés

Az újrahasznosítási projektek várhatóan 150 új munkahelyet teremtenek a térségben, csökkentve a munkanélküliséget, és erősítve a helyi gazdaságot.

Gazdasági adatok és diagramok

11. táblázat: Naperőmű beruházás gazdasági számítása

Kategória	Érték
Beruházási költség	2 milliárd HUF
Éves energiahozam	10 GWh
Éves bevétel	400 millió HUF
Megtérülési idő	5 év

Forrás: Bencző-Lőrinc, 2023 alapján saját szerkesztés

A 11. táblázat a naperőmű beruházás gazdasági aspektusait szemlélteti. A beruházás kezdeti költsége 2 milliárd forint, amely évente 10 GWh energiát termel. Ez az energia 400 millió forintos éves bevételt generál, ami alapján a beruházás várható megtérülési ideje 5 év. A számítás rámutat a naperőmű létesítésének gazdasági életképességére és hosszú távú fenntarthatóságára.

12. táblázat: Salak újrahasznosítás gazdasági számítása

Kategória	Érték
Tárolt salak mennyisége	500 000 tonna
1 tonna salak értéke	5 000 HUF
Potenciális bevétel	2,5 milliárd HUF

Forrás: Bencző-Lőrinc, 2023 alapján saját szerkesztés

A 12. táblázat szerint a 500 000 tonna tárolt salak piaci értéke 5 000 forint/tonna, így újrahasznosítása akár 2,5 milliárd forint bevételt eredményezhet. Ez rávilágít, hogy az ipari hulladékok, például a salak, környezetvédelmi és gazdasági szempontból is jelentős értéket képviselhetnek.

Hipotézisek alátámasztása

H1 és H3: A Dunaújvárosi salak és meddő jelenlegi helyzete igazolja, hogy ezek az anyagok javarészt nem kerülnek újrahasznosításra, és az energetikai hasznosítás, mint például a naperőmű telepítése, ígéretes lehetőség a fenntarthatóság jegyében.

H5: Az újrahasznosítás (pl. salak útalapként való felhasználása) jelentős gazdasági előnyökkel járhat, hiszen csökkenti a hulladékkezelés költségeit és jelentős bevételt generál.

Következtetések és javaslatok

- 1. Körforgásos gazdaság:** A meddő és salak rekultivációja a fenntartható gazdaság szerves részét képezi, hozzájárulva a térségi energiaközösség kialakulásához.

2. Gazdasági előnyök: A naperőmű létesítése és a salak újrahasznosítása a térség gazdasági helyzetének stabilizálását és a helyi lakosság életminőségének javítását eredményezheti.

3. Társadalmi hatás: Az újrahasznosítási projektek hosszú távon hozzájárulnak a foglalkoztatottság növekedéséhez és a fenntartható fejlődés előmozdításához.

Ezek az eredmények a gazdasági és társadalmi fenntarthatóságot egyaránt erősítik, alátámasztva a kutatásban megfogalmazott hipotéziseket és a gyakorlati alkalmazás fontosságát.

3.2.5. Esettanulmány 5: Energiatárolási lehetőségek az energiaközösség számára: A vanádiumos akkumulátor lehetőségei

Magyarország sajátos éghajlati adottságai miatt a megújuló energiaforrások, például a napenergia és a szélenergia termelése időjárásfüggő és ingadozó, azonban megfelelő modellezéssel és előrejelzéssel tervezhető. Az ilyen energiaforrások teljesítménye változhat a napszakok és a meteorológiai viszonyok függvényében, ami kihívásokat jelent az energiarendszer stabilitásának fenntartásában, ugyanakkor megfelelő szabályozási és tárolási megoldásokkal ezek a kihívások kezelhetők. Az energiatarolási technológiák, például a vanádiumos folyadékkáros akkumulátorok (VRFB), kulcsszerepet játszhatnak a probléma megoldásában. Kutatásom a VRFB előnyeinek bemutatására és gazdasági, műszaki szempontjainak elemzésére irányul, szorosan kapcsolódva a fenntartható energiagazdálkodás kérdéseire.

H1: Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.

A kutatás azt feltételezi, hogy a megújuló energiaforrások termelésének ingadozásait egy hatékony energiatarolási rendszer, mint például a vanádiumos akkumulátor, kiegyensúlyozhatja, ezáltal javítva az energiabiztonságot.

H3: Az energetikai újrahasznosítás és tárolás alkalmazása elősegíti a környezetbarát gazdálkodási megoldásokat.

A vanádiumos akkumulátor, mint tiszta és fenntartható energiatarolási technológia, környezetbarát alternatívát kínál a fosszilis energiahordozók használatával szemben, és hozzájárulhat az energiahatékonyság növeléséhez.

H4: A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.

A vanádiumos akkumulátor rendszerének elemzése és bemutatása rávilágít arra, hogy a technológiai újítások milyen mértékben járulhatnak hozzá a megújuló energiaforrások szélesebb körű elfogadásához és alkalmazásához.

H5: Az energiatárolási rendszerek alkalmazása gazdasági előnyökkel járhat az energiaközösségek számára.

A rendszer gazdasági elemzése során feltételezhető, hogy a vanádiumos akkumulátor csökkenti az energiaközösségek energiaellátási költségeit, különösen a hosszú élettartama és alacsony karbantartási igénye miatt.

A kutatás célja a vanádiumos akkumulátor technológiai, gazdasági és környezeti előnyeinek alátámasztása, különös tekintettel arra, hogy milyen mértékben járulhat hozzá az energiaközösségek fenntartható és önellátó működéséhez. Ezzel a dolgozat hozzájárul a fenntartható energiagazdálkodásra vonatkozó stratégiai megoldások kidolgozásá

A vanádiumos akkumulátor működése és előnyei

A vanádiumos akkumulátor egy olyan elektrokémiai energiatároló rendszer, amely a vanádium különböző oxidációs állapotaira épül. Az energiát folyékony elektrolitokban tárolják, amelyek kénsavas oldatokban oldott vanádium-ionokat tartalmaznak. Az akkumulátor működésének alapja a vanádium ionjainak redukciója és oxidációja, amely során elektromos energia tárolható vagy nyerhető vissza.

Előnyök:

Környezeti fenntarthatóság: Az akkumulátor egyetlen aktív anyaga a vanádium, ami megakadályozza a keresztzennyeződést és növeli az élettartamot.

Hosszú élettartam: Az elektrolit nem használdik el, és magas maradványértékkel rendelkezik.

Nagy energiasűrűség: Alkalmas nagy volumenű energia tárolására.

Alacsony önkisülés: A tárolt energia minimális veszteséggel tartható fenn hosszú távon.

Moduláris felépítés: Az akkumulátor kapacitása és teljesítménye külön-külön növelhető.

A vanádiumos akkumulátor energetikai alkalmazása

Egy példán keresztül szemléltetem az energiatárolási lehetőségeket egy energiaközösség számára. Tegyük fel, hogy egy energiaközösség éves energiaigénye 200.000 kWh, amelyet 3×50 kW-os napelemes rendszerek látnak el. Ezek kiegészülnek egy 50 kW kapacitású szigetüzemű rendszerrel, amelyhez vanádiumos akkumulátorokat alkalmazunk.

A vanádiumos akkumulátor:

- kiegyenlíti az időjárási és termelési ingadozásokat,
- lehetővé teszi a felesleges energia tárolását és későbbi felhasználását,
- stabilizálja az energiaközösség energiaellátását.

A vanádiumos akkumulátor működési elvét lásd! a mellékletbe. (Egy illusztrált diagram mutatja be az akkumulátor fő komponenseit és működését, beleértve az elektrolitköröket, a protoncserélő membránt, valamint az energiaáramlás irányát töltés és kisütés közben.)

Gazdasági elemzés

Költség-összehasonlítás

A vanádiumos akkumulátor alkalmazása gazdaságilag is előnyös. Az alábbi táblázat összehasonlítja a vanádiumos akkumulátor költségeit más energiatárolási rendszerekkel:

13.táblázat: A vanádiumos akkumulátor költségeinek összehasonlítása más energiatárolási rendszerekkel

Rendszer	Telepítési költség (EUR/kWh)	Élettartam (év)	Karbantartási költség (EUR/év)
Vanádiumos akkumulátor	500-800	20-25	Alacsony
Lítium-ion akkumulátor	300-500	8-10	Közepes
Ólomsavas akkumulátor	150-300	5-7	Magas

Forrás: saját szerkesztés saját kutatás alapján, 2024

Megtérülési Számítások

Egy 50 kW-os VRFB akkumulátoros rendszer költségstruktúrája:

- **Telepítési költség:** $500 \text{ EUR/kWh} \times 50 \text{ kW} = 25.000 \text{ EUR}$
- **Karbantartási költség (20 év):** 500 EUR
- **Összköltség (20 évre):** 25.500 EUR

A rendszer éves energiatárolási kapacitása:

- $50 \text{ kW} \times 12 \text{ óra/nap} \times 365 \text{ nap} = 219.000 \text{ kWh}$
- Az energiatárolás költsége: $25.500 \text{ EUR} / (50 \text{ kW} \times 12 \text{ óra/nap} \times 365 \text{ nap} \times 20 \text{ év}) = 0,0058 \text{ EUR/kWh}$

Gazdasági hatások

A VRFB rendszer megtérülése az energiaköltség-megtakarításból származik. Az energiaközösség évente 10.000 EUR-t takaríthat meg a rendszer használatával, ami 2,5 év alatt fedezi a beruházási költségeket.

Az adatokból látható, hogy bár a vanádiumos akkumulátor kezdeti költsége magasabb lehet, hosszú élettartama és alacsony karbantartási költsége miatt összességében gazdaságosabb megoldást kínál.

Jogi és szabályozási környezet

A vanádiumos akkumulátor alkalmazása összhangban áll a hazai és nemzetközi jogszabályokkal, amelyek a megújuló energiaforrások elterjedését támogatják. Magyarországon a háztartási méretű

kiserőművekre (HMKE) vonatkozó szabályozások kedvező feltételeket biztosítanak az ilyen rendszerek telepítéséhez.

Fontos jogszabályok:

- **2007. évi LXXXVI. törvény** a villamos energiáról: elősegíti a megújuló energiaforrások integrálását.
- **MSZ EN szabványok:** meghatározzák a napelemes rendszerek és energiatárolók telepítésének műszaki követelményeit.

Jogszabályok szövegeit lásd! az M2 További Mellékletben.

Karbantartás és fenntartás

A vanádiumos akkumulátorok minimális karbantartást igényelnek. Az elektrolit hosszú távon stabil, és az egyes komponensek moduláris felépítése könnyű szervizelhetőséget biztosít. Egy 1000 tagot számláló energiaközösség esetében néhány fős szakképzett technikai személyzet elegendő a rendszer folyamatos felügyeletéhez és időszakos karbantartásához, különösen automatizált távfelügyeleti megoldások mellett. Emellett a karbantartási és üzemeltetési feladatok helyi vállalkozók vagy technikusok bevonásával is elláthatók, ami lehetőséget teremt a helyi munkaerő számára, és hozzájárul a fenntartható fejlődéshez.

Következtetés

A vanádiumos akkumulátorok műszaki, gazdasági és fenntarthatósági előnyeikkel hatékony megoldást kínálnak az energiaközösségek számára:

Energiabiztonság: Stabilizálják a megújuló energiaforrások termelési ingadozásait.

Gazdasági hatékonyság: Hosszú élettartamuk és alacsony üzemeltetési költségeik révén költséghatékonyak, beruházásuk megtérül.

Fenntarthatóság: Környezetbarát működésük csökkenti a fosszilis energiahordozók függőségét.

A technológia költséghatékonyasága és környezetbarát jellege indokolja széles körű alkalmazását, előmozdítva az energiafüggetlenséget és a fenntartható energiagazdálkodást.

3.2.6. Esettanulmányok összefoglalása és következtetések

Az esettanulmányokban bemutatott példák révén a dolgozat részletes betekintést nyújtott a vasúti talpfák újrahasznosításának műszaki, gazdasági és környezeti lehetőségeibe. Az alábbiakban összegezem az egyes esettanulmányok főbb eredményeit és a levonható következtetéseket.

Diósgyőr: A vasúti infrastruktúra újrahasznosításának történeti és jelenkori tanulságai

A diósgyőri esettanulmány feltárta, hogy a régi vasúti infrastruktúra bontása során keletkező anyagokat, mint például a talpfák, elsősorban tárolták, és csak minimálisan hasznosították újra. Ez rávilágított arra, hogy a helyi újrahasznosítási kapacitások hiánya és a szabályozási környezet

nehézségei akadályozzák a hatékony anyagkezelést. A gazdasági számítások szerint azonban a helyszíni újrafeldolgozás, például a talpfák energetikai célú hasznosítása, költséghatékonyabb lehetett volna, mint a szállítás és lerakás.

Budakalász: A kis méretű telephelyek gazdasági kihívásai

Budakalász példája a kis léptékű hulladékgazdálkodási problémákra mutatott rá. A telephelyen keletkező talpfákat nem szisztematikusan kezelték, ami jelentős környezeti kockázatokat eredményezett. A kutatás rávilágított arra, hogy a kisebb telephelyek számára centralizált újrahasznosítási központok létrehozása lehetne a megoldás, amely csökkentené az egyéni gazdálkodók költségeit és javítaná az újrahasznosítás hatékonyságát.

Püspökladány: A konzerválási gyakorlatok történeti hatása

Püspökladány esettanulmánya rámutatott arra, hogy a konzerválási gyakorlatok – például a kreozot alkalmazása – hosszú távon súlyos környezeti problémákhoz vezettek. A konzerválási technikák miatt a használt talpfák veszélyes hulladékként való kezelése elkerülhetetlen, ugyanakkor a technológiai fejlesztések lehetővé tehetik ezek részleges ártalmatlanítását és hasznosítását. A tanulság, hogy a fenntarthatóbb tartósítási technológiák elterjedése csökkentheti a jövőbeli környezeti terheket.

Dunaújváros: A meddő és salak újrahasznosításának gazdasági lehetőségei

A Dunaújvárosi esettanulmány rávilágított arra, hogy a meddő- és salaklerakók rekultivációja jelentős gazdasági előnyöket kínálhat. A naperómű telepítése és a salak útalapanyagként történő újrahasznosítása nemcsak fenntartható energiaforrást, hanem több milliárd forintos bevételi lehetőséget is jelenthet. A projektek továbbá 150 új munkahelyet teremthetnek, erősítve a helyi gazdaságot és csökkentve a munkanélküliséget.

Energiatárolás: A vanádiumos akkumulátor lehetőségei

A vanádiumos akkumulátorok energetikai közösségek számára nyújtott előnyei az esettanulmány kulcsfontosságú eredményei közé tartoztak. Az újrafelhasználható anyagok integrációja a fenntartható energiagazdálkodásba olyan innovatív példákat mutat, amelyek az újrahasznosítás és a tiszta energiatermelés ötvözésével segíthetik a környezetbarát gazdasági modellek elterjedését. Az elemzés megmutatta, hogy ezek az eszközök nemcsak technológiailag életképesek, hanem gazdaságilag is megtérülnek hosszú távon.

Következtetések az esettanulmányok alapján

1. **Újrahasznosítási kapacitások fejlesztése:** Az esettanulmányok megerősítették, hogy a helyi újrahasznosítási infrastruktúra fejlesztése kulcsfontosságú a vasúti talpfák fenntartható kezeléséhez. A decentralizált központok létrehozása jelentős mértékben csökkentheti a szállítási és ártalmatlanítási költségeket.

2. **Innovatív technológiák bevezetése:** Az olyan technológiák, mint a remediációs eljárások és a vanádiumos akkumulátorok, új lehetőségeket teremtenek a hulladék gazdasági és környezeti értékének maximalizálására. Ezek alkalmazása elősegítheti az újrahasznosítási arány növekedését.
3. **Szabályozási környezet javítása:** A kutatás rámutatott, hogy a szabályozási környezet átalakítása elengedhetetlen az innovatív újrahasznosítási technológiák szélesebb körű elterjedéséhez. A szabályozásoknak ösztönözniük kell a veszélyes hulladék újrahasznosítását és a fenntartható gazdálkodási megoldások alkalmazását.
4. **Gazdasági előnyök és környezeti hatások összehangolása:** Az esettanulmányok alátámasztották, hogy az újrahasznosítás nemcsak környezetvédelmi, hanem gazdasági szempontból is előnyös. Az innovatív megoldások alkalmazása hosszú távon megtakarításokat eredményez, miközben csökkenti a környezeti károkat.
5. **Társadalmi elfogadottság növelése:** Az újrahasznosítási gyakorlatok társadalmi elfogadottságának növelése érdekében elengedhetetlen a széles körű tájékoztatás és az érintettek bevonása. Az esettanulmányok példái szerint a sikeres projektek jellemzően olyan közösségekben valósultak meg, ahol a társadalmi támogatottság erős volt.

Az esettanulmányok tapasztalatai megerősítik, hogy a vasúti talpfák újrahasznosítása nemcsak fenntarthatósági, hanem gazdasági és társadalmi előnyökkel is járhat. Ezek az eredmények iránymutatást nyújtanak a jövőbeni kutatások és gyakorlati fejlesztések számára.

3.3.Primer kutatás eredményei: A remediációs eljárás: Innovatív technológiák szerepe

Az olaj- és vegyi szennyezések kezelése kritikus kihívás a környezetvédelem területén. A hagyományos kármentesítési módszerek – mint például a talajcsere és a szennyezett föld ártalmatlanítása – rendkívül költségesek és jelentős környezeti terhelést okoznak. Ezért egyre nagyobb figyelem irányul az alternatív, környezetbarát technológiák felé, amelyek költséghatékonyabbak és kevésbé terhelik a környezetet.

A bemutatott primer kutatás célja a biológiai remediáció hatékonyságának és gazdasági előnyeinek bemutatása. Ez a technológia az olajszennyezések kezelésére szolgál mikroorganizmusok felhasználásával, amelyek a szénhidrogéneket ártalmatlan összetevőkre bontják le. Az esettanulmány a kutatás H3 és H5 hipotéziseihez kapcsolódik:

- **H3:** Az érintett gazdálkodók környezetbarát remediációs technológiákat választanak, előtérbe helyezve a biológiai megoldásokat.
- **H5:** A biológiai remediáció gazdasági előnyökkel jár, csökkentve a hulladékkezelés költségeit és növelve a fenntarthatóságot.

A remediációs eljárás működési alapelvei

A remediáció (latinul: „meggyógyítás”) az emberi beavatkozással végzett kármentesítési eljárásokat foglalja magában. Leggyakrabban talaj, talajvíz és üledék szennyeződéseinek kezelésére alkalmazzák (Hashim et al., 2011). A remediációs technológiák fizikai, kémiai és biológiai alapú módszereket foglalnak magukban. A biológiai remediáció előnye, hogy a természetben megtalálható mikroorganizmusok vagy növények enzimátikus bontótevékenységét hasznosítja, elkerülve a környezeti elemek eredeti funkcióinak károsodását.

Az eljárás során a szennyezett területek in situ vagy ex situ kezelése valósulhat meg. Az in situ technológiák előnye, hogy a szennyezett föld kitermelése nélkül hajthatók végre, ezáltal jelentős földmunkaköltségek takaríthatók meg.

Módszerek

A kutatás során olajjal szennyezett talajmintákat vizsgáltam. A minták kétféle módon lettek kezelve:

1. Rétegzett talajban, amelyet fűvel borítottam be.
2. Víz alatti talajkezeléssel.

Mindkét esetben mikrobiológiai törzsoldattal oltottam be a mintákat, majd rendszeres mintavételezéssel ellenőriztem a szennyezőanyagok koncentrációját. A vizsgálatokhoz a MOL Nyrt. hajdúszoboszlói laboratóriumában akkreditált TPH-GC módszert alkalmaztam.

Eredmények

TPH szintek csökkenése

A vizsgálati eredmények jelentős szennyezőanyag-csökkenést mutattak mindössze öt hónap alatt:

14. táblázat: A vizsgálati eredmények TPH szintjei

Mintavételi pont	Kezdeti TPH (g/kg)	Végső TPH (g/kg)
Feketeföld rétegzett (I)	31,5	0,44
Feketeföld víz alatt (II)	26,3	1,74
Sárgaföld rétegzett (III)	10,1	1,74
Sárgaföld víz alatt (IV)	11,5	5,65

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

Költséghatékonyság elemzése

Az alternatív biológiai remediációs módszert összehasonlítottam a hagyományos földkitermeléses technológiával. Az elemzés alapján a bioremediáció jelentős költségmegtakarítást eredményez:

15.táblázat: Költséghatékonysági elemzés (Az alternatív biológiai remediációs módszer összehasonlítása a hagyományos földkitermeléses technológiával)

Kármentesítési módszer	Kezdő költség (€)	Üzemeltetési költség (€)	Teljes költség (€)	Hatékonyság (%)
Hagyományos földkitermelés	50 000	20 000	70 000	85
Bioremediáció	20 000	10 000	30 000	90

Forrás: Saját kutatás alapján saját szerkesztés

A költségelemzés rámutat arra, hogy a bioremediáció átlagosan 57%-kal alacsonyabb költséggel valósítható meg, miközben hatékonysága meghaladja a hagyományos módszerekét.

Fenntarthatósági szempontok

A biológiai remediáció nemcsak költséghatékonyságban, hanem környezeti előnyökben is felülmúlja a hagyományos technológiákat. A helyben történő kezelés csökkenti a szállításból származó károsanyag-kibocsátást, valamint a hulladékkezeléshez szükséges energiafelhasználást.

Gazdasági modellezés: Megtérülési időszak (ROI)

Az elemzések alapján a biológiai remediáció alkalmazása nemcsak költségcsökkentést eredményez, hanem jelentős megtérülést is biztosít. Egy 1 hektáros terület kármentesítésének vizsgálata alapján:

Hagyományos módszer teljes költsége: 70,000 €

Bioremediáció teljes költsége: 30,000 €

Különbség (beruházás különbsége): 40,000 €

Amennyiben a bioremediáció alkalmazása legalább 50%-kal csökkenti az éves környezeti kockázatkezelési költségeket, akkor az alacsonyabb beruházási költségből eredő előny 1 éven belül megtérül. Ez azt jelenti, hogy a bioremediációval elérhető költségcsökkentés mértéke már az első évben kiegyenlíti a technológia bevezetésével járó beruházást, így a megtérülési időszak (ROI) kevesebb mint 12 hónap.

Következtetések

A primer kutatás eredményei egyértelműen alátámasztják, hogy a biológiai remediáció környezetbarát és gazdaságilag fenntartható alternatívát kínál az olaj- és vegyi szennyeződések kezelésére. Az eljárás alacsonyabb költségei, a csökkentett földmunka és a magasabb hatékonyság elősegítik szélesebb körű alkalmazását, különösen ipari környezetben. A helyben történő kezelés nemcsak jelentős költségmegtakarítást eredményez, hanem minimalizálja a környezeti terhelést is,

így a technológia kiemelten fontos a klímaváltozás és a globális fenntarthatósági célok szempontjából.

Az eredmények megerősítik a H3 és H5 hipotéziseket, rámutatva, hogy a fenntartható technológiák egyszerre nyújtanak környezeti és gazdasági előnyöket. Javasolt a biológiai remediáció további fejlesztése és széles körű bevezetése, különösen olyan területeken, ahol a hagyományos megoldások költségesek vagy károsak a környezetre. A módszer alkalmazása az ipari területeken nemcsak az olajszennyezések kezelésére bizonyulhat hatékonynak, hanem általánosan hozzájárulhat a fenntarthatóbb jövő megteremtéséhez.

Hipotézisek értékelése

A kutatás során megfogalmazott hipotéziseket részletesen értékeltem az elvégzett elemzések és az eredmények alapján. Az alábbiakban bemutatom, hogy a kutatási adatok és megfigyelések alapján ezek a hipotézisek milyen mértékben igazolódtak vagy cáfolódtak meg.

H1: *Magyarországon a veszélyes hulladéknak minősülő használt vasúti talpfák jelentős része nem kerül újrahasznosításra.*

Értékelés: Ez a hipotézis teljes mértékben igazolódott. A kutatás eredményei szerint a Magyarországon keletkező használt vasúti talpfák túlnyomó része veszélyes hulladékként kerül kezelésre, és nem történik meg az újrahasznosításuk olyan mértékben, amely hozzájárulna a fenntartható gazdálkodáshoz. A talpfák jelenlegi kezelésére vonatkozó szabályozási környezet és az újrahasznosítás technológiai korlátai akadályozzák az anyagok újrafeldolgozását. Az adatok szerint a talpfák nagy része lerakókba kerül, vagy olyan módon kezelik, amely nem felel meg a körkörös gazdaság elveinek.

H2: *A Németországban, Hollandiában, Svájcban, Lengyelországban és Braziliában alkalmazott használt vasúti talpfák újrahasznosítási gyakorlata jelentős eltéréseket mutat a Magyarországon alkalmazott gyakorlathoz képest.*

Értékelés: Ez a hipotézis részben igazolódott. A kutatás során vizsgált országok közül Németország, Hollandia és Svájc újrahasznosítási gyakorlatai előrehaladottabbak, mint a hazai példák: ezekben az országokban mechanikai feldolgozást, energetikai hasznosítást és szigorú környezetvédelmi előírásokat alkalmaznak. Ezzel szemben Lengyelország és Brazília gyakorlatai nagyfokú hasonlóságot mutatnak a magyar gyakorlattal, elsősorban a szabályozási és technológiai hiányosságok miatt.

H3: *Az érintett, újrahasznosítással megbízott gazdálkodók csak az energetikai újrahasznosítást választják környezetbarát gazdálkodási módszernek.*

Értékelés: Ez a hipotézis részben igazolódott. A kutatás kimutatta, hogy Magyarországon és számos más országban az újrahasznosítással megbízott gazdálkodók jellemzően az energetikai

hasznosítást részesítik előnyben. Ennek oka, hogy az energetikai feldolgozás technológiailag egyszerűbb, gyorsabb, és kevesebb szabályozási akadályba ütközik, mint más környezetbarát módszerek, például a mechanikai újrahasznosítás. Ugyanakkor a kutatás rávilágított arra is, hogy a mechanikai feldolgozás – ha a szabályozási akadályokat sikerül leküzdeni – jelentős potenciált hordoz mind gazdasági, mind környezeti szempontból, különösen az építőipari felhasználás terén.

H4: *A kidolgozott újrahasznosítási prototípus alkalmazása növeli a használt vasúti talpfák fenntartható feldolgozásának arányát az elkövetkező években.*

Értékelés: Ez a hipotézis igazolódott, bár további kutatásokat igényel a prototípus gyakorlati alkalmazásának értékelése. A kutatás során kidolgozott prototípus jelentős mértékben hozzájárulhat a fenntartható hulladékgazdálkodás megvalósításához, különösen a vasúti talpfák újrahasznosítása terén. A prototípus integrálja a környezetbarát technológiákat, és a körkörös gazdaság elvei mentén kínál megoldásokat. A társadalmi és szakmai visszajelzések alapján a prototípus alkalmazása elősegítheti a fenntartható gondolkodásmód szélesebb körű elterjedését, különösen az ipari szereplők és a szabályozó hatóságok körében.

H5: *A használt vasúti talpfák újrahasznosítása gazdasági előnyökkel járhat a vasúttársaságok számára, mivel csökkenti a hulladékkezelési költségeket, és lehetőséget teremt bevétel realizálására az újrahasznosított anyagok értékesítése révén.*

Értékelés: Ez a hipotézis teljes mértékben igazolódott. A kutatás gazdasági modellek és esettanulmányok alapján egyértelműen kimutatta, hogy a használt vasúti talpfák újrahasznosítása jelentős költségcsökkentést eredményezhet a vasúttársaságok számára. Az elszállítási és tárolási költségek megszüntetése mellett az újrahasznosított anyagok (például építőanyagok vagy energiahordozók) értékesítése további bevételeket generálhat. A nemzetközi példák és a kutatás során végzett számítások szerint egy tonna újrahasznosított talpfa akár több tízezer forintos gazdasági hasznot jelenthet. Ez az eredmény alátámasztja, hogy az újrahasznosítás gazdasági előnyei túlmutatnak a közvetlen költségmegtakarításon, és hozzájárulnak a fenntartható gazdálkodás hosszú távú sikeréhez.

Összegzés

A kutatás során megfogalmazott hipotézisek döntő többsége igazolást nyert, amelyek alátámasztják, hogy a vasúti talpfák újrahasznosítása nemcsak gazdasági és környezetvédelmi szempontból fontos, hanem hozzájárulhat a fenntartható hulladékgazdálkodás fejlődéséhez. A kutatás rávilágított a jelenlegi szabályozási környezet hiányosságaira, ugyanakkor számos technológiai és gazdasági lehetőséget azonosított, amelyek a jövőben elősegíthetik az újrahasznosítás hatékonyabbá tételét. Ezek az eredmények megalapozzák a további kutatásokat és fejlesztéseket a fenntartható gazdasági modellek és technológiák területén.

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Következtetések

A kutatás alaposan feltárta a vasúti talpfák újrahasznosításával kapcsolatos lehetőségeket, korlátokat és a jelenlegi gyakorlatban rejlő hiányosságokat. Az eredmények azt mutatják, hogy a fenntartható hulladékgazdálkodás nemcsak környezeti, hanem gazdasági szempontból is kulcsfontosságú, különösen az állami tulajdonú vállalatok, például a MÁV és a BKV esetében.

A jelenlegi gyakorlatok során a használt vasúti talpfák veszélyes hulladékként való kezelése jelentős költségekkel jár, ami gazdasági szempontból hosszú távon fenntarthatatlan. Például az elszállítási és tárolási költségek évente milliós nagyságrendűek, miközben a megfelelő technológiai újrahasznosítással ezek az anyagok gazdasági értéket teremthetnének. A kutatás szerint egy tonna használt talpfá újrahasznosításával több tízezer forintos költségmegtakarítás érhető el, miközben a visszanyert anyagok értékesítése további bevételeket generálhat.

A kutatás másik fontos következtetése, hogy a technológiai lehetőségek adottak, azonban a szabályozási környezet nem támogatja kellőképpen ezek alkalmazását. A veszélyes hulladékokra vonatkozó szigorú előírások akadályozzák a talpfák újrahasznosítását, mivel az ilyen anyagok kezelésére és hasznosítására kizárólag speciális engedéllyel rendelkező vállalatok jogosultak. Ez korlátozza az innovációt, és megnehezíti a fenntartható megoldások bevezetését.

Harmadszor, a társadalmi és környezeti elvárások egyre növekvő nyomást gyakorolnak a vállalatokra, hogy fenntarthatóbb gyakorlatokat alkalmazzanak. Az újrahasznosítás nemcsak gazdasági előnyökkel járhat, hanem hozzájárulhat a vállalatok pozitív társadalmi megítéléséhez, amely hosszú távon erősítheti piaci pozíciójukat és támogatottságukat. Az olyan vállalatok, amelyek proaktívan lépnek a fenntarthatóság irányába, versenyelőnyre tehetnek szert a piacon.

Nemzetközi összehasonlításban is jelentős eltérések tapasztalhatók a hulladékgazdálkodási gyakorlatok között. Például a német és holland vasúttársaságok már sikeresen alkalmazzák az újrahasznosítási technológiákat, amelyek nemcsak csökkentik a hulladék mennyiségét, hanem gazdasági hasznot is hoznak. Ezek az eredmények rámutatnak arra, hogy a szabályozási és gazdálkodási gyakorlatok fejlesztésével Magyarországon is hasonló eredmények érhetők el.

Javaslatok

A kutatás alapján konkrét és megvalósítható javaslatokat fogalmaztam meg a vasúti talpfák újrahasznosításának hatékonyabbá tételére. A dolgozatban ismertetett javaslatok a saját fejlesztéseken, valamint a megelőző szakirodalmi és empirikus kutatások eredményein alapulnak

Az első és legfontosabb lépés a **szabályozási keretek reformja**. Az újrahasznosítási folyamatokat jelenleg akadályozó szabályozási korlátokat enyhíteni kell, különösen a veszélyes hulladékokra vonatkozó előírások terén. Javaslom egy olyan rugalmasabb szabályozási modell kialakítását, amely lehetővé teszi a vasúti talpfák minősítésének megváltoztatását – például másodlagos nyersanyaggá vagy építőipari alapanyaggá történő átminősítésüket –, amennyiben azok megfelelnek előzetes környezeti vizsgálatoknak.

Ez a megközelítés jelentősen csökkentené a hulladékkezelési költségeket, mivel nem lenne szükség a talpfák költséges égetésére vagy lerakására, hanem gazdaságilag hasznosítható formában kerülhetnének vissza az anyagkörforgásba (pl. zajvédő falak, útalap, burkolatelem).

Továbbá, az új besorolás ösztönözné a technológiai innovációt is: a vállalatok számára világos, kiszámítható jogi környezetet teremtene, amelybe érdemes beruházni. Ha a szabályozás lehetőséget ad az újrafeldolgozott anyag termékké minősítésére, az kutatás-fejlesztési és gyártási beruházásokat generálhat, például újrahasznosító üzemek vagy speciális kezelési eljárások fejlesztése révén.

A technológiai innovációk támogatása szintén elengedhetetlen. Az állami támogatások és kutatási programok révén elő kell segíteni az újrahasznosítási technológiák fejlesztését és elterjesztését. Kiemelten fontos lenne olyan pilotprojektek indítása, amelyek során tesztelhetőek a vasúti talpfák újrahasznosítására irányuló innovatív módszerek. Ilyenek lehetnek például:

- mechanikai aprítás és préseles, amely során a faanyag szerkezete megtartható, és burkolóelemként, kompozit töltőanyagként vagy útalapként hasznosítható;
- pirolízis vagy alacsony hőmérsékletű termikus kezelés, amely eltávolítja a szennyező anyagokat (pl. kreozot), így a faanyag veszélyes hulladék besorolása megszüntethető;
- biológiai kezelés (pl. mikrobiológiai bontás vagy fitoremediáció), amely természetes úton csökkenti a toxikus anyagok koncentrációját;
- illetve újrahasznosított anyag-alapú kompozit termékek (pl. zajvédő falpanelek, térburkoló elemek, támfal-elemek) fejlesztése, amelyben a talpfák daráléka töltőanyagként szolgálhat.

Ezek a technológiák nemcsak környezetkímélők, hanem gazdaságilag is megtérülők, ha megfelelő szabályozás és piaci támogatás társul melléjük. A cél tehát nem csupán a hulladékkezelés, hanem új, értékes termékek előállításának, amelyek a körforgásos gazdaság részévé válhatnak.

A fenntartható vállalati irányítási gyakorlatok elterjesztése érdekében javaslom a **környezetirányítási rendszerek szélesebb körű alkalmazását a vasúti és közlekedési vállalatoknál**. Az ISO 14001 tanúsítvány megszerzése nemcsak a fenntarthatósági célok elérését támogatja, hanem növeli a vállalatok hitelességét és versenyképességét is. Az ilyen rendszerek alkalmazása hozzájárulhat ahhoz, hogy a vállalatok hatékonyabban gazdálkodjanak erőforrásaikkal, miközben csökkentik környezeti terhelésüket.

Javaslom továbbá a **nemzetközi jó gyakorlatok és tapasztalatok magyarországi adaptálását**.

A kutatás során feltárt példák, különösen a német, osztrák és holland vasúttársaságok újrahasznosítási módszerei, olyan konkrét megoldásokat tartalmaznak, amelyek sikeresen csökkentették a hulladék mennyiségét, valamint a hulladékkezelési költségeket.

Például:

- A Deutsche Bahn (DB AG) mechanikai feldolgozó üzemeket működtet, ahol a faaljakat szeparálják, darálják és újrahasznosítható anyaggá alakítják. Ennek egyik eleme – a vasúti talpfák darálékának energetikai hasznosítása – hazai viszonyok között is alkalmazható lenne, például cementgyárakban vagy biomassza-erőművekben.
- Az ÖBB (Osztrák Szövetségi Vasutak) egyes telephelyein már alkalmazzák az előminősítési rendszert, ahol a használt faaljakat szennyezettségi szint alapján külön osztályozzák. Ez a gyakorlat Magyarországon is bevezethető lenne, ezzel lehetővé téve, hogy az enyhébben szennyezett faanyagok ne minősüljenek automatikusan veszélyes hulladéknak.
- A holland vasutaknál az újrahasznosítási stratégiát kifejezetten a körforgásos gazdaság logikája mentén dolgozták ki: itt a cél az anyag maximális visszaforgatása és a hulladékmentesség. Az ehhez szükséges vállalati szemléletformálás és partnerségi modell átvétele Magyarországon is elősegítheti a fenntartható vasúti gazdálkodás elterjedését.

Együttműködések kialakítása nemzetközi szervezetekkel, például az Európai Vasúti Szövetséggel (UIC), elősegítheti a fenti tapasztalatok és módszerek megosztását, valamint az innovációk gyorsabb bevezetését a hazai gyakorlatba. Különösen indokolt lenne olyan közös EU-s projektben való részvétel, amely a faaljak kezelésére és újrahasznosítására fókuszál.

További gyakorlati alkalmazási lehetőségek

A kutatás eredményei alapján lehetőség nyílik további gyakorlatorientált megoldások megfogalmazására is, amelyek a vasúti talpfák újrahasznosítását még hatékonyabbá és környezetkímélőbbé tehetik.

A vasúti talpfák újrahasznosításának integrálása a MÁV körforgásos gazdálkodási rendszerébe: Javasolt, hogy a talpfák kezelése ne elkülönült hulladékként, hanem integrált erőforrásként jelenjen meg a vállalat körforgásos szemléletű stratégiájában, ezzel biztosítva az anyagáram hosszú távú fenntarthatóságát.

Szennyezettségi osztályozási rendszer bevezetése: Célszerű lenne a talpfák szennyezési szintje alapján történő kategorizálása (pl. nem szennyezett, enyhén szennyezett, erősen szennyezett), amely megalapozná azok differenciált újrahasznosítását a legköltséghatékonyabb módon (pl. építőipari töltőanyagként, energetikai célra, stb.).

A modell kiterjesztése más iparágakra: Az újrahasznosítási megközelítések és eljárások más ipari területeken is adaptálhatók, például a nehéziparban vagy az energetikában keletkező fa- vagy vegyes hulladékok kezelése során, ezzel elősegítve a körforgásos gazdaság elveinek szélesebb körű megvalósítását.

Hasznosíthatóság a szakpolitikában és a felsőoktatásban: Az értekezés eredményei nemcsak ipari szereplők, hanem szakpolitikai döntéshozók számára is értékes iránymutatást adhatnak a vasúti hulladékgazdálkodás reformjához. Emellett oktatási célra is alkalmazhatók, különösen a környezettudományi, közlekedési és fenntarthatósági képzések keretében, mint gyakorlati esettanulmány.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A kutatás során számos új tudományos eredményt sikerült elérni, amelyek hozzájárulnak a vasúti talpfák újrahasznosításának gazdasági és környezetvédelmi lehetőségeinek feltárásához, valamint a fenntartható hulladékgazdálkodási gyakorlatok kialakításához. Az alábbiakban bemutatom a kutatás legfontosabb eredményeit, amelyek nemcsak a magyarországi hulladékgazdálkodási gyakorlatok fejlesztésében, hanem nemzetközi szinten is relevánsak lehetnek.

1. A vasúti talpfák újrahasznosításának gazdasági modellje

Az egyik legfontosabb tudományos eredmény egy gazdasági modell kidolgozása, amely a vasúti talpfák újrahasznosításának költség-haszon elemzésére épül. A modell támogatja a döntéshozókat az újrahasznosítás és hulladéklerakás alternatíváinak összehasonlításában.

Fő elemei:

- **Költségek:**
 - K_1 : Veszélyes hulladék kezelésének költsége
 - K_2 : Újrahasznosítás technológiai költsége
 - K_3 : Logisztikai költségek
- **Hasznok:**
 - H_1 : Újrahasznosított termék eladási értéke
 - H_2 : Elkerült hulladékkezelési díj

Megtérülés számítása:

- $ROI = \text{Kezdő beruházás} / \text{Éves nettó haszon}$
- $NGR = (H_1 + H_2) - (K_1 + K_2 + K_3)$

A modell Excel-sablonban is elérhető különböző scenáriók elemzésére.

Következtetések: Az újrahasznosítás költsége 40–60%-kal alacsonyabb lehet a hulladéklerakásnál, a piaci árbevétel pedig részben fedezheti a költségeket. A megtérülés nagyobb projektnél 1–2 év. Az eredmény gazdasági és környezetvédelmi szempontból is jelentős.

2. Technológiai innovációk az újrahasznosításban

A kutatás során a vasúti talpfák újrahasznosítására alkalmas technológiák – mechanikai feldolgozás, termikus kezelés és biológiai bontás – összehasonlító elemzését végeztem el, magyar viszonyokra adaptált értékelési szempontrendszer alapján.

Az eredmények szerint:

- A **mechanikai feldolgozás** (pl. útalap, zajvédő falak elemei) a leggazdaságosabb és legkörnyezetkímélőbb megoldás, 30–40%-os költségmegtakarítással.
- A **termikus hasznosítás** (pirolízis, biomassza-erőmű) energetikai potenciált hordoz, különösen energetikai önellátás szempontjából.

- A **biológiai bontás** környezetbarát, de jelenleg gazdaságilag kevésbé versenyképes.

Tudományos újdonság:

- Elsőként készült komplex, több technológiát összehasonlító értékelés magyar kontextusban.
- Az eredmények közvetlenül felhasználhatók a fenntartható vasúti hulladékgazdálkodásban.

3. A szabályozási környezet elemzése és javaslatok

A kutatás során részletesen vizsgáltam a vasúti talpfák újrahasznosítására vonatkozó szabályozási környezetet, és feltártam a jogi-adminisztratív akadályokat.

Tudományos újdonság:

Új minősítési rendszert dolgoztam ki a talpfák veszélyes hulladékból másodlagos nyersanyaggá való átminősítésére, három kategóriával:

1. Energetikai hasznosításra alkalmas,
2. Mechanikai feldolgozásra előkészíthető,
3. Előkezelést követően inert hulladékként kezelhető.

A rendszer figyelembe veszi a szennyezettséget, a kémiai összetételt, a tárolási időt és az újrahasznosítási technológiákat.

Jelentőség:

Elsőként kínál gyakorlati alkalmazásra szánt minősítési megközelítést Magyarországon, amely csökkentheti a hulladékkezelési költségeket és javíthatja az erőforrás-hatékonyságot, konkrét szabályozási reformjavaslatokkal kiegészítve.

4. Nemzetközi összehasonlítás és adaptáció

A kutatás újdonsága a nemzetközi hulladékgazdálkodási gyakorlatok részletes elemzése és magyarországi adaptációs javaslatok kidolgozása.

Fő megállapítások:

- A német, holland, svájci, osztrák és skandináv példák igazolják, hogy szigorú környezetvédelmi előírások mellett is növelhető az újrahasznosítás és csökkenthetők a költségek.
- A vizsgálat eredményeként egy strukturált adaptációs mátrix és költség-haszon elemzés készült, amely figyelembe veszi a magyar szabályozási, ipari és piaci adottságokat.
- Kiemelt figyelmet kapott a jogi kompatibilitás, a technológiai bevezethetőség, a gazdasági megtérülés és az együttműködési lehetőségek értékelése.

A kutatás nem csupán példák átvételére, hanem tudományosan megalapozott lokalizációra törekszik, hozzájárulva a vasúti ágazat körforgásos gazdaságának fejlődéséhez Magyarországon.

5. A fenntarthatóság integrálása a vállalatirányításba

A kutatás során egy keretrendszert dolgoztam ki, amely segíti a vasúttársaságokat a fenntarthatósági szempontok vállalatirányításba integrálásában.

Fő megállapítások:

- Az ISO 14001 alkalmazása növeli a működési hatékonyságot és csökkenti a környezeti terhelést.
- A fenntarthatósági szempontok stratégiai beépítése javítja a pénzügyi teljesítményt és a piaci pozíciót.
- A CSR-keretek növelhetik a társadalmi elfogadottságot.

A kutatás újdonsága egy vasúttársaságokra szabott, konkrét mutatókon alapuló modell, amely objektív fenntarthatósági teljesítménymérést és tudatos döntéshozatalt tesz lehetővé.

6. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI

1 Cikk

1. BENCZŐ L., TÓTH T., TAKÁCS P., BARANYAI G. (2020): *A vállalati napenergia termelés feltételrendszere*. STUDIA MUNDI - ECONOMICA, 7(4), pp. 24–33.
2. BENCZŐ L., TÓTH T., TAKÁCS P., BARANYAI G. (2020): *Mi lehet a háttérben? Van valami a háttérben?* STUDIA MUNDI - ECONOMICA, 7(4), pp. 16–23.
3. BENCZŐ L., BARANYAI G., PINTÉR ZS., TÓTH T., BUJDOSÓ Z. (2022): *Combining green energy production with hazardous waste recycling: Railway sleepers as support of photovoltaic systems*. ECOCYCLES, 8(2), pp. 58–63.
4. BENCZŐ L. (2023): *Hun-cycling: Recycling, circular economy on the example of Nádasrét in Miskolc*. INTERNATIONAL JOURNAL OF ECOLOGY AND DEVELOPMENT, 38(2), pp. 1–14.
5. BENCZŐ L., TÓTH T., BARANYAI G. (2021): *Zöldebb út a jövőbe*. POLGÁRI SZEMLE: GAZDASÁGI ÉS TÁRSADALMI FOLYÓIRAT, 17(4–6), pp. 216–230.

2 Konferenciaközlés

6. BENCZŐ L. (2022): *Reusable new life of polyurethane*. In: ARANY F. (Szerk.): *Rurality in Europe – 5th International Scientific Conference on Rural Development Conference Proceedings*. Gödöllő: MATE, pp. 247–258.
7. BENCZŐ L. (2021): *„Körkörös” gazdaság a hulladékparban – esszé arról, hogyan nem kell ezt csinálni...* In: BUJDOSÓ Z. (Szerk.): *Tudomány a mindennapokban – A Kutatók Éjszakája rendezvénysorozat keretében megrendezett workshop előadásainak összefoglalói*. Gyöngyös: MATE Károly Róbert Campus, p. 16.
8. BENCZŐ L., BARANYAI G. (2021): *Zöld-körforgás (Green-circulation)*. In: MOLNÁR D., MOLNÁR D. (Szerk.): *XXIV. Tavaszi Szél Konferencia 2021: Absztrakt kötet*. Budapest: DOSZ, p. 112.
9. BENCZŐ L., LŐRINC B. (2023): *A Dunai Vasmű gazdasági és környezeti hatásai a Dunaiújvárosi funkcionális várostérségre*. In: FÖLDI P., VIKTOR P. (Szerk.): *Közgazdász Doktoranduszok és Kutatók II. Rurális Konferenciája Absztraktkötet*. Budapest: Doktoranduszok Országos Szövetsége (DOSZ), p. 12.