

Az akkumulátorhulladék sorsa: szabályozás és technológia

GYÖRFFY DÓRA*

A tanulmány a magyarországi akkumulátoripar kiépülése kapcsán vizsgálja, hogy mi történik az akkumulátor-értéklánc végén, azaz mi lesz a hulladékkal. A kérdés megválaszolásához először az európai iparpolitika újjászületésének tágabb kontextusába helyezve a 2023 nyarán elfogadott új európai akkumulátorszabályozást elemzem, amely rendkívül szigorú újrahasznosítási kötelezettségeket ír elő a gyártók számára. A tanulmány második fele a nemzetközi szakirodalom alapján az újrahasznosítás folyamatát mutatja be a gyűjtéstől a feldolgozásig, kiemelten kezelve a jövedelmezőség kérdését. Ezután amellet érvelek, hogy az akkumulátor-értéklánc magyarországi telepítése jóformán szükségserűvé teszi a hulladékfeldolgozás Magyarországra történő telepítését is, ami a jelenleg rendelkezésre álló technológiák mellett összességében veszteséges tevékenység. A kérdés az, hogy ki fizeti a veszteséget. Ennek alapján levonható az a következtetés, hogy éles ellentétben az európai célkitűzésekkel, az államilag támogatott magyarországi akkumulátoripar egyszerre növeli a függőséget Kínától, károsítja a környezetet, és ássa alá az ország fejlődési lehetőségeit.

Journal of Economic Literature (JEL) kódok: K32, L52, L62, O14, O25.

Kulcsszavak: akkumulátorhulladék, EU-akkumulátorszabályozás, körforgásos gazdaság, újrahasznosítás.

* Györffy Dóra egyetemi tanár, Budapesti Corvinus Egyetem.
E-mail: dora.gyorffy@uni-corvinus.hu ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0709-8736>

A tanulmány korábbi változatához való hozzászólásokért köszönettel tartozom Csaba Lászlónak, Fábíán Istvánnak, Király Júliának és Surányi Györgynek. Az esetlegesen fennmaradó hibák és tévedések természetesen a szerzőt terhelik.

A kézirat 2023. december 9-én érkezett a Külgazdaság szerkesztőségébe.

<https://doi.org/10.47630/KULG.2023.67.11-12.3>

The fate of battery waste: regulation and technology

DÓRA GYÓRFFY

The paper examines what happens at the end of the battery value chain, i.e. what happens to waste, in the context of the development of the battery industry in Hungary. To answer this question, it first analyses the new European battery legislation, adopted in the summer of 2023, which imposes very strict quality and recycling obligations on producers. The second half of the paper will present the recycling process from collection to processing, based on international literature, with a focus on the issue of profitability. It then argues that the establishment of the battery value chain in Hungary makes it almost inevitable that waste processing will also be in Hungary, which is an overall unprofitable activity given the currently available technologies. The question is who pays the losses. This leads to the conclusion that, in stark contrast to European objectives, the state-subsidised Hungarian battery industry is increasingly dependent on China, damaging the environment, and undermining the country's development potential.

Journal of Economic Literature (JEL) codes K32, L52, L62, O14, O25.

Keywords: battery waste, EU battery regulation, circular economy, recycling.

Bevezetés: Az újrahasznosítás problémája az akkumulátor-értékláncban

2023 nyarán az Európai Unió új akkumulátorszabályozást fogadott el (The European Parliament and the Council of the European Union, 2023), amely az elektromos autók akkumulátorainak teljes életciklusát érinti. Tanulmányom központi kérdése, hogy ez a szabályozás hogyan érinti az épülő magyarországi akkumulátoripart, amelyet már számos írás bemutatott (Czirfusz, 2022; Gyórfy, 2023; Éltető, 2023).

Az új akkumulátorszabályozás az újjászülető európai iparpolitika kontextusán belül értelmezendő (Melin, 2021), amely egyszerre igyekszik biztosítani az európai stratégiai autonómiát és a környezeti fenntarthatóságot. A törekvések között központi szerepet játszik a körkörös gazdaság gondolata és ennek megfelelően az újrahasznosítás kérdése. Optimális esetben ez hozzájárul ahhoz, hogy elváljon egymástól a nyersanyag-felhasználás és a gazdasági növekedés, ám a szabályozás a jövedelmezőség kérdéseire nem tér ki, az esetleges költségeket a gyártói felelősség körébe utalja.

Az európai célkitűzésekkel ellentétben a magyarországi akkumulátoripar államilag támogatott telepítésének motivációja elsősorban üzleti jellegű, egy növekvő piacra történő belépéstől várható gazdasági haszon reménye. Ez a gyártás kapcsán

sem igazán reális elképzelés (Győrffy, 2023). Ebben a cikkben azt vizsgálom, hogy a gazdasági hasznot mennyiben befolyásolja a hulladék feldolgozása.

A nemzetközi szakirodalomban az elmúlt években számos interdiszciplináris tanulmány jelent meg a különféle lítiumion-akkumulátorok újrahasznosításának folyamatáról és ennek jövedelmezőségéről. Az európai akkumulátorszabályozás magyarországi akkumulátoriparra gyakorolt hatását e tanulmányok áttekintése segítségével elemzem. Azt mutatom be, hogy bár a körforgásos gazdaság elképzelése elméletben nagyon vonzó, az elektromos autókba kerülő lítiumion-akkumulátorok változó összetétele miatt a vizsgált területen a körforgásos gazdaság számottevő megtérülési korlátokba ütközik. A veszteségek mérsékléséhez a gyártóknak ugyanazokra a tényezőkre van szükségük, mint a gyártáshoz: alacsony munkabérek, laza környezeti és munkavédelmi szabályozások, olcsó energia és víz, jelentős állami támogatások. Ennek alapján Magyarország az akkumulátorhulladék feldolgozása kapcsán is vonzó telephely a gyártók számára, amelyeknek a kezdeti selejtakkumulátorok feldolgozásához ettől függetlenül is szükségük van újrahasznosító üzemekre. Mindebből az következik, hogy akkumulátorgyártó központként Magyarország nem maradhat ki a hulladék-újrahasznosításból sem. Ennek veszteségessége újabb érv amellet, hogy az iparág jelentős adófizetői forrásokkal történő támogatása ellentétes a magyar gazdasági és környezeti érdekekkel.

A tanulmány szerkezete a következő. Először bemutatom az iparpolitika újjászületését az EU-ban és ezen belül az elektromos autókba kerülő akkumulátorok értékláncának európai meghonosítására irányuló törekvéseket. Ezt követően röviden áttekintem az új európai akkumulátorszabályozást. A harmadik részben a lítiumion-akkumulátorok újrahasznosításának folyamatát vizsgálom. Zárásként válaszolom meg azt a kérdést, hogy mit jelent mindez Magyarország gazdasági fejlődése szempontjából.

1. Az európai iparpolitika újjászületése és az akkumulátoripar kiépülése

Az új európai akkumulátorszabályozás az európai iparpolitika újjászületésének egyik eleme. A korábbi szektorsemleges gazdaságpolitika feladása válasz az elmúlt évtizedek új kihívásaira, így az éghajlatváltozásra, Kína felemelkedésére és az Egyesült Államok protekcionista fordulatára (Farkas et al., 2023). Mindehhez a 2020-as években a koronavírus-járvány és az Ukrajna elleni orosz agresszió okozta sokk adódott hozzá, rámutatva a globális értékláncok sebezhetőségére. A biztonság

és a gazdasági hatékonyság közötti viszonyban előtérbe került a biztonság szempontja, ami a „globális gazdaság fokozódó átpolitizálását eredményezi” (Losoncz, 2022:568). Ez a globalizáció egyfajta átalakulását is jelenti, amelynek során a kereskedelmi és tőkepiaci kapcsolatok megtorpanása mellett a sebezhetőség csökkenése érdekében megtörténik a globális értékláncok átstrukturálódása is (Halmi, 2023:12–13). Ebben a kontextusban jelent meg az EU-ban a nyitott stratégiai autonómia igénye, amely a stratégiai függőségek feltérképezését és ezek csökkentését tűzi ki célul (Európai Bizottság, 2021:11–15). Az elektromos autóra való akkumulátorok gyártása egyike annak a hat területnek, amelyen az EU önellátóvá kíván válni (Európai Bizottság, 2021:12).

Mivel az Európai Unió szén-dioxid (CO₂)-kibocsátásának 15 százalékáért a személygépkocsik és a kisteherautók felelősek, az elektromobilitásra való átállás döntő szerepet játszik az éghajlatváltozás elleni küzdelemben és a Párizsi Megállapodás 1,5 °C-os célkitűzésének elérésében. Uniós szinten a Fit for 55 csomag keretében határozták meg azt a követelményt, hogy 2035-től az új személygépkocsiknak és kisteherautóknak kibocsátásmentesnek kell lenniük, ami a belső égésű motoros autókról az elektromos autókra történő átállást jelenti (Európai Tanács, 2023). Az elektromos járművek felé való radikális elmozdulásra azt követően kerül sor, hogy az EU két évtizeden át nem volt képes elérni az ágazat CO₂-kibocsátásának csökkentését. 1990 és 2020 között a közlekedési ágazat kibocsátása 32 százalékkal nőtt, főként a nehezebb, nagyobb teljesítményű és drágább autók felé való elmozdulás miatt (Pardi, 2023:21–22). Az elektromobilitás irányába mutató új stratégia sikeréhez döntő fontosságú az elektromos járművek lítiumion-akkumulátorainak gyártása. Ebben nem lehet kizárólag a jelenleg a teljes értékláncot domináló Kínára hagyatkozni (IEA, 2022: 154).

Bár az akkumulátor-értéklánc európai meghonosításában a stratégiai autonómia és a klímaváltozás elleni küzdelem játszik kiemelt szerepet, az üzleti szempontok sincsenek teljesen elhanyagolva. A Fit for 55 csomagban a várható hasznok között szerepel a szükséges innováció, amely elősegíti az EU technológiai versenyképességét, illetve munkahelyeket teremt és tart fenn a fejlesztésben és a gyártásban (Európai Tanács, 2023).

Az újjászülető európai iparpolitika egyszerre kívánja elősegíteni a stratégiai autonómia, a klímaváltozás elleni küzdelem és a gazdasági fejlődés szempontjait. Ezeket a célokat 21. századi iparpolitikai eszközök révén igyekszik megvalósítani, azaz támogatja az iparág szereplői közötti hálózatok kialakítását, célzott források nyújtását és a szigorú szabályozást. Az utóbbi egyszerre szolgálja a fogyasztók, a környezet és az uniós piaci verseny védelmét (Di Carlo & Schmitz, 2023: 7).

Az Európai Akkumulátor Szövetség (European Battery Association – EBA), amelyet hivatalosan Maroš Šefčovič, az Európai Bizottság alelnöke indított el 2017 októberében, az egyik legkorábbi iparpolitikai kezdeményezés az európai közérdeket képviselő jelentős projektek (Important Projects of Common European Interest – IPCEI) keretében (Pichler et al., 2021:145). Megkönnyíti az érdekelt felek együttműködését a biztonságos és fenntartható európai akkumulátor-értéklánc kiépítésének támogatása nyomán 250 milliárd euróra becsült piac (EIT InnoEnergy, 2020). A szövetséget az EIT InnoEnergy vezeti, és 120 európai és Európán kívüli érdekelt fél alkotja, amelyek a teljes akkumulátor-értékláncot képviselik. Egy sor munkaértekezlet és szeminárium keretében kulcsfontosságú intézkedéseket hoztak az európai akkumulátor-értéklánc kiépítése érdekében. Ajánlásaik kiternek többek között a kutatás-fejlesztés és az elektromos töltőállomások kiépítésének támogatására csakúgy, mint a szükséges beruházások finanszírozására.¹

Az akkumulátor-értéklánc célzott pénzügyi támogatása magába foglalja mind az európai uniós szintű finanszírozási kezdeményezéseket, mind az állami támogatást. Az IPCEI keretében 2023-ban uniós szinten már több mint 20 milliárd eurót fordítottak erre a célra az Európai Beruházási Bank (EIB) hitelei és a kutatás-fejlesztés támogatása révén (T&E, 2023:2). A korábbi évek szigorú korlátozásait felülírva az EU az időszakos válság és átmenet keretrendszere (Temporary Crisis and Transition Framework – TCTF) révén lazította és egyszerűsítette az akkumulátorgyáraknak nyújtott állami támogatásra vonatkozó szabályokat. Eredetileg ezek a szabályok a gazdaság támogatására vonatkoztak az Ukrajna elleni orosz invázióval összefüggésben. 2023 márciusában bejelentették, hogy a szabályok az EU-ban a tiszta technológiákba történő beruházások ösztönzésére is felhasználhatók, ezáltal pedig a támogatások terén az EU versenyképessé válik az Egyesült Államokkal (Európai Bizottság, 2023:37–40). Összességében ez azt jelenti, hogy a nagyvállalatok régiótól függően a beruházási költségeik 15–35 százalékát kaphatják meg támogatásként, tagállamonként és vállalkozásonként 350 millió eurós felső határral.

Az akkumulátor-értéklánc jelentős támogatásának köszönhetően az európai akkumulátorgyártás gyorsan növekszik, és egymás után jelentik be új akkumulátorgyárak létesítését. A magát Európa vezető, tiszta közlekedésért küzdő kampánycsoportjaként definiáló² Transport & Environment konzervatív becslése, azaz a már előrehaladott állapotban levő projektek alapján a 2022-ben még 69 GWh teljesítmény 2025-re 238 GWh-ra nő, majd 2030-ban eléri a 773 GWh teljesítményt. Ennél

¹ A javaslatok pontos listája elérhető: <https://www.eba250.com/actions-projects/priority-actions/>

² Lásd a hivatalos weboldalukat: <https://www.transportenvironment.org/about-us/>

több bejelentés is van már, és ha minden meghirdetett projekt megvalósul, 2030-ban a teljesítmény elérheti az 1395 GWh-t. Ennek az a jelentősége, hogy a szervezet becslései szerint 2035-re, amikor már csak elektromos autót lehet eladni a közös piacon, 1500 GWh kapacitásra lesz szükség, azaz az EU addigra önállóan lehet akkumulátorból (T&E, 2023:9–10).

Az új európai akkumulátorszabályozás a fenti kontextusban értelmezendő, és a hálózatépítés és a pénzügyi támogatások mellett az akkumulátoripar európai kiépítésének legfontosabb eleme.

2. Az új európai akkumulátorszabályozás

Az Európai Tanács 2023. június 28-án fogadta el az akkumulátorokról és hulladékkumulátorokról szóló szabályozást (2023/1542 EU rendelet: The European Parliament and the Council of the European Union, 2023), amely 2023. augusztus 17-én lépett hatályba. Az Európai Bizottság Környezetvédelmi Főigazgatóságának közleménye alapján a szabályozás biztosítja, hogy az európai zöldmegállapodás (European Green Deal) céljaival összhangban az akkumulátorgyártásban érvényesüljenek a fenntarthatóság, a körforgásos gazdaság, a biztonság és az európai stratégiai autonómia szempontjai (Európai Bizottság Környezeti Főigazgatóság, 2023). Ennek alapja, hogy az igazoltan alacsony CO₂-kibocsátás, a minimális mérgező alapanyaghasználat, illetve az újrahasznosítás és újrafeldolgozás révén kevesebb nyersanyagra lesz szükség Európán kívüli országokból.

A 2023/1542 EU rendelet a 2006/66/EC elemekről szóló rendelet helyébe lép, és minden típusú elemre és akkumulátorra vonatkozik, amely az EU-ban forgalomba kerül. Az elektromos autók akkumulátorai az SLI (Starting, Lighting and Ignition Battery) kategóriába tartoznak. A következőkben csak az ezekre vonatkozó rendelkezéseket tárgyalom.

A teljes életciklusra vonatkozó szabályozás szigorú minőségi és tartóssági követelményeket tartalmaz (10. cikk), az akkumulátoroknak általános szervizekben cserélhetőeknek kell lenniük (11. cikk). Az átláthatóság jegyében minden akkumulátort QR-kóddal kell ellátni (13. cikk), amely egyfajta útlevélként (77. cikk) működik, és tartalmazza az akkumulátor legfontosabb jellemzőit, többek között az összetételét, a kapacitását és a gyártás idejét (VI. Melléklet).

A gyártók számára a legfontosabb rendelkezés a kellő gondosság (*due diligence*) követelménye a gyártás során (48–53. cikk), illetve a kiterjesztett gyártó felelősség

(Extended Producer Responsibility – EPR) a használt akkumulátorok terén (54–76. cikk). A kellő gondosság követelménye az akkumulátor teljes életciklusára vonatkozik, a nyersanyagok etikus beszerzésétől a gyártás környezeti és társadalmi kockázatain át az újrahasznosításig. A kockázatok kezelése terén elvárás, hogy a gyártók a nemzetközi szervezetek (ENSZ, OECD, ILO) ajánlásait alkalmazzák (X. Melléklet). Az EPR kapcsán a legfontosabb kérdés, hogy a gyártói felelősség pontosan melyik vállalatra vonatkozik, azaz az akkumulátor gyártójára vagy az elektromos autó eladójára. A 3. cikk 47. pontja szerint gyártónak az az EU-n belüli vagy kívüli cég tekinthető, amely első alkalommal bocsát rendelkezésre új vagy újragyártott akkumulátort egy tagállamban. A rendelkezésre bocsátásba beletartozik az is, hogy az akkumulátort beszerelésre adják át egy elektromos autógyártónak és az is, hogy az EU-ba az akkumulátor elektromos autóba szerelve érkezik. A gyártói felelősség azt jelenti, hogy a gyártó felelős „a hulladékelemek, illetve -akkumulátorok elkülönített gyűjtésének, továbbá az azt követő elszállításának és kezelésének” költségeiért (56. cikk, 4. pont). Ezt a tevékenységet végezheti a vállalaton belül, vagy megbízhat egy másik céget, amely a gyártó nevében teljesíti ezt a kötelezettséget (57. cikk).

A szabályozás kritikus elemét alkotják azok a számszerű célértékek, amelyek elérni hivatottak az EU nyersanyagfüggőségének csökkentését és a körforgásos gazdaság céljait. Az összes SLI-akkumulátort díjmentesen vissza kell venni és össze kell gyűjteni a végfelhasználóktól (61. cikk), majd növekvő arányban újrahasznosítani és a nyersanyagokat az új akkumulátorok gyártásában felhasználni. A szabályozás szigorú hatékonysági célértékeket határoz meg az újrafeldolgozáshoz (XII. Melléklet, B rész). A lítiumion-akkumulátorok esetében 2025. december 31-ig legalább az átlagos tömeg 65 százalékát kell újra feldolgozni, majd 2030. december 31-ig el kell érni minimum a 70 százalékot. Az alapanyagok esetében (XII. Melléklet, C rész) az újrafeldolgozási kötelezettség 2027. december 31-ig a nehézfémek (kobalt, réz, nikkel) 90 százalékára és a lítium 50 százalékára vonatkozik. Ezek a célértékek 2031. december 31-ig a nehézfémek esetén 95 százalékra, a lítium esetén 80 százalékra nőnek. A szabályozás arra is kitér, hogy az újrahasznosított nyersanyagokat fel kell használni az új akkumulátorok gyártásában (8. cikk). 2031. augusztus 18-tól a hulladékból kinyert minimális tartalom a kobalt esetében 16 százalék, a lítium és a nikkel esetében 6-6 százalék. Ezek az értékek 2036. augusztus 18-tól nőnek: kobalt 26 százalék, lítium 12 százalék, nikkel 15 százalék. Az újrahasznosítási célokat az *1. táblázat* foglalja össze.

**Az európai akkumulátorszabályozás újrahasznosítási minimumának
célértékei határidővel**

(Százalék)

%	Határidő	2025. 12. 31.	2027. 12. 31.	2030. 12. 18.	2031. 08. 18.	2031. 12. 31.	2036. 08. 18.
Összegyűjtés		100					
Újrafeldolgozás (tömeg)		65		70			
Újrahasznosítási célérték: kobalt, réz, ólom, nikkal			90			95	
Újrahasznosítási célérték: lítium			50			80	
Új akkumulátorokban újrahasznosított nyersanyagtartalom: kobalt					16		26
Új akkumulátorokban újrahasznosított nyersanyagtartalom: nikkal					6		15
Új akkumulátorokban újrahasznosított nyersanyagtartalom: lítium					6		12

Forrás: The European Parliament and the Council of the European Union (2023) alapján saját szerkesztés.

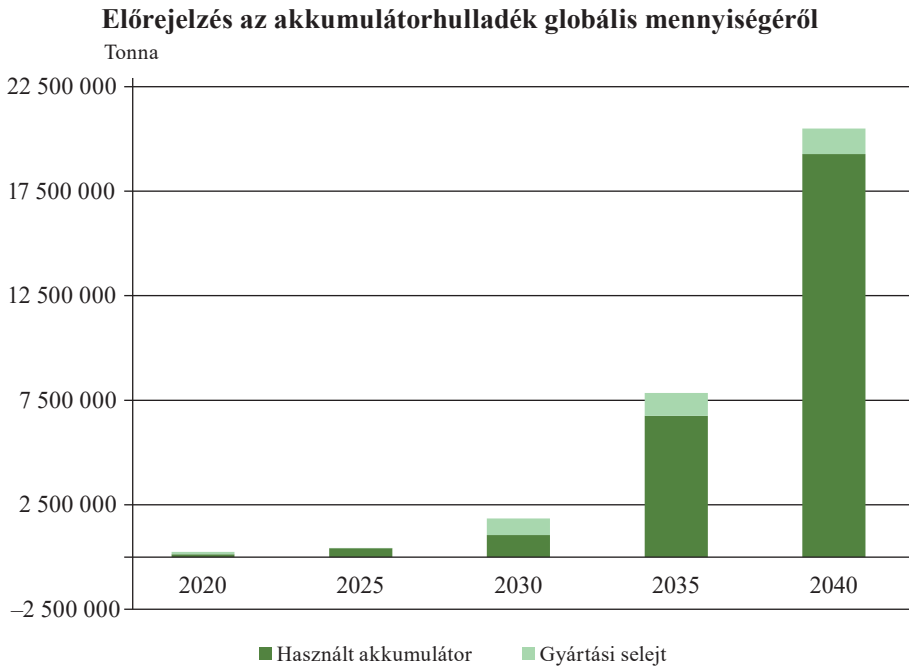
A tagállamok évente kötelesek jelentést készíteni a Bizottságnak (76. cikk) egyrészt a tagállamban első alkalommal forgalmazott akkumulátorok mennyiségéről, ideértve azokat is, „amelyeket a végfelhasználóknak történő értékesítést megelőzően készülékekbe, járművekbe vagy ipari termékekbe építettek be”, másrészt az összegyűjtött hulladékká vált akkumulátorok mennyiségéről és az újrahasznosítási célértékek alakulásáról.

Összességében az európai szabályozás a világ legszigorúbb szabályait tartalmazza, egyszerre szolgálja a fenntarthatóságot és a piacvédelmet (Melin, 2021). A számszerű, átlátható célok a gyártókat a környezeti szempontból kedvezőbb megoldások felé terelik, míg a minőségi, tartóssági és cserélhetőségi szabályoknak nem megfelelő akkumulátorok kiszorulnak az EU belső piacáról. Az újrahasznosítás az újonnan bányászott nyersanyagok iránti keresletet hivatott csökkenteni, ám az a kérdés továbbra is nyitott, hogy a fenntarthatóság és a stratégiai autonómia céljai hogyan viszonyulnak az üzleti szempontokhoz. Ennek áttekintéséhez a következőkben részletesen megvizsgálom, hogy milyen lépésekből áll az újrahasznosítás.

3. Újrahasznosítás és jövedelmezőség

A lítiumion-akkumulátorok hozzávetőlegesen 4000 töltés vagy 120 000 km út megtétele, azaz nagyjából 8-10 év alatt elveszítik eredeti kapacitásuk mintegy 20 százalékát, ezt követően az elektromos autóban cserélni kell őket (Hantanasirisakul & Sawangphruk, 2023:1). Következésképpen az elektromos autók számának világméretű növekedésével párhuzamosan megjelenik az akkumulátorhulladék.

1. ábra



Forrás: Breiter et al. (2023: 2) adatai alapján saját szerkesztés.

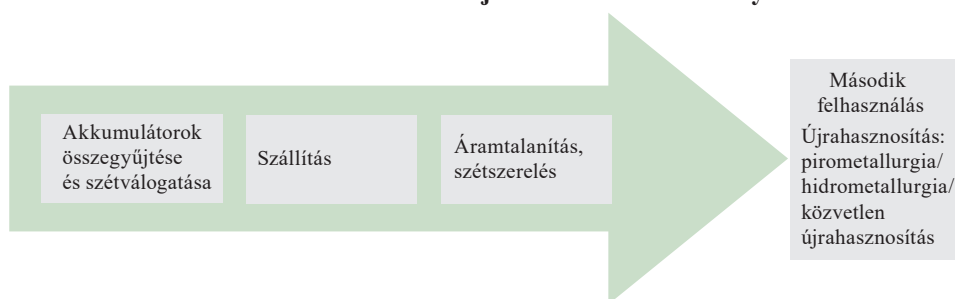
Az 1. ábra a McKinsey & Co. kutatóinak előrejelzéséből közöl adatokat. Amíg 2030-ig a hulladék nagyjából fele az akkumulátorgyártás selejtjéből származik, addig ezt követően drámai növekedésnek indul a használt akkumulátorok mennyisége. Ez utóbbi 2040-re várhatóan eléri a 20 millió tonnát. A nagyságrendjét érzékelteti, hogy ez a gízai nagy piramis tömegének több mint háromszorosa. Ez a hatalmas mennyiségű hulladék veszélyes anyagokat (nehézfémek, oldószerek) tartalmaz,

amelyek a talajba vagy a vízbe szivároghva jelentős mértékben veszélyeztetik a környezetet. Az akkumulátorhulladék emellett rendkívül tűzveszélyes is, és az égés során mérgező gázok szabadulnak fel, amelyek súlyosan szennyezik a levegőt (Lander et al., 2021:1). Ennek a hulladéknak a feldolgozása közérdek.

A körforgásos gazdaság hirdetői elképzelhetőnek tartanak egy olyan világot, ahol nincs szükség új nyersanyagra, hanem a használt termékekből a nyersanyagok visszanyerése révén új termékek készülhetnek (Nagy et al., 2021:1110–1111). A lítiumion-akkumulátorok kapcsán Tankou et al. (2023:7) 28 százalékkal kisebb nyersanyagigényt jelez előre 2050-re, ha a használt akkumulátorok 90 százalékát feldolgozzák. Ahhoz azonban, hogy ez piaci alapon történjen, megkerülhetetlen a tevékenység jövedelmezőségének a vizsgálata. Jó esetben a használt akkumulátorok nyersanyagainak visszanyerése révén az újrahasznosítás nyereséges, ami ösztönzi a piaci szereplőket erre a tevékenységre. A következőkben azt vizsgálom, hogy a technológiai fejlettség jelenlegi színvonalán ez a lehetőség reális-e.

2. ábra

A lítiumion-akkumulátorok újrahasznosításának folyamata



Forrás: saját szerkesztés.

Az akkumulátor újrahasznosításának folyamata soklépcsős, az összegyűjtéstől, a szortírozáson, szállításon át az újrafelhasználásig és újrafeldolgozásig tart. Ezt a folyamatot mutatja be a 2. ábra. A jövedelmezőség elemzéséhez mindegyik szakaszt vizsgálni kell, azaz nem egy-egy hulladékhasznosító cég jövedelmezősége az érdekes, hanem a teljes folyamaté.

3.1. Az akkumulátorhulladék összegyűjtése és szétválogatása

Az akkumulátorhulladék feldolgozása a használt akkumulátorok begyűjtésével és szortírozásával kezdődik. Az európai szabályozás alapján az összes SLI-akkumulátort vissza kell gyűjteni. Ez a gyártói felelősség keretébe tartozik, amelynek értelmében minden tagállamban létre kell hozni a gyűjtőhelyeket, közel a végső felhasználókhoz (The European Parliament and the Council of the European Union, 2023:63). Neumann et al. (2022:4–5) szerint a folyamattal kapcsolatos fő kihívás az akkumulátorok sokfélesége. A technológiai fejlődés miatt a kémiai összetételük és fizikai szerkezetük folyamatosan változik: a katódban a lítium mellett a kobalt, a nikkel és a mangán változó arányban van jelen (például NMC811, NMC523, NMC622, NCA, lásd a 2. táblázatban), de már megjelentek a kobalt nélküli akkumulátorok is, amilyen a vasat és foszfátot tartalmazó LFP.³ A különféle akkumulátorok fémtartalmának eltérő összetételét a 2. táblázat mutatja be. Az anód anyaga is változik: a grafit dominanciája mellett már vannak szilikon- és lítium-titanát-változatok is. A modulokban a cellák száma eltérő, csakúgy, mint a cellák elrendezése, amely lehet hengeres, prizma- vagy zacskós szerkezetű. A közeli jövőben a szilárdtest-akkumulátorok elterjedése tovább növeli a változatosságot.⁴ Mindennek legfontosabb következménye, hogy a különféle akkumulátorok újrafeldolgozása eltérő technológiát igényel, és nem minden akkumulátorfeldolgozó lesz képes kezelni az összes típust, különösen, hogy összetételüktől függően a jövedelmezőségük is eltér. A technológia standardizálása megkönnyítené a folyamatot, de hátráltatná az innovációt (Neumann et al., 2022:5). Mindez szükségessé teszi azt, hogy a használt akkumulátorokat már a gyűjtőhelyen megvizsgálják és szortírozzák, hiszen nem mindegy, melyik feldolgozóba szállítják.

³ Az akkumulátorban a kobalt a legdrágább és leginkább toxikus fém, amelynek a kiiktatására törekednek a gyártók. A nikkel révén növelhető az energiasűrűség (Wh/kg) és csökkenthető a költség, ám stabilitása alacsony. A mangán hozzáadása növeli a termikus stabilitást. Az LFP kobaltmentes, olcsó, biztonságos, ám jóval alacsonyabb az energiasűrűsége, mint a kobalt- és nikkeltartalmú akkumulátoroké: 90–100Wh/kg az NCA+ 200–270Wh/kg értékével szemben. Bővebben lásd Schade et al. (2023:74–75).

⁴ A folyamatosan változó akkumulátortechnológiáról Schade et al. (2023:79–80) nyújt alapos áttekintést.

Egy 60 kWh kapacitású lítiumion-akkumulátor néhány lehetséges változata
(fém tartalom, kg)

	NMC811 nikkel (80%), mangán (10%), kobalt (10%)	NMC523 nikkel (50%), mangán (20%), kobalt (30%)	NMC622 nikkel (60%), mangán (20%), kobalt (20%)	NCA+ Nikkel, kobalt, alumínium- oxid	LFP Lítium, vas-foszfát
Lítium	5	7	6	6	6
Kobalt	5	11	11	2	0
Nikkel	39	28	32	43	0
Mangán	5	16	10	0	0
Grafit	45	53	50	44	66
Alumínium	30	35	33	30	44
Réz	20	20	19	17	26
Acél	20	20	19	17	26
Vas	0	0	0	0	41

Forrás: Bhutada (2023).

A begyűjtés után a következő lépés az akkumulátorok szétválogatása, azaz a kémiai összetételük, illetve az állapotuk meghatározása. Külső jelzés hiányában ehhez az akkumulátort áramtalanítani kell és szét kell szerelni, ami jelentős erőforrásokat igényel, és egyelőre az újrahasznosítási folyamat egy másik szakaszát jelenti. A szortírozás problémájára ad választ az új európai akkumulátorszabályozás QR-kódja és az azon keresztül elérhető „akkumulátor-útlevél”, amely egyéb adatok mellett tartalmazza a gyártás idejét és a pontos összetételt. Ennek révén nem kell az akkumulátort szétszerelni, hanem az útlevelle alapján lehet a megfelelő újrahasznosító üzembe szállítani.

3.2. Az akkumulátorhulladék szállítása

A lítiumion-akkumulátorok szállításának legfontosabb problémája a biztonsági kockázat: az akkumulátor túlfűtése súlyos tűzveszéllyel jár, egyetlen rövidzárlatos akkumulátor pedig a teljes szállítmány leégését eredményezheti. Az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság leírása szerint az „akkumulátorok súlyos meghibá-

sodása olyan mértékű hőtermeléshez vezethet, ami egy úgynevezett hőmegfutást (*thermal runaway*) okoz. Ennek során rendkívül heves égés zajlik le egy vagy több cellában, amely az akkumulátorból kitörő szúrólánggal, mérgező és gyúlékony gázok kibocsátásával és intenzív önfenntartó égéssel jár, melyet csak nagyon nehezen lehet megfékezni”.⁵ Nem véletlen, hogy az Egyesült Királyságban a hulladéktűzök 48 százalékát a használt akkumulátorok okozzák (Neumann et al., 2022:6).

A lítiumion-akkumulátor veszélyes anyagként szállítandó, amire szigorú nemzetközi (ENSZ) előírások vonatkoznak (UN 2019/38.3). Ennek alapjánállítás előtt az akkumulátorokat számos biztonsági tesztnek kell alávetni, mint a hő-, a rezgés- és ütésteszt vagy a külső rövidzárlat, a túltöltés és kényszerkisülés tesztje. Emellett különleges csomagolási eljárások vonatkoznak rá, amelyekbe beletartozik a szállított akkumulátorok mennyiségének korlátozása is. Szintén szükség van a szállítmány megfelelő címkézésére és engedélyeztetésére is.

A veszély mértéke és a nemzetközi szabályozásoknak való megfelelés magas költségekkel jár. A szakirodalom áttekintése alapján Slattery et al. (2021:2) átlagosan \$1,54/kg eredményre jutott az Egyesült Államok és az Európai Unió példáin keresztül, ami egy 52kWh teljesítményű, 330 kg-os Tesla Model 3 akkumulátora esetén összességében \$508,2, azaz \$9,8/kWh. A vizsgált tanulmányokban a szállítási költségek az újrahasznosítási költségek 41 százalékát tették ki, jelentős, 5 és 63 százalék közötti szórással. Bár ezek a költségek természetesen nagymértékben függenek a megtett távolságtól, az üzemanyagok árától és a munkaerőköltségektől, a magas értékek jelzik, hogy a szállítási költségek vizsgálata megkerülhetetlen az újrahasznosítási folyamatban.

3.3. Az akkumulátorhulladék áramtalanítása és szétszerelése

A hulladékfeldolgozás első konkrét lépése az akkumulátorok kisütése, majd szétszerelése. A balesetek elkerülése érdekében az áramtalanítás a kézzel történő szétszerelés elengedhetetlen feltétele. A kisütés történhet hőkezeléssel, sófürdőben vagy külső áramkörökön keresztül, amelyek közül a sófürdő a leggyakoribb (Neumann et al., 2022:7–8).

Az áramtalanítás után válik lehetővé a darálás vagy a szétszerelés. Az előbbi gyors, olcsó és ipari méretekben alkalmazható, ám jelentős anyagvesztéssel jár, illetve bonyolultabb feldolgozást igényel a komplexebb darálékból visszanyerni az

⁵ A leírás elérhető: <https://katasztrofavedelem.hu/37082/li-ion-akkumulatorok-veszelyei>

értékes anyagokat, mint a szétszerelt akkumulátorból kinyert cellák anyagának újrahasznosítása (Hantanasirisakul & Sawangphruk, 2023: 3). A szétszerelés magába foglalja az akkumulátorház felnyitását, a modulok közötti elektromos és mechanikus csatlakozások, illetve a kiegészítő elektronikus alkatrészek eltávolítását. A folyamat végén következik a modulok kiemelése, amelyek felnyitásával lehetővé válik a hozzáférés az akkumulátorcellákhoz.⁶ A cellák az akkumulátor tömegének 60–75 százalékát alkotják, a többi tartozék tömege 25–40 százalék.⁷ Az európai szabályozás 65 százalékos, majd 2030-tól 70 százalékos célértéke (*1. táblázat*) szükségessé teszi a cellán kívüli részek jelentős arányának újrahasznosítását is.

Hat különböző elektromos autó (Renault Zoe, Nissan Leaf, Tesla Model 3, Peugeot 208, BAIC és BYD Han) akkumulátora szétszerelésének költségeiről Lander et al. (2023) közöl számításokat. Megállapítja, hogy a modulokat és a cellákat nem a szétszerelésre tervezik és optimalizálják, a költségek pedig az akkumulátor szerkezetétől függően jelentős eltéréseket mutathatnak (csavarok száma, rögzítés módszere, modulok száma, cellaszerkezet különbségei). A szétszerelés veszélyes folyamat, ami magasan képzett technikusokat igényel. A folyamat legköltségesebb eleme ennek megfelelően a munkabér. Ezt az automatizáció jelentősen, több mint 80 százalékkal csökkenthetné, amikor robotok dolgozzák fel az akkumulátorokat, ám az akkumulátorok sokfélesége ezt megnehezíti. Egy akkumulátor kézi szétszerelése 200–450 perc, és költsége \$80 és \$200 között van, azaz \$1–5/kWh (Lander et al., 2023:7). Hasonlóan az újrahasznosítás többi folyamatához, az akkumulátorok standardizálása mérsékelné a költségeket, de akadályozná az innovációt és az új típusú akkumulátorok fejlesztését.

3.4. Második felhasználás

Az elektromos autókban a lítiumion-akkumulátorokat cserélni kell, ha a teljesítményük az eredeti teljesítmény 80 százaléka alá csökken. Más típusú alkalmazásra e határérték alatt is lehetőség nyílhat, ezt jelenti az akkumulátorok második felhasználása. Shahjalal et al. (2022:7–9) összefoglalása alapján a használt akkumulátor csatlakoztatható a helyhez kötött energiatárolási hálózatban, és csúcsidőszakokban ezek révén csökkenthető az elektromos hálózat terhelése. Lehetséges az akkumulátor hálózaton kívüli alkalmazása is, amikor napelemek mellé telepítik azt energiatá-

⁶ A folyamatról kiváló áttekintést nyújt Shahjalal et al. (2022:7–8).

⁷ A különféle akkumulátorok súlyának pontos összetevőiről lásd <https://pushevs.com/ev-battery-specs/>

rolás céljából. Az eredeti teljesítmény 60–80 százalékát adó akkumulátorok felhasználhatók rövid hatótávolságú járművekben is.⁸

A körforgásos gazdaság szempontjából a második felhasználás gondolata nagyon vonzó, ám a jövedelmezőség ebben az esetben is kérdéses. A már felsorolt lépések költségei itt sem kikerülhetők, azaz a használt akkumulátorokat összegyűjteni és szortírozni kell, majd a megfelelő üzembe elszállítani. Shahjalal et al. (2022:6) szerint meglehetősen ritka, hogy szétszerelés nélkül beállítható volna egy akkumulátor egy új funkcióban, következésképpen a szétszerelés költségeivel általában számolni kell. Mindez azt jelenti, hogy az újrahasonosításnak ebben az esetben is jelentős költségei vannak, miközben a régi akkumulátorok az új akkumulátorokkal versenyeznek a piacon. Ennek jelentőségét érzékelteti az új akkumulátorok árának zuhanása az elmúlt évtizedekben. Ritchie (2021) adatai szerint a folyamatos technológiai fejlesztések miatt 1991 és 2018 között a lítiumion-akkumulátorok ára 97 százalékkal csökkent, azaz \$7523/kWh értékről (1991) \$181/kWh értékre (2018). Azóta a folyamat folytatódott, az előrejelzések szerint 2030-ra \$60/kWh lesz az akkumulátorok ára. Ehhez nagymértékben hozzájárul a globális akkumulátorgyártás bővülése is (Rao, 2021). A használt akkumulátorok ára az összetételtől, az ebből képzett átvételi ártól, illetve az újrafelhasználásra történő előkészítés költségeitől függ. Mindez Tankou et al. (2023:14) becslése szerint \$20/kWh és \$300/kWh között szóródhat. Ha ehhez hozzávesszük azt, hogy a használt akkumulátor élettartama szükségszerűen rövidebb, jellemzői eltérnek az újtól, és szigorú biztonsági előírások szükségesek a túlmelegedés és rövidzárlatok ellen, akkor érthető, hogy csak nagyon szigorú feltételezések mellett lehet nyereséges a második felhasználás. Ez szabályozással (például QR-kód révén információ biztosításával) valamelyest javítható, illetve az újrahasonosítás technológiai fejlődése is lehetséges, de az új akkumulátorokkal való verseny fennmarad. A probléma megoldását Shahjalal et al. (2022:9) az állami támogatások növelésében látja, de ez csak azt mutatja, hogy jövedelmezőség hiányában milyen módon lehet szétteríteni a veszteséget a társadalomban.

⁸ Tankou et al. (2023:10) konkrét példákon mutatja be, hogy egyes autógyárak mit kezdenek a használt akkumulátorokkal. Például a Nissan Japánban utcai világításhoz alkalmazza ezeket, a Renault Franciaországban pedig elektromos hajókhoz.

3.5. Az újrahasznosítás módszerei

Ha a használt akkumulátor nem alkalmas második felhasználásra, a cellák újrahasznosításra kerülnek. Ennek három fő módszere van: a pirometallurgia, a hidrometallurgia és a közvetlen újrahasznosítás.

3.5.1. Pirometallurgia

A pirometallurgia során az akkumulátor tömegének mintegy 50 százaléka kerül újrahasznosításra, ami az új európai szabályozás 65 százalékos követelménye (1. táblázat) alatt van. A folyamat előnye, hogy különféle összetételű akkumulátorok feldolgozására alkalmas. Az eljárás során a ledarált akkumulátort vagy a már szét-szerelt akkumulátorcellákat kemencében 700–1000 °C-ra hevítik mintegy 30 percen keresztül, amikor az akkumulátor jelentős része (borítás, anód, szeparátor, elektrolit) elég, majd a folyamat végén fémötvözet, lítiumtartalmú salak és füstpor keletkezik (Neumann et al., 2022:13). A salak jellemzően hulladéklerakóba kerül, esetleg további hidrometallurgiai eljárás révén lehet belőle kinyerni a lítiumot.

A pirometallurgia elsősorban a kobalt- és a nikkeltartalmú fémötvözetre koncentrálna, azaz az akkumulátor katódjának legértékesebb részeire. A kobalt tonnánkénti ára az elmúlt évtizedben 30 000 dollár körül mozgott, két rövid, néhány hónapos időszakot kivéve 2018-ban és 2022-ben, amikor az ár 80 000 dollár fölé ugrott, de ezek az időszakok buboréknak bizonyultak.⁹ A nikkelt tonnánkénti ára az elmúlt évtizedben 10 000 és 20 000 dollár között mozgott szintén néhány kiugró időszak kivételével, amikor az ár elérte a 30 000 dollárt.¹⁰ Ezekkel szemben a lítium jóval olcsóbb fém: 2019 óta az ára 10 000 dollár körül volt, kivéve 2022-ben, amikor az ár néhány hónap alatt elérte a 60 000 dollárt, ám 2023 végére visszatért a 10 000 dolláros szintre.¹¹ Mindezzel szemben a vasérc ára 2018 óta 42 és 214 dollár között ingadozik.¹² Az akkumulátor-újrahasznosítás szempontjából ezek az értékek arra utalnak, hogy azon akkumulátorok esetében van esély nyereséges feldolgozásra, amelyekben magas a kobalt- és a nikkeltartalom, azaz NMC és NCA típusú akkumulátoroknál, míg a vas-foszfát (LFP)-akkumulátor pirometallurgia révén történő újrahasznosítása biztosan nem lehet nyereséges.

⁹ Az adatokat lásd: <https://tradingeconomics.com/commodity/cobalt>

¹⁰ Az adatokat lásd: <https://tradingeconomics.com/commodity/nickel>

¹¹ Az adatokat lásd: <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>

¹² Az adatokat lásd: <https://tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>

Erősen kérdéses jövedelmezőségre jut Reinhart et al. (2023:11–12) tanulmánya is, amely részletes költség-haszon elemzést közöl a pirometallurgia révén történő újrahasznosítás gazdaságosságáról. Viszonylag magas nyersanyagárakat (kobalt: 45 343 dollár/tonna, nikkel 17 209 dollár/tonna) feltételezve is úgy számol, hogy egyedül az NMC333 típusú akkumulátor újrahasznosítása jövedelmező ily módon. A kalkulációban azonban nem szerepelnek az összegyűjtési, a szortírozási és a szállítási költségek. A gyenge jövedelmezőségi eredmény legfontosabb oka, hogy a folyamat kezdetben rendkívül tőkeigényes, a legdrágább eszközöket igényli az újrahasznosítási módszerek közül, a cikk 18,5 millió euró eszközberuházással számol. A legnagyobb költséget (az első éves összköltség 62 százalékát) a folyamat során így is a munkaerő alkotja, aminél átlagos német ipari bérekkel számoltak (48 313 euró/év az egyszerű munkák esetében). Ezeket a költségeket nem téríti meg a nyersanyag eladása a piacon. Erre a piaci nyersanyagárak alakulásától függően csak a legdrágább összetételű akkumulátoroknál van esély. Ebből adódóan a szerzők végkövetkeztetése az a kérdés, hogy ki fogja fizetni a tevékenység veszteségét.

A pirometallurgia ráadásul nem csupán a jövedelmezőség miatt problematikus. A kemencében történő égetés rendkívül energiaigényes, jelentős CO₂-kibocsátással jár, és nagyjából ugyanannyi elektromos áramot igényel a folyamat, azaz a nyersanyagok visszanyerése, mint az új akkumulátorok gyártása (Hantanasirisakul & Sawangphruk, 2023:7). Mindezen túlmenően a lítium visszanyerésére sem alkalmas, azaz önmagában biztosan nem felel meg az európai szabályozásnak, ami a lítium újrahasznosítását és újrafelhasználását is előírja.

3.5.2. Hidrometallurgia

A pirometallurgiával ellentétben a hidrometallurgiához szét kell szerelni az akkumulátort, viszont minden fém (kobalt, nikkel, mangán, alumínium, lítium) magas tisztaságú visszanyerésére használható. Ennek révén alkalmas az új európai szabályozás újrahasznosítási követelményeinek a teljesítésére is. A hidrometallurgia megkezdéséhez az akkumulátorcellákból ki kell nyerni az úgynevezett fekete masszát (*black mass*), azaz a katód- és anódport, ami mechanikai (darálás és szítálás) vagy termikus (300 °C-on az elektrolit elpárologtatása) eljárások révén lehetséges (Neumann et al., 2022:9). Ezután kezdődhet a hidrometallurgiai folyamat, aminek során ásványi, majd természetes savak adagolásával egymás után kioldják a különböző fémeket. Neumann et al. (2022:12) folyamatábrája alapján első lépésben kiválasztják

a grafitot, ezt követi az alumínium, a vas és a réz, majd sóként a mangán, a kobalt, a nikkel és végül a lítium kioldása.

A hidrometallurgia számos szempontból kedvezőbb, mint a pirometallurgia, de szintén van káros környezeti hatása. A folyamat vízigénye megegyezik az új akkumulátorok előállításának vízigényével (Hantanasirisakul & Sawangphruk, 2023:7), és vegyianyagigénye is jelentős. Emellett számottevő mennyiségű szennyvíz keletkezik, és mérges gázok kerülhetnek a levegőbe (Tankou et al., 2023:21). Ebben a folyamatban lényeges szerepe van az akkumulátor változó összetételének, ezért ez bonyolultabb technológia, mint a pirometallurgia. Végül nem elhanyagolható az sem, hogy e folyamatban a lítium kinyerése hosszadalmas és bonyolult, ami miatt az újrahasznosított lítium ára nagyjából ötször akkora, mint a frissen kitermelté (Tshabalala, 2023).

3.5.3. Közvetlen újrahasznosítás

A pirometallurgia és a hidrometallurgia számos problémájára adhat megoldást a közvetlen újrahasznosítás. Ennek során a használt akkumulátorcellákat regenerálják oly módon, hogy az elhasználódott kristályszerkezetet szinterelési eljárással helyreállítják. Ez azt jelenti, hogy viszonylag magas hőmérsékleten (300–950 °C az akkumulátor típusától függően) friss lítium adagolása révén egy diffúziós folyamatban 6–10 óra alatt visszaépítik az eredeti szerkezetet (Wang et al., 2023:704). Léteznek ugyanerre a folyamatra hidrotermikus regenerálási eljárások is, amelyekkel a katódanyagokat mérsékelt hőmérsékleten (<200 °C), oldószerekben regenerálják. Ezután magas hőmérsékletű rövid lágyítási folyamat következik, amely viszont 20 órát is igénybe vehet (Wang et al., 2023:705).

A közvetlen újrahasznosítási eljárás előnye, hogy megőrzi az akkumulátorcella szerkezetét, viszonylag egyszerű folyamat, lényegesen kevesebb szennyezést termel, mint a piro- és hidrometallurgia, miközben az újrahasznosított cella elektrokémiai teljesítménye hasonló az új akkumulátorcellákéhoz. Az LFP-akkumulátorok esetében csak ez lehet gazdaságos. Ehhez a módszerhez azonban megkerülhetetlen az akkumulátorcella mechanikai és kémiai összetételének a pontos ismerete, így a folyamatosan változó akkumulátor-összetételek hátráltatják az eljárások kidolgozását (Neumann et al., 2022:18).

A közvetlen újrahasznosítás nehézsége, hogy viszonylag jó minőségű akkumulátor szükséges hozzá, és a szállítás, a szortírozás és a szétszerelés költségeit nem lehet megtakarítani. Egyelőre még kutatási fázisban van, specializált felsze-

relést igényel, és ipari méretű gazdaságossága még nem bizonyított (Tankou et al., 2023:21). Az újrahasznosítás korábbi lépéseihez hasonlóan ebben az esetben is átváltás van az akkumulátortechnológia megújulása és az újrahasznosítás nyereségessége között.

3.6. Összegzés

A körforgásos gazdaság elméleti vonzereje tagadhatatlan, ám az elektromos autók akkumulátorainak újrahasznosítása előtt még számos akadály áll. A szakirodalomban konszenzus van arról, hogy ez a tevékenység csak nagyon szigorú feltételek mellett lehet nyereséges. A jövedelmezőség erősen függ a szállítási költségektől, az akkumulátor összetételétől, a munkabérektől, az energiaáraktól és a nyersanyagpiac alakulásától. Sokatmondó, hogy az elektromos autók piaca iránt erősen elkötelezett McKinsey & Co. kutatói is csupán biztatnak azzal: a „nyereségesség a láthatáron van” (Breiter et al., 2023:6), ám számításaik is csak abban az esetben igazak, ha nem számolják be az összegyűjtés, a szállítás, a szortírozás, az előfeldolgozás és a kezdeti beruházás költségeit. Ez közvetett módon is jelzi, hogy az új európai szabályozás veszteséges tevékenységet ír elő a fenntarthatóság jegyében. Az igazi kérdés, hogy ki fizeti a veszteséget: az akkumulátorok gyártói, az elektromos autók gyártói vagy vevői, esetleg az adófizetők. Nem véletlen, hogy szinte mindegyik feldolgozott irodalom az újrahasznosítási folyamat jelentős állami támogatása mellett száll síkra.

Következtetések: akkumulátorhulladék-feldolgozó központtá válik-e Magyarország?

Első pillantásra önmagában az akkumulátoripar erőltetésével Magyarország nem feltétlenül lóg ki az európai trendekből. Az akkumulátorgyártás európai meghonosítása kiemelt stratégiai cél mind geopolitikai, mind klímavédelmi szempontból. Ami Magyarországot mégis megkülönbözteti az EU többi tagállamától, az az, hogy kormánya és gazdasági szereplői teljesen eltérő szempontrendszer alapján cselekszenek (2. táblázat). Az európai trendektől eltérően Magyarországon nincs törekvés a Kínától való függetlenedésre, a cél sokkal inkább egyfajta hídszerep, ennek révén összekötni a német autógyárakat a kínai akkumulátorgyártókkal (Czirfusz, 2022:8). Ez azonban éppen ellentétes az európai stratégiai autonómia céljaival, mert a kínai függőséget erősíti. Az iparág telepítése során a környezeti szempontok jóformán fel

sem merülnek. Tanulságos, hogy a nemzeti akkumulátor-iparági stratégia SWOT-elemzése az esetleges környezeti károkat még a kockázatok szintjén sem említi (ITM, 2022:19). Magyarországon az iparág meghonosításának legfontosabb indoka a gazdaságfejlesztés szempontja, elsősorban arra az elképzelésre építve, hogy ha a jövőben sok akkumulátorra lesz szükség a világon, akkor biztosan jó ötlet ezeket gyártani (ITM, 2022:6–9). Az akkumulátor-újrahasznosítás szabályozási és technológiai kérdéseit ebben a kontextusban érdemes vizsgálni (3. táblázat).

3. táblázat

Az európai és magyarországi akkumulátorgyártás motivációinak összehasonlítása

	EU iparpolitikája	Magyarországi iparpolitika
Az akkumulátoripar fejlesztésének geopolitikai indoka	Stratégiai autonómia	Híd szerep Kelet és Nyugat között – amely éppen az EU által leküzdeni kívánt függőséget erősíti
Környezeti szempont	Kiemelt	Elhanyagolható
Jövedelmezőség szempontjai	Mérsékelt fontos	Legfontosabb

Forrás: Saját szerkesztés az ebben a tanulmányban hivatkozott források alapján.

Az új európai akkumulátorszabályozás és az újrahasznosítás technológiai kérdéseinek vizsgálata alapján megállapítható, hogy a szabályozás az akkumulátorgyártó cégeket veszteséges tevékenységre kötelezi, amely ráadásul a gyártáshoz hasonlóan sok energiát és vizet igényel, miközben jelentős környezeti terheléssel jár. Bár várható technológiai fejlődés ezen a területen is, jól érzékelhető, hogy az innovációban erős a verseny az új akkumulátortechnológiák kidolgozása és az újrahasznosítás között. Miközben az új technológiák eltérő újrahasznosítást igényelnek, jóval nagyobb érdeklődés övezi a kidolgozásukat, mint a technológiailag már elavult akkumulátorok feldolgozását. Ebből adódóan nem lehet arra gazdaságstratégiát építeni, hogy majd jön egy nagy áttörés, és az akkumulátorok újrahasznosítása hirtelen nagy nyereséggel kecsegtető folyamat lesz.

Ha az akkumulátorhulladék újrahasznosítása veszteséges, vagy rendkívül kis nyereséget eredményez, akkor a cégek várhatóan mindent megtesznek majd azért, hogy ezeket a veszteségeket csökkentsék. Hogyan lehetséges ez? Mint a 3. részből kitűnik, a legnagyobb költségelem ebben a tevékenységben is a munkaerő, azaz az

alacsony bérű, tágabb értelemben alacsony munkaerő-költségű országokba nagy valószínűséggel szívesebben települnek a hulladékfeldolgozók, mint a magas bérű országokba. Szintén költségcsökkentő tényező lehet, ha e veszélyes tevékenység végzéséhez lazák a munkavédelmi és környezetvédelmi szabályok. Lehet spórolni a szállításon is. Ha a feldolgozóüzem közel van a végső felhasználói piacokhoz, akkor természetesen olcsóbb a szállítás is. Ez nem feltétlenül csupán az akkumulátorok fuvarozását érinti, hanem azokét az újrahasznosított nyersanyagokét is, amelyeket később fel kell használni a gyártásban. A piro- és hidromatellurgiához lényeges szempont az energia és a víz ára. Végül nem kerülhető meg az állami támogatás kérdése sem, szinte mindegyik áttekintő cikk ennek a jelentőségére hívta fel a figyelmet. Ha ezt a listát végigolvassuk, arra a következtetésre jutunk, hogy nagyjából ugyanolyan feltételekre van szükség az akkumulátorhulladék feldolgozásához, mint az akkumulátorok gyártásához.

Felvetődik a kérdés, hogy az akkumulátoripar magyarországi telepítéséhez szükségszerűen hozzátartozik-e az akkumulátorhulladék feldolgozása. Első megközelítésben nem feltétlenül. Az európai akkumulátorszabályozás a gyártói felelősséget mondja ki, és nem azt, hogy abban az országban kell az akkumulátort feldolgozni, ahol gyártották. A gyártók magyarországi jelenléte és magának az iparágak az igényei azonban Magyarországot ideális helyszínné teszik az akkumulátorhulladék hasznosításához. Ez a kérdés ráadásul nem is feltétlenül a jövőre vonatkozik. Egy-egy akkumulátorgyár a működésének megkezdésekor, a gépsorok pontos beállításáig nagy mennyiségű (a kibocsátás 30–50 százaléka) selejtet gyárt, amelyet a gyártáshoz lehetőleg minél közelebb kell feldolgozni, és ennek a költségeit minimalizálni kell. Erre szakosodott cégek már ma is jelen vannak Magyarországon, ilyen a dél-koreai SungEel Hitech Hungary Kft., amelynek Szigetszentmiklóson és Bátorlyerényén van üzeme. Mindkettő ellen számos bírsággal végződő eljárás indult már tüzesetek, rákkeltő anyagokkal történő veszélyeztetés, talaj-, levegő- és vízszennyezés miatt. Ezek a néhány millió forintos bírságok azonban eltörpülnek az árbevétel és az állami támogatás nagysága mellett. A bátonyterényi hulladékfeldolgozó 9,3 milliárd forintos beruházásához 2,8 milliárd forintos állami támogatást kapott, ami 30 százalékos támogatási arány (Bodnár, 2023b). Bár a sorozatos botrányok miatt a bátonyterényi üzem működését felfüggesztették (Bodnár, 2023c), a kormány nem mondott le az akkumulátorfeldolgozás állami támogatásáról. Az Alsózsoltára készülő, homályos hátterű Andrada cég 10 milliárd forintos beruházásához a magyar kormány 4,7 milliárd forint állami támogatást ítélt meg, azaz a támogatási arány 47 százalékos (Tamásné Szabó, 2023). Mindezek alapján megállapítható, hogy az akkumulátor-ér-

téklánc többi szereplőjével párhuzamosan települ be Magyarországra az akkumulátor-újrafeldolgozás a kormány erőteljes támogatásával.

Van-e esély arra, hogy a kormány a későbbiekben mégis ellenálljon az akkumulátorgyártó cégek nyomásának, és csak az akkumulátor-értéklánc egyéb elemeit támogassa és engedje be az országba? Önmagában az állami támogatások elmaradása is nagymértékben visszavethetné ezeket a beruházásokat, csakúgy, mint az erőteljesebb munka- és környezetvédelmi szabályozás. Ez azonban a teljes akkumulátor-értékláncot érintené, és feltehetően a gyártók erőteljes ellenállásába ütközne. Minél nagyobb szerepet játszanak a magyar gazdaságban ezek a gazdasági szereplők, annál erőteljesebb a befolyásuk a kormányra. A tevékenységükhöz a selejt feldolgozása miatt már kezdettől elengedhetetlen az újrahasznosítás, amelynek a gyártáshoz minél közelebb kell lennie, alacsony működési költséggel. Később a használt akkumulátorok felhalmozódásával kell megbirkózniuk, amire az európai szabályozás kényszeríti őket. Mindez még környezeti szempontból is indokolható, mert a cégek számára az alternatíva az illegális hulladéklerakás. Erre már szintén bőven van példa Magyarországról: Abasáron, Ikladon, Salgótarjánban, Mocsán is találtak már több ezer tonna illegális akkumulátorhulladékot (Bodnár, 2023a). Ha a kormány nem engedélyezi az újrahasznosítást, akkor a teljes értéklánc és a környezet is veszélybe kerülhet. Az, hogy eddig mekkora támogatást kaptak az újrahasznosítást végző cégek, jelzi, hogy mindezzel a kormány is tisztában van.

Az európai akkumulátorszabályozás és az akkumulátor-újrahasznosítás technológiájának áttekintése alapján levonható az a következtetés, hogy az újrahasznosítás a lítiumion-akkumulátorokra alapozott stratégia Achilles-sarka. A tevékenység az akkumulátor-értéklánc kikerülhetetlen eleme, ám a folyamat egészében jellemzően veszteséges. Az akkumulátorgyártás erőltetése Magyarországon önmagában is rendkívül csekély megtérüléssel kecsegtet (Gyórfy, 2023), ehhez képest az akkumulátor-újrahasznosítás még kevesebb haszonnal jár. Eközben a gyártáshoz hasonlóan energia- és vízigényes és a környezetet rendkívüli módon megterhelő tevékenység. Az európai célokkal ellentétben növeli a gazdasági függőséget, környezetpusztító és Magyarország számára nem jövedelmező. Ebben a kontextusban elemzőként szinte már értelmetlen is arról gondolkodni, hogy a program elősegíti-e az ország EU mögötti gazdasági felzárkózását, hanem sokkal inkább arra kell felhívni a figyelmet, hogy mennyire súlyosan veszélyezteti a jelenlegi magyarországi életkörülményeket, életminőséget és környezetet.

Hivatkozások

- Bhutada, G. (2022). *The Key Minerals in an EV Battery*. <https://elements.visualcapitalist.com/the-key-minerals-in-an-ev-battery/>
- Bodnár, Zs. (2023a). 1700 tonna illegálisan tárolt akku-hulladék elszállítását rendelte el a hatóság az abasári raktárból. *Átlátszó.hu*, augusztus 11. <https://atlatso.hu/orszagszerte/2023/08/11/1700-tonna-illegalisan-tarolt-akku-hulladek-elszallitast-rendelte-el-a-hatosag-az-abasari-raktarbol/>
- Bodnár, Zs. (2023b). Bőrkiütést, torokkparaszt, szájfájdalmat tapasztaltak a kormányhivatal emberei a selejtes akkukat feldolgozó üzemben. *Átlátszó.hu*, június 20. <https://atlatso.hu/orszagszerte/2023/06/20/borkiutest-torokkparast-szajfajdalmat-tapasztaltak-a-kormanyhivatal-emberei-a-selejtes-akkukat-feldolgozo-uzemben/>
- Bodnár, Zs. (2023c). Felfüggesztette a bátonyterenyi akkumulátor-feldolgozó működését a kormányhivatal. *Átlátszó.hu*, augusztus 23. <https://atlatso.hu/orszagszerte/2023/08/23/felfuggesztette-a-batonyterenyi-akkumulator-feldolgozo-mukodeset-a-kormanyhivatal/>
- Breiter, A., Linder, M., Schuldt, T., Siccado, G., & Vekić, N. (2023). Battery Recycling Takes the Driver's Seat. *Insight*, 13 March. McKinsey & Co., San Francisco. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-recycling-takes-the-drivers-seat>
- Czirfusz, M. (2022). *Akkumulátoripari fellendülés Magyarországon: Az értéklánc szereplői, dolgozói és szakszervezeti perspektívák*. Friedrich-Ebert-Stiftung, Budapest. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/budapest/19980-20230301.pdf>
- Di Carlo, D., & Schmitz, L. (2023). Europe first? The rise of EU industrial policy promoting and protecting the single market. *Journal of European Public Policy*, 30(10), 2063–2096 <https://doi.org/10.1080/13501763.2023.2202684>
- EIT InnoEnergy (2020). *European Battery Alliance. Deliverable: Industrial Policy*. https://eit.europa.eu/sites/default/files/industrial_policy_for_european_battery_alliance.pdf
- Éltető, A. (2023). *Akkumulátorgyártás Magyarországon*. VGI Műhelytanulmányok 147. ELKH Közgazdaság- és Regionális Tudományi Kutatóközpont Világgazdasági Intézet, Budapest. https://vgi.krtk.hu/wp-content/uploads/2023/03/Elteto_MT_147.pdf
- Európai Bizottság (2021). *Updating the 2020 New Industrial Strategy: Building a Stronger Single Market for Europe's recovery*. COM(2021) 350 final. https://commission.europa.eu/system/files/2021-05/communication-industrial-strategy-update-2020_en.pdf
- Európai Bizottság (2023). *Temporary Crisis and Transition Framework for State Aid measures to support the economy following the aggression against Ukraine by Russia* (2023/C 101/03). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0317\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023XC0317(01))
- Európai Bizottság Környezeti Főigazgatóság (2023). *Circular economy: New law on more sustainable, circular and safe batteries enters into force*. https://environment.ec.europa.eu/news/new-law-more-sustainable-circular-and-safe-batteries-enters-force-2023-08-17_en
- Európai Tanács (2023). *Fit for 55*. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- Farkas, B., Pelle, A., & Somosi, S. (2023). Az Európai Unió és a geoökonómiai kihívások – ipar- és versenypolitikai válaszok. *Közgazdasági Szemle*, 70(11), 1193–1212. <https://doi.org/10.18414/KSZ.2023.11.1193>
- Győrffy, D. (2023). Iparpolitika és akkumulátorgyártás Magyarországon és Svédországban. *Közgazdasági Szemle*, 70(3), 245–273. <https://doi.org/10.18414/KSZ.2023.3.245>
- Halmái, P. (2023). Globalizáció versus deglobalizáció. *Hitelintézeti Szemle*, 22(2), 5–24. <https://doi.org/10.25201/hsz.22.2.5>
- Hantanasirisakul, K., & Sawangphruk, M. (2023). Sustainable Reuse and Recycling of Spent Li-Ion batteries from Electric Vehicles: Chemical, Environmental, and Economical Perspectives. *Global Challenges*, 7, 2200212. <https://doi.org/10.1002/gch2.202200212>

- IEA (2022). *Global EV Outlook 2022 – Securing supplies for an electric future*. International Energy Agency, Párizs. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>
- ITM (2022). *Nemzeti akkumulátor iparági stratégia*. Innovációs és Technológiai Minisztérium, Budapest. <https://kormany.hu/dokumentumtar/nemzeti-akkumulator-iparagi-strategia-2030>
- Lander, L., Cleaver, T., Rajaeifar, M. A., Kendrick, E., Edge, J. S., & Offer, G. (2021). Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *iScience*, 27(7), 102787. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102787>
- Lander, L., Tagnon, C., Nguyen-Tien, V., Kendrick, E., Elliott, R. J. R., Abbott, A. P., Edge, J. S., & Offer, B. (2023). Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs. *Applied Energy*, 331, 120437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120437>
- Losonczi, M. (2022). Gazdasági globalizáció és fenntarthatóság. *Educatio*, 31(4), 555–570 <https://doi.org/10.1556/2063.31.2022.4.3>
- Melin, H. E., Rajaeifar, M. A., Ku, A. Y., Kendall, A., Harper, G., & Heidrich, O. (2021). Global Implications of the EU Battery Regulation. *Science*, 373, 384–387. <https://doi.org/10.1126/science.abh1416>
- Nagy, Á. A., Hornyák, M., Fűrész, D. I., & Erdős, A. (2021). Úton a körforgásos gazdaság felé – Szisztematikus irodalomlemezés. *Közgazdasági Szemle*, 68(10), 1109–1129. <https://doi.org/10.18414/KSZ.2021.10.1109>
- Neumann, J., Petranikova, M., Meeus, M., Gamarra, J. D., Younesi, R., Winter, M., & Nowaket, S. (2022). Recycling of Lithium-Ion Batteries – Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. *Advanced Energy Materials*, 12, 2102917. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102917>
- Pardi, T. (2023). A European Perspective of a Fast-track Transition to Electromobility. In: Galgóczi, B. (Ed.): *On the Way to Electromobility – A Green(er) but More Unequal Future?* (pp. 21–71). European Trade Union Institute, Brussels. https://www.etui.org/sites/default/files/2023-03/On%20the%20way%20to%20electromobility-a%20green%28er%29%20but%20more%20unequal%20future_2023.pdf
- Pichler, M., Krenmayr, N., Schneider, E., & Brand, U. (2021). EU industrial policy: Between modernization and transformation of the automotive industry. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 38, 140–152. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.12.002>
- Rao, R. (2021). Chart: Behind the Three-Decade Collapse of Lithium-Ion Battery Costs. *IEEE Spectrum*, 26 May. <https://spectrum.ieee.org/chart-behind-the-three-decade-collapse-of-lithium-ion-battery-costs>
- Reinhart, L., Vrucak, D., Woeste, R., Lucas, H., Rombach, E., Friedrich, B., & Letmathe, P. (2023). Pyrometallurgical recycling of different lithium-ion battery cell systems: Economic and technical analysis. *Journal of Cleaner Production*, 416, 137834. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137834>
- Ritchie, H. (2021). *The price of batteries has declined by 97% in the last three decades*. <https://ourworldindata.org/battery-price-decline>
- Schade, W., Haug, I., & Berthold, D. (2023). Emerging battery value chains in Europe. In: Galgóczi, B. (Ed.): *On the Way to Electromobility – A Green(er) but More Unequal Future?* (pp. 73–113). European Trade Union Institute, Brussels. https://www.etui.org/sites/default/files/2023-03/On%20the%20way%20to%20electromobility-a%20green%28er%29%20but%20more%20unequal%20future_2023.pdf
- Shahjalal, M., Roy, P. K., Shams, T., Fly, A., Chowdhury, J. I., Ahmed, M. R., & Liu, K. (2022). A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues. *Energy*, 241, 122881. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122881>
- Slattry, M., Dunn, J., & Kendall, A. (2021). Transportation of electric vehicle lithium-ion batteries at end-of-life: A literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105755. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105755>

- T&E (2023). *A European Response to US IRA: How Europe can use its soft and financial powers to build a successful electric vehicle value chain*. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/01/2023_01_TE_Raw_materials_IRA_report-1.pdf
- Tamásné Szabó, Zs. (2023). Nem mond le az Andrada az alsószolcsei akku-újrahasznosító beruházásról. *24.hu*, szeptember 25. <https://24.hu/fn/gazdasag/2023/09/25/akkumulatorgyartas-andrada-alsozolca-akkumulator-ujrahasznosito-engedelyezes/>
- Tankou, A., Bieker, G., & Hall, D. (2023). *Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: Assessing challenges and policy approaches*. ICCT White Paper. International Council on Clean Transportation, Washington, DC. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23.pdf>
- The European Parliament and the Council of the European Union (2023). *Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>
- Tshabalala, N. (2023). EV batteries need a new life. *Climate and Capital Media*, 30 May. <https://www.climateandcapitalmedia.com/ev-batteries-need-a-new-life/>
- UN (2019). *Manual of Tests and Criteria. 7th Revised Edition*. ST/SG/AC.10/11/Rev.7. https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/manual/Rev7/Manual_Rev7_E.pdf
- Wang, Y., Zhai, Q., & Yuan, C. (2023). Analysis of Direct Recycling Methods for Retired Lithium-ion Batteries from Electric Vehicles. *Procedia CIRP*, 116, 702–707. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.118>.