

A ZÖLD HIDROGÉN ÉS A LÍTIUMION-AKKUMULÁTOROS ENERGIATÁROLÁS FENNTARTHATÓSÁGI ÉS GAZDASÁGI ÉRTÉKELÉSE: SZISZTEMATIKUS SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS ÉS BIBLIOMETRIAI ELEMZÉS

Sárics Sarolta Zsófia

*PhD-hallgató, tudományos segédmunkatárs, Pécsi Tudományegyetem, Közgazdaságtudományi Kar,
Gazdálkodástani Doktori Iskola; sarics.sarolta@ktk.pte.hu; ORCID: 0009-0001-4917-1965*

DOI: 10.15170/terinno.2026.19.01.02

Absztrakt: A kutatás célja szisztematikus irodalomkutatás és bibliometriai elemzés alkalmazásával feltárni a zöld hidrogén és a lítiumion-akkumulátorok kutatási trendjeit, tudományos együttműködési hálózatait és tematikus fejlődési irányait, különös tekintettel a gazdasági szempontokra. A vizsgálat a Scopus- és WoS-adatbázisokban azonosított publikációk bevonási és kizárási kritériumok szerinti szűrésével valósult meg, a duplikátumok eltávolítása és az adatkinyerési folyamat dokumentálása mellett. A vizsgálatot az energiatárolási technológiák folyamatos fejlesztése, a megújulóenergia-integráció kulcsszerepe, az életciklus-elemzési (LCA) megközelítések és a kapcsolódó gazdasági kérdések indokolták. Az eredmények azonosítják a terület legmeghatározóbb publikációit, valamint rávilágítanak a technológiák eltérő alkalmazási előnyeire. A zöld hidrogén elsősorban hosszú távú, nagy kapacitású energiatárolásra, míg a lítiumion-akkumulátorok a rövid és középtávú hálózati rugalmasság biztosítására alkalmasabbak. A kutatás megállapítja, hogy e két technológia komplementer alkalmazása hozzájárulhat a jövő integrált energiarendszereinek optimalizálásához, a fenntarthatósági és gazdasági célkitűzések eléréséhez.

Kulcsszavak: *bibliometria, LCA, lítiumion-akkumulátor, zöld hidrogén*

THE ROLE OF GREEN HYDROGEN AND LITHIUM-ION BATTERIES IN SUSTAINABLE ENERGY STORAGE: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND BIBLIOMETRIC EVALUATION USING LCA AND ECONOMIC APPROACHES

Abstract: The aim of the research is to explore research trends, scientific collaboration networks, and thematic development directions in green hydrogen and lithium-ion batteries, with a particular focus on economic aspects, using systematic literature research and bibliometric analysis. The study was conducted by filtering publications identified in the Scopus and WoS databases according to inclusion and exclusion criteria, removing duplicates and documenting the data extraction process. The study was motivated by the continuous development of energy storage technologies, the key role of renewable energy integration, life cycle analysis approaches, and related economic issues. The results identify the most influential publications in the field and highlight the different application advantages of the technologies. Green hydrogen is primarily suitable for long-term, high-capacity energy storage, while lithium-ion batteries are more suitable for providing short- and medium-term grid flexibility. The research concludes that the complementary use of these two technologies can contribute to the optimization of future integrated energy systems and the achievement of sustainability and economic goals.

Keywords: *bibliometrics, LCA, lithium-ion battery, green hydrogen*

1. Bevezetés

A villamosenergia-rendszerek dekarbonizációja és a megújuló termelés, különösen a nap-, víz- és szélenergia intenzív bővülése miatt a rendszerszintű rugalmasság és az energiatárolás a jövő integrált energiarendszereinek egyik meghatározó kérdésévé vált világszerte. A megújuló erőforrásokból előállított energia tárolása azonban számos technológiai és gazdasági kérdést von magával, mivel a tárolás önmagában nem egy technológiához kapcsolódik, hanem több lehetőséget foglal magába, mint például a lítiumion-akkumulátort, vagy a zöldhidrogén (GH₂)-technológiát. Ezen technológiák egymáshoz viszonyítva jelentős előállítási, működési, alkalmazási, ellátásbiztonsági, utóéleti és gazdasági különbségekkel rendelkeznek, valamint, jellemzően eltérő szerepeket töltenek be. A lítiumion-rendszerek gyakran rövid-középtávú rugalmasságot adnak, míg a zöld hidrogén a hosszabb távú és nagy kapacitású energiatárolás irányába pozícionálható, különösen „power-to-hydrogen/power-to-gas”-rendszerekben (Zakeri & Syri, 2015; Pellow et al., 2015; Uliasz-Misiak et al., 2025). A fenntarthatósági döntések ugyanakkor nem hozhatók meg kizárólag műszaki paraméterek alapján, a környezeti hatások (életciklus-szemlélet), mint az előállítás során keletkező kibocsátás, vagy a vízfelhasználás, a gazdasági megvalósíthatóság és a rendszerszintű költségek együttes értelmezése szükséges (Xia & Li, 2022). A felsorolt paraméterek együttes vizsgálata nyújthat olyan összképet, mely segíthet a technológiák optimális felhasználási területeinek azonosításában. A kutatási téma ezek alapján a zöld hidrogén és a lítiumion-akkumulátoros energiatárolás szakirodalmának szisztematikus feltárása, különösen életciklus-elemzési (LCA) és technoökonómiai (TEA) keretekkel, valamint gazdasági szempontokkal összekapcsolva.

2. A kutatás célja

A vizsgálat célja szisztematikus irodalomkutatás és bibliometriai elemzés alkalmazásával feltárni a zöld hidrogén és a lítiumion-akkumulátorok fenntartható energiatárolásban betöltött szerepének kutatási trendjeit, tudományos együttműködési hálózatait és tematikus fejlődési irányait, különös tekintettel a gazdasági szempontokra. A vizsgálat további célja az életciklus-elemzéshez (LCA) és a technoökonómiai elemzéshez (TEA) kapcsolódó tematikus klaszterek azonosítása. Emellett a tanulmány azt is vizsgálja, hogy a szakirodalomban hogyan jelenik meg a két technológia gazdaságossági értékelése és lehetséges komplementer alkalmazása. A szisztematikus szakirodalmi áttekintés alkalmazása azért indokolt, mert előre rögzített keresési, kiválasztási és szintézislogikára épül. Ez növeli a kutatás reprodukálhatóságát, csökkenti a szelekciós torzítás kockázatát, és támogatja a meghatározó szakirodalmak azonosítását (Siddaway et al., 2019).

3. Elméleti háttér

A villamosenergia-rendszerek dekarbonizációja mellett az ellátásbiztonság és a rendszerszintű rugalmasság fenntartását egyre inkább az energiatárolási technológiák fejlődése határozza meg. A szakirodalom alapján az energiatárolás kulcsszerepet játszik a változékony megújuló energiaforrások integrációjában, a csúcsterhelés-csökkentésben és a hálózati stabilitás

biztosításában (Li et al., 2024). Az energiatárolási technológiák alkalmazhatósága ugyanakkor területileg is eltérő lehet, mivel a megújulóenergia-potenciál, a hálózati infrastruktúra, az ipari kereslet és az innovációs környezet térségenként különböző feltételekkel rendelkezik (Coenen et al., 2012; Hansen & Coenen, 2015). Yudhistira et al. (2022) alapján a lítiumion-akkumulátorok környezeti teljesítményét számos életciklus-elemzés vizsgálta hálózati energiatárolási alkalmazásokra. A hidrogéntermelés, -tárolás és -felhasználás környezeti terheit és klímaburkolatát egyre több LCA- és technoökonómiai tanulmány értékeli (Urs et al., 2023; Osman et al., 2024).

A hidrogén, különösen a megújuló villamos energiával előállított zöld hidrogén, a szakirodalom alapján, elsősorban a hosszabb időléptékű, nagyobb kapacitású energiatárolási megoldások között jelenik meg, például földalatti tárolás formájában, így kiegészítve a rövid távú akkumulátoros megoldásokat (Uliasz-Misiak et al., 2025). A hidrogéntermelés, -tárolás és -felhasználás folyamatláncát érintő LCA-k ugyanakkor rámutattak, hogy a technológia fenntarthatósági teljesítménye erősen függ a villamosenergia-mix dekarbonizáltságától, a felhasznált elektrolizáló technológiától és a tárolási módtól (Osman et al., 2024). Továbbá a technoökonómiai elemzések (TEA) azt vizsgálják, hogy milyen feltételek mellett válik versenyképpé más energiatárolási alternatívákhoz képest, például kereskedelmi épületek vagy mikrohálózatok energiatároló közegének szerepében (Urs et al., 2023). A zöld hidrogén fenntarthatósági és technológiai paraméterei mellett ugyanakkor nem elhanyagolandó a gazdasági paraméterek vizsgálata sem, mivel a technológiai kockázatokból és az alkalmazási lehetőségek újszerűségéből adódóan a teljes életciklust vizsgálva jelentős költségek és további finanszírozási kockázatok merülhetnek fel. E költségeket és kockázatokat meghatározhatják a beruházási projektek mérete, a földrajzi adottságok, a finanszírozási támogatási lehetőségek és a terület energiaszerkezetének. A hidrogén és a lítiumion-akkumulátorok grid szintű összehasonlításai szerint a két technológia nettó energiamérlege, költségszerkezete és időléptéke eltérő. A hidrogén az alacsonyabb hatásfok ellenére skálázhatósága miatt szezonális kiegyenlítésre alkalmas, míg az akkumulátorok a magasabb hatásfok és gyors válasz révén szabályozási és rövid távú kiegyenlítési feladatokra optimálisak (Pellow et al., 2015). Területfejlesztési szempontból ezért indokoltabb lehet az egységes technológiai megoldás helyett, a helyi adottságokhoz illeszkedő, vegyes energiatárolási portfóliók kialakítása. A jelen szisztematikus áttekintés elméleti kerete tehát az energiarendszer-szintű dekarbonizáció, a fenntarthatósági és gazdasági értékelő módszerek, valamint a komplementer energiatárolási portfóliók koncepciójára épül.

4. Kutatási kérdések és alkalmazott módszertan

A bemutatott elméleti háttér alapján a tervezett SLR a következő kutatási kérdésekre fókuszál:

- Milyen időbeli, földrajzi és tematikus trendek figyelhetők meg a zöld hidrogén és lítiumion alapú, fenntartható energiatárolást elemző fenntarthatósági és gazdasági vizsgálatok szakirodalmában?
- Milyen szerzői, intézményi és országok közötti együttműködési hálózatok rajzolódnak ki a Scopus- és WoS-adatbázisokból kinyert publikációk bibliometriai elemzése alapján?

- Milyen tematikus klaszterek azonosíthatók a kulcsszavak elemzésével?
- A vizsgált tanulmányok milyen mértékben és milyen módszerekkel hasonlítják össze a zöld hidrogént és a lítiumion-akkumulátoros energiatárolást környezeti és gazdasági szempontból, és milyen következtetések fogalmazhatók meg a két technológia komplementer alkalmazhatóságára a jövő energiarendszereiben?

A szisztematikus szakirodalmi áttekintés célja, hogy előre definiált, fókuszált kutatási kérdésre adjon a lehető legmegbízhatóbb választ az adott témában rendelkezésre álló empirikus és elméleti bizonyítékok összegyűjtésével, értékelésével és szintézisével (Pollock & Berge, 2018; Siddaway et al., 2019).

Az irodalomkutatás két, nemzetközileg elismert bibliográfiai adatbázisra épült, a Scopusra és Web of Science-re (WoS). A bibliometriai módszertani szakirodalom alapján e két adatbázis kombinált használata széles lefedettséget biztosít, ugyanakkor eltérő indexálási politikájuk miatt szükséges a duplikátumok szisztematikus kezelése is (Aria & Cuccurullo, 2017; Li et al., 2024). A szakirodalmi keresés és szűrés több egymásra épülő lépésben történt. A folyamat bevonási és kizárási kritériumokra épült, amelyek a végső korpusz tematikus relevanciáját biztosították. Az első lépésben a Scopus és a Web of Science adatbázisokban kerültek azonosításra azok a publikációk, amelyek a fenntartható energiatárolás, a lítiumion-akkumulátorok, a zöld hidrogén, valamint az életciklus-elemzési és gazdasági értékelési megközelítések metszetéhez kapcsolódnak. A keresési stratégia Boolean-logikára épült, mivel a szisztematikus szakirodalmi keresések reprodukálhatóságának alapfeltétele az adatbázis-specifikus keresőkifejezések, keresési mezők, szűrések és korlátozások pontos dokumentálása (Rethlefsen et al., 2021). A kulcsszócsoportok között „AND” kapcsolat, az egyes kulcsszócsoportokon belül pedig, „OR” kapcsolat érvényesült. A bevonási kritériumok alapján a korpuszba lektorált tudományos folyóiratokban megjelent, a vizsgált témához kapcsolódó publikációk kerülhettek be. A keresőkifejezések négy kulcsszócsoportra épültek: energiatárolási kontextus, technológiai fókusz, értékelési módszerek, valamint fenntarthatósági és gazdaságossági dimenzió. A szűrés során a kulcsszócsoportok között szigorított logika érvényesült. A végső korpuszba azok a dokumentumok kerülhettek be, amelyek tartalmilag kapcsolódtak az energiatárolási technológiákhoz, valamint legalább egy értékelési vagy gazdasági dimenzióhoz. Ezen vizsgálat során a felsorolt feltételeknek megfelelően került beállításra a Scopus- és WoS-adatbázisokban történő szűrés. Az első kulcsszócsoport az energiatárolási kontextust határozta meg: „energy storage”, „renewable energy storage”, „renewable integrat*”, „grid storage” és „stationary energy storage”. A második kulcsszócsoport a vizsgált technológiákhoz kapcsolódott, így tartalmazta a „lithium-ion battery”, „Li-ion battery”, „battery life cycle”, „battery LCA”, „battery sustainability”, valamint a „green hydrogen”, „green hydrogen LCA”, „green hydrogen energy storage”, „power-to-hydrogen”, „green hydrogen storage” és „green hydrogen sustainability” kifejezéseket. A harmadik kulcsszócsoport az értékelési módszereket fedte le, ideértve a „life cycle assessment”, „LCA”, „techno-economic analysis”, „TEA” és „environmental impact assessment” kifejezéseket. A negyedik kulcsszócsoport a fenntarthatósági és gazdasági dimenziót ragadta meg a „sustainability”, „environmental sustainability”, „carbon footprint”,

„economic feasibility” és „cost-benefit analysis” kulcsszavakkal. A query kialakítását az előzetesen azonosított kulcsszócsoporthoz, valamint a kapcsolódó bibliometriai szakirodalmak és a kutatási kérdések alapozták meg. A lekérdezések 2026. januári dátummal történtek, melynek részleteit a query alapú adatbázis-lekérdezés melléklete (*1. melléklet*) mutatja be. Ahogy ez az említett *1. mellékletben* is látható, ugyanazon query alapján történt a lekérdezés mindkét adatbázison, ugyanakkor eltérő, adatbázis-specifikus keresési mező alkalmazásával. A Scopus-lekérdezés 15.071 darab dokumentumot azonosított, míg a Web of Science (WoS)-lekérdezés csupán 83 darab találatot eredményezett. A Scopus és WoS találataszámai között jelentős eltérés mutatkozott, ami az adatbázisok eltérő lefedettségével, indexálási gyakorlatával, dokumentumtípus-kezelésével és tudományterületi kategóriarendszerével magyarázható (Mongeon & Paul-Hus, 2016). Ez az eredmény módszertani korlátként kiemelendő, mivel így a végső korpuszban a Scopusból származó dokumentumok nagyobb súllyal szerepelnek. A találatok tárgyterületi kategóriák alapján kerültek további szűkítésre, ezeket a témakör szűrési feltételeit tartalmazó *2. melléklet* mutatja be részletesen. Erre azért volt szükség, mert a tanulmány nem általános mérnöki-technológiai elemzésre, hanem a zöld hidrogén és a lítiumion-akkumulátoros energiatárolás fenntarthatósági, technoökonómiai és gazdaságossági értékelésére fókuszál. Ezért fontos a kutatási kérdések témakörének szempontjából irreleváns területek kizárása. Ennek következtében a tárgyterületi szűkítés célja az volt, hogy a végső korpusz elsősorban a költség-, megvalósíthatósági, beruházási, döntéstámogatási és gazdaságossági szempontokat is tartalmazó publikációkat foglalja magában. Így a Scopus esetében a Business, Management and Accounting, valamint az Economics, Econometrics and Finance kategóriák kerültek bevonásra. A WoS esetében a szűrés az Economics és az Operations Research Management Science kategóriákra korlátozódott. A területi szűrést követően a Scopus-adatbázis 1015 db dokumentumot, míg a WoS-lekérdezés 2 db publikációt eredményezett. A lekérdezéseket követően a két adatbázis az RStudio segítségével összevonásra került, mely 1017 darab publikációt tartalmazott, majd a duplikátumszűrés elvégzésével egy egyedi rekordokat tartalmazó, további szűrésre alkalmas adatbázis jött létre 1014 darab irodalommal.

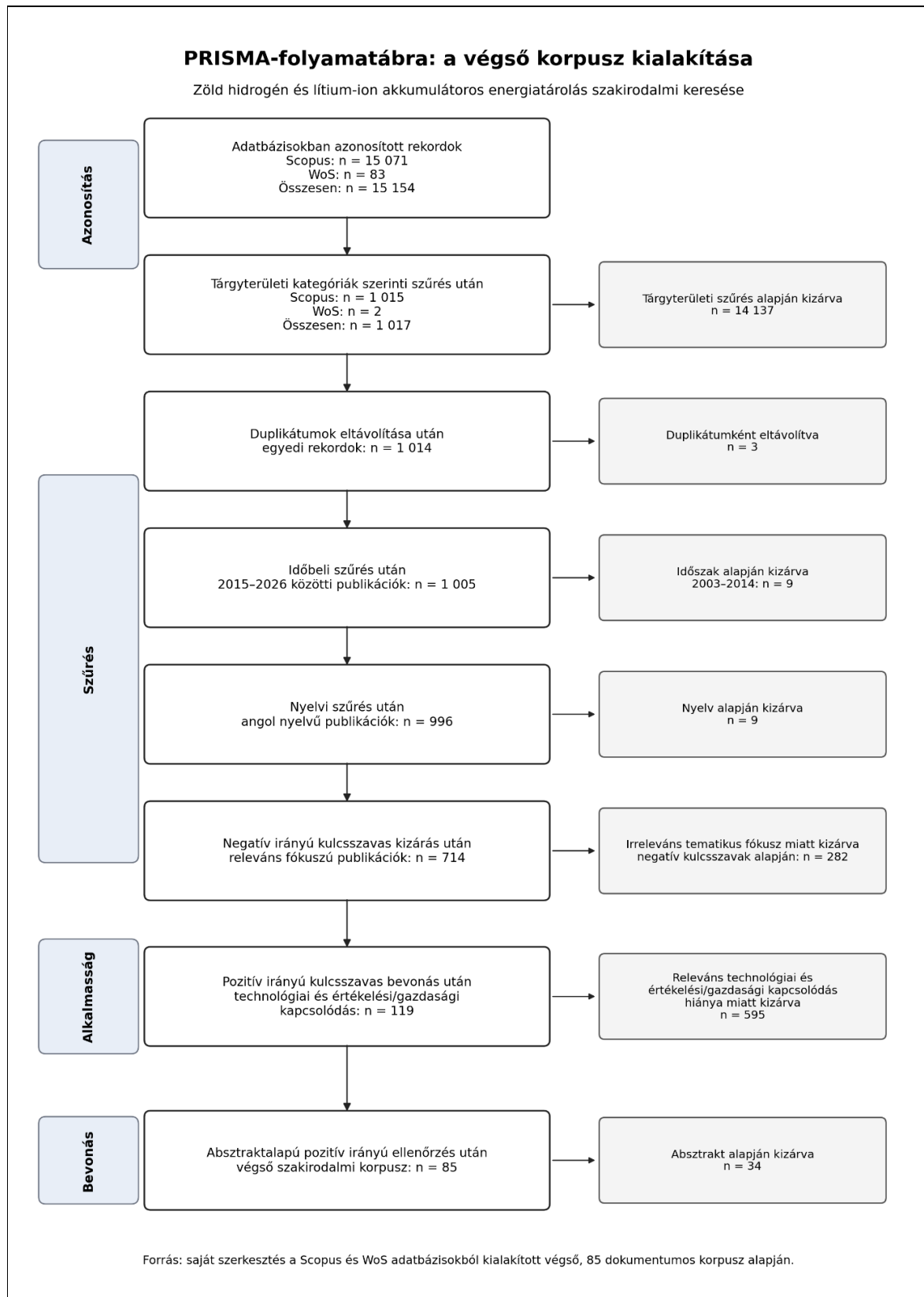
Ezt követően az elkészült adatbázisban a kizárási feltételek futtatása következett. A kizárási feltételeknél több meghatározó szempont került figyelembevételre, melyek a végső adatelemzést készítették elő. A kizárási feltételek negatív vagy pozitív irányba történtek. A negatív irányú kizárás azt jelentette, hogy ha a megadott paramétert tartalmazta az adott dokumentum, akkor kizárásra került a végső mintából. Míg a pozitív irányú szűrés azt jelentette, hogy az adott dokumentum kizárólag abban az esetben kerülhetett a végső mintába, ha a meghatározott feltételnek eleget tett. Elsőként időbeli szűrés történt. Bár a lekérdezett publikációk 2003 és 2026 közé estek, a végső vizsgálati időszak 2015–2026-ra szűkült. A kezdőév választását a fenntartható fejlődési célok megjelenése, valamint a megújulóenergia-integrációhoz és az energiarendszerek dekarbonizációjához kapcsolódó tudományos diskurzus erősödése indokolta (Egyesült Nemzetek Szervezete, 2015). Az időbeli szűrést követően 1005 dokumentum maradt a mintában, majd az angol nyelvű publikációkra történő szűkítés után az adatbázis 996 tételt tartalmazott.

A tematikus relevancia biztosítása érdekében ezt a kulcsszavas szűrés követte. Jelentős mennyiségű dokumentum, bár formálisan illeszkedett valamely keresőkifejezéshez, tartalmilag nem kapcsolódott a kutatási kérdésekhez. Az irodalmak kulcsszavainak áttekintése után, a negatív irányú szűrés kizárta azokat a dokumentumokat, amelyek a mobilitás és járműipari (3.A), a marketing és fogyasztói magatartás fókuszú (3.B), az általános energiatárolás nélküli logisztikai (3.C), a hulladék- és szennyvízkezelési (3.D) vagy energiatároláshoz nem kötődő városfejlesztési (3.E) fókuszuk miatt nem illeszkedtek a kutatási kérdésekhez. Az említett kategóriákba tartozó kulcsszavakat a 3., kulcsszó alapú kizárási kritérium szűrés *melléklete* mutatja be részletesen. Ezt követően 714 publikáció maradt. A pozitív irányú kulcsszavas szűrés logikáját a kutatási kérdésekben meghatározott elemzési fókuszok alakították. A szűrés három fő kulcsszócsoporthoz történt, a további elemzésbe azok a dokumentumok kerülhettek be, amelyek kapcsolódtak a technológia és energiatárolási (4.A), az értékelési módszertani (4.B), vagy a gazdasági, pénzügyi és kockázati (4.C) dimenziókhoz. A részletes kulcsszólistát a 4., kulcsszó alapú bevonási kritérium szűrés *melléklete* tartalmazza. A kulcsszócsoporthoz nem egymástól függetlenül szerepeltek, hanem kombinált szűrési logika szerint kapcsolódtak össze. Ennek megfelelően a szűrés logikája a következőképpen írható le: „4.A AND (4.B OR 4.C)”. Ez a logika biztosította, hogy a korpusz ne általános energiatárolási publikációkból álljon. A végső mintába olyan tanulmányok kerültek, amelyek a zöld hidrogénhez és/vagy a lítiumion-akkumulátoros energiatároláshoz kapcsolódó fenntarthatósági, életciklus-elemzési, technoökonómiai vagy gazdaságossági szempontokat is vizsgáltak. A pozitív kulcsszavas szűrést követően 119 publikáció maradt az adatállományban.

A pozitív kulcsszavas szűrést az absztrakt alapú pozitív irányú ellenőrzés követte, amelynek célja a dokumentumok tartalmi relevanciájának végső megerősítése volt. Erre azért volt szükség, mert a kulcsszavak alapján relevánsnak tűnő publikációk nem minden esetben illeszkednek ténylegesen a kutatási kérdésekhez. A kulcsszavak kiválasztása a kutatás fókuszához igazodott: egyrészt azonosítaniuk kellett a technológiai és energiatárolási kapcsolódást (5.A), másrészt a fenntarthatósági vagy gazdasági jelenlétet (5.B). Ahogy az 5., absztrakt alapú pozitív irányú kulcsszavas szűrés *melléklete* is bemutatja, az első csoportba (5.A) a lítiumion-akkumulátorokra, a zöld hidrogénre, az energiatárolásra és a megújulóenergia-integrációra utaló kifejezések kerültek. A második csoportba (5.B) az életciklus-elemzéshez, a környezeti értékeléshez, a gazdasági megvalósíthatósághoz, a beruházási elemzéshez és a pénzügyi-kockázati szempontokhoz kapcsolódó fogalmak tartoztak. A pozitív irányú szűrés során a két feltétel együttes teljesülését vizsgáltam, tehát a végső korpuszba csak azok a publikációk kerülhettek be, amelyek legalább egy releváns 5.A csoporttal és legalább egy 5.B csoporttal való kapcsolódást mutattak. Ezen kulcsszavak kijelölése biztosította annak ellenőrzését, hogy a megelőző szűrések után fennmaradó dokumentumok, absztraktjuk alapján is ténylegesen illeszkednek-e a kutatási kérdésekhez. A cél tehát nem pusztán a technológiai említések azonosítása volt, hanem annak biztosítása, hogy a végső korpusz a zöld hidrogén és/vagy a lítiumion-akkumulátoros hálózati alkalmazás vonatkozásában életciklus értékelési, gazdasági dimenziókat vizsgáló publikációkat tartalmazzon. Ennek eredményeképpen 85 publikáció került a végső szakirodalmi korpuszba.

A végső adatbázis kialakítási folyamatát a bevonási és kizárási kritériumok teljesítéséből adódó értékekkel a PRISMA-folyamatábra (1. ábra) szemlélteti.

1. ábra: PRISMA-folyamatábra



Forrás: saját szerkesztés.

5. Az eredmények értékelése

A 85 szakirodalomból álló végső korpusz elemzése és kiértékelése kézi áttekintéssel és a Biblioshiny program alkalmazásával történt. A dokumentumok jelentős része a 2020 utáni időszakhoz kapcsolódik, az irodalmak átlagosan az elmúlt 3,34 évben jelentek meg, valamint az éves növekedési ráta 10,5% volt. Ez a zöld hidrogén, a lítiumion-akkumulátoros energiatárolás, valamint az energiarendszerek dekarbonizációjához kapcsolódó kutatási érdeklődés erősödését jelzi. A 2022–2026 közötti időintervallum bizonyult a leginkább dominánsnak, mivel a korpusz 77,6 %-a, azaz 66 dokumentum erre az időszakra datálódik. A technológiai fókusz alapján a korpuszban a lítiumion-akkumulátorokhoz kapcsolódó publikációk jelennek meg nagyobb arányban, 45 dokumentummal. A hidrogénhez vagy zöld hidrogénhez 34 publikáció kapcsolódik, míg 9 dokumentum mindkét technológiai irányt érinti. A kategóriák átfedése miatt az értékek nem adhatók össze közvetlenül a 85 dokumentumos korpuszszámra. A témakörökhöz kapcsolódó értékek arra utalnak, hogy a vizsgált szakirodalomban a lítiumion-akkumulátorok továbbra is erősebben reprezentáltak, ugyanakkor a hidrogénhez és zöld hidrogénhez kapcsolódó vizsgálatok is növekvő jelentőséggel szerepelnek, ami a kutatási irány erősödésére utalhat. Módszertani megközelítés alapján, a korpusz 34 irodalma tartalmaz életciklus-elemzési vagy LCA-kapcsolódást, míg 31 dokumentum köthető a technoökonómiai elemzéshez vagy TEA-megközelítéshez. A gazdasági, beruházási, pénzügyi dimenzió kifejezetten erősen jelenik meg, mivel 72 dokumentum tartalmaz ilyen jellegű kapcsolódást. Ez megerősíti azt a kutatási törekvést, hogy a végső korpusz nem általános technológiai szakirodalmat fed le, hanem a fenntarthatósági, környezeti és gazdaságossági értékelések metszetében helyezkedik el. A két technológia közötti közvetlen vagy közvetett kapcsolódás szűkebb körben jelenik meg. A hidrogén és az akkumulátoros tárolás integrált vagy összehasonlító keretben 13 dokumentumban azonosítható, míg kifejezetten a lítiumion és hidrogén együttes megjelenése 9 publikációban figyelhető meg. Ez arra utal, hogy a két technológia komplementer értelmezése jelen van a szakirodalomban, de egyelőre nem a teljes korpusz domináns mintázataként. Az absztrakta alapú tematikus szűrés eredményeit a végső 85 dokumentumos korpusz alapján az *1. táblázat* foglalja össze. Mivel az egyes témakörök egymás átfedésében is megjelenhetnek a publikációkban, így a hozzájuk kapcsolódó értékek összessége meghaladja a 85 darabot. Erre példa, hogy a hidrogén vagy zöld hidrogén témaköre a publikációk 40%-ához kapcsolódik, és ezen belül, például 15,3% a hidrogént és akkumulátoros technológiát összehasonlító dokumentumok aránya. Így a táblázat azt mutatja meg, hogy egy-egy témakör milyen mértékben jelenik meg a teljes korpuszt tekintetében.

A szerzőszámot tekintve, a dokumentumokhoz összességében 370 szerző tartozik és az átlagos szerzőszám publikációnként 4,6. A szerzői kapcsolati háló alapján két, egymástól elkülönülő, de tematikusan részben kapcsolódó kutatói blokk azonosítható. A szerzői kapcsolati háló ábráján (*2. ábra*) látható a kék színnel jelölt klaszter, mely elsősorban a lítiumion-akkumulátorokhoz, az életciklus-elemzéshez, a környezeti hatásértékeléshez és a körforgásos gazdasági kérdésekhez kapcsolódó publikációkhoz köthető. Ezt támasztja alá, hogy a klaszterhez tartozó szerzői korpusz publikációinak kulcsszavai között nagy gyakorisággal

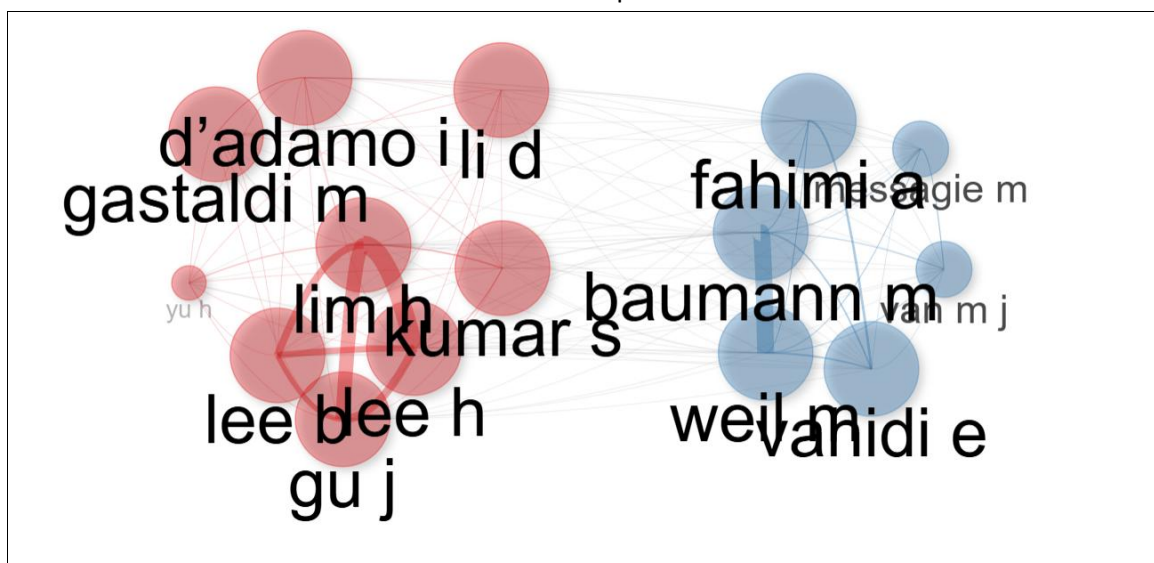
jelennek meg a „lithium-ion batteries”, „life cycle”, „life cycle assessment” és „environmental impact” kifejezések. Ezzel szemben a piros színnel jelzett csoport inkább a hidrogénhez, a hidrogéntároláshoz, a technoökonómiai értékeléshez, a költségelemzéshez és a megvalósíthatósági kérdésekhez kapcsolódik, amit a „hydrogen storage”, „hydrogen production”, „techno-economic analysis”, „economic analysis” és „cost benefit analysis” kulcsszavak jelenléte igazol. Ezek alapján a klaszterek két eltérő kutatási fókuszot jeleznek, ahol elkülönül egymástól a lítiumion/LCA-környezeti értékelési (kék klaszter), valamint a hidrogén/TEA-gazdaságossági irány (piros klaszter). Így tehát a végső adatállományból kinyert 6 szerzőt magába foglaló kék klaszter a technológiaspecifikusabb, a 9 szerzőt tartalmazó piros klaszter pedig a gazdaságspecifikusabb szerzői csoport.

1. táblázat: Az absztrakttalapú tematikus szűrés eredményei a végső 85 dokumentumos korpuszban

Témakör	Dokumentumok száma	Az összes dokumentumon belüli lefedettség
Lítiumion-akkumulátor	45	52,9%
Hidrogén vagy zöld hidrogén	34	40,0%
Életciklus-elemzés vagy LCA-kapcsolódás	34	40,0%
Technoökonómiai elemzés vagy TEA-kapcsolódás	31	36,5%
Gazdasági, költség-, beruházási vagy pénzügyi dimenzió	72	84,7%
Hidrogén és akkumulátoros tárolás együttes megjelenése	13	15,3%
A lítiumion és a hidrogén kapcsolatát együtt vizsgáló publikációk	9	10,6%

Forrás: saját szerkesztés.

2. ábra: Szerzői kapcsolati háló



Forrás: Biblioshinyval készített ábra a végleges korpuszból.

A földrajzi mintázatok vizsgálata a szerzői affiliációk kézi áttekintése alapján történt, mivel számos esetben egy publikációhoz több szerző kapcsolódott, valamint bizonyos esetekben a szerzők különböző országokhoz tartoztak. Így összesen 130 országelőfordulás vált azonosíthatóvá. Kontinensek tekintetében Európa, Ázsia és Észak-Amerika jelenik meg a legaktívabb tudományos térként. A dokumentumokban megjelenő szerzői affiliációk regionális előfordulását a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat: A dokumentumokban megjelenő szerzői affiliációk területi megoszlása

Kontinens	Előfordulás
Európa	53
Ázsia	49
Amerika	20
Afrika	5
Ausztrália	3
Összesen	130

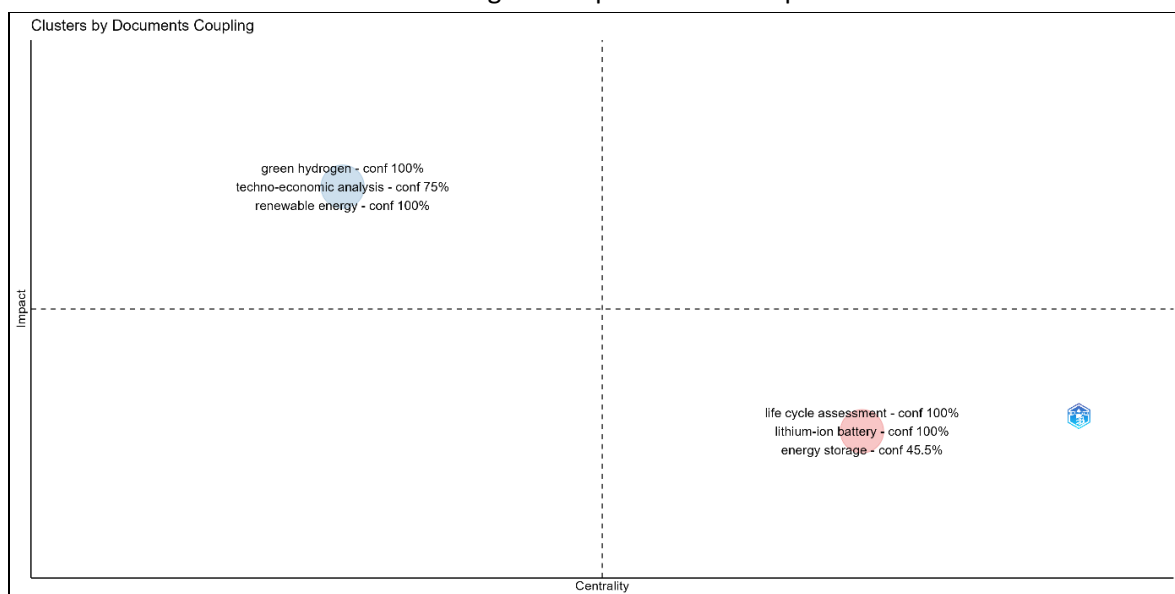
Forrás: saját szerkesztés.

Az országok szerinti bontás alapján a legnagyobb tudományos jelenlét Kínához kapcsolódik, amely 19 előfordulással szerepel a korpuszban. Ezt az Egyesült Államok követi 14, Olaszország 11, India 10, az Egyesült Királyság 8, valamint Németország, Irán, Kanada és Dél-Korea 5-5 előfordulással. A végső korpuszban dokumentum szinten 42 tanulmány rendelkezik legalább egy európai, 41 legalább egy ázsiai, míg 19 publikáció legalább egy amerikai szerzői affiliációval, ami azt jelenti, hogy például Európa esetében 42 dokumentumnak minimum az egyik szerzője egy európai országhoz tartozik. A kontinensekhez rendelt kulcsszavak tematikus mintázatai alapján azonosíthatók a földrajzi régiók eltérő kutatási orientációi is. Az európai szerzők publikációihoz kapcsolódó kulcsszavak jellemzően a fenntarthatósági, szabályozási és életciklus-szemléletű megközelítések dominanciájára utalnak. Az ázsiai szerzők esetében a technológiai fejlesztéshez, gyártáshoz, és teljesítményoptimalizáláshoz kötődő kifejezések számottevőek. Ez utalhat a régió ipari és technológiai fókuszára. Az amerikai szerzőkhöz kapcsolódó kulcsszavak tekintetében pedig, többnyire az innovációs, piaci, gazdasági és stratégiai megközelítések hangsúlyosabb szerepe figyelhető meg. A kulcsszavak alapján tehát nemcsak a kutatási témák gyakorisága, hanem az egyes kontinensekhez kötődő tudományos nézőpontok és prioritások is értelmezhetőek. Ugyanakkor, nagyon fontos kiemelni, hogy a régiós különbségek részletes tartalmi értelmezése óvatosságot igényel, mivel a bibliometriai adatok elsősorban a tudományos jelenlétet és együttműködési mintázatokat mutatják, nem pedig, közvetlenül a technológiai vagy gazdasági, beruházási sajátosságokat. Ennek egyik fő magyarázata, hogy egy publikáció affiliációi több esetben, több kontinensről tevődnek össze.

A dokumentumok témakörök szerinti, kulcsszó alapú klaszterbontása két egymástól elkülönülő, meghatározó csoportot azonosított. A klaszterek összetétele az összes dokumentumhoz tartozó kulcsszó figyelembevételével került kialakításra, és mindkét klaszter 41–41 dokumentumot fed le. A fennmaradó dokumentumok (3 db) kulcsszavaik alapján nem illeszkedtek egyértelműen a Biblioshiny szoftver segítségével megalkotott csoportokhoz, így a

teljes korpusz közel 48–48%-a minősült egymáshoz kapcsolódónak. A klaszterezés eredményéből kiderül, hogy a két csoport közötti fő különbséget az alkalmazott technológia specifikációja határozza meg, ezt a dokumentumok bibliográfiai kapcsolódásán alapuló tematikus klaszterek ábrája mutatja be (3. ábra). A kék klasztert a zöld hidrogénhez és a kapcsolódó technológiai alkalmazásokhoz köthető dokumentumok alakítják, míg a piros klasztert a lítiumion-akkumulátor és a hozzá köthető módszerek határozzák meg. Bibliometriai értelemben ez azt jelzi, hogy a vizsgált szakirodalomban két, részben kapcsolódó, de tematikusan elkülönülő diskurzus azonosítható, ahol az egyik terület inkább a hidrogénalapú energiatárolási és rendszerintegrációs kérdésekre, a másik pedig, a lítiumion-akkumulátoros energiatárolás életciklus- és költségértékelésére épül.

3. ábra: A dokumentumok bibliográfiai kapcsolódásán alapuló tematikus klaszterek

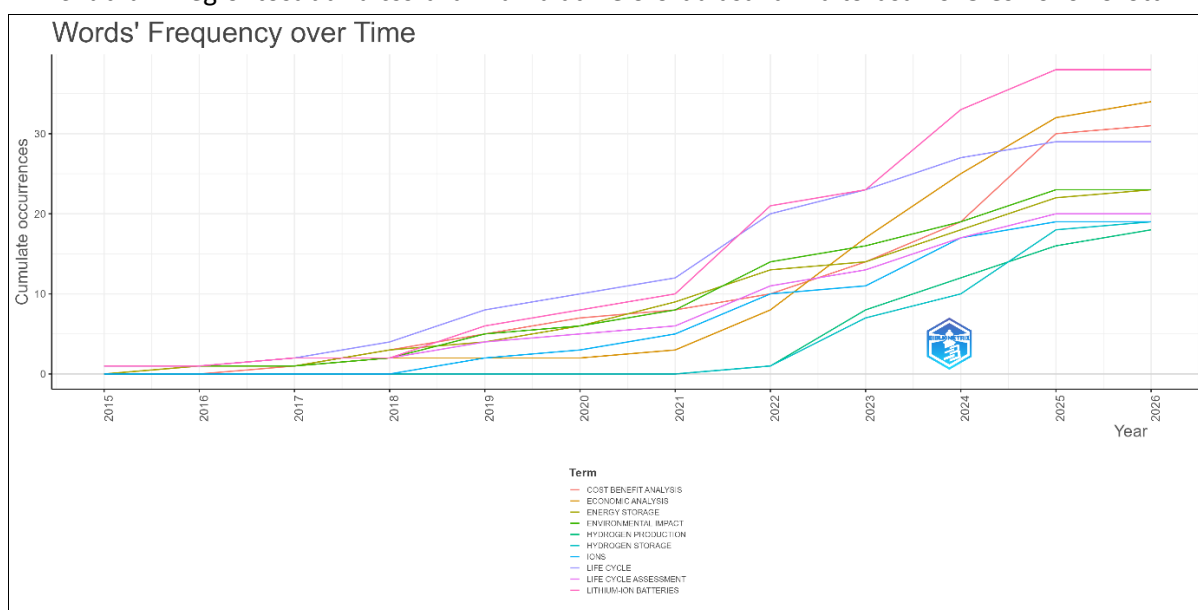


Forrás: Biblioshinyval készített ábra a végleges korpuszból.

A dokumentumok további bibliometriai vizsgálatai alapján megfigyelhető, hogy a dokumentumonkénti átlagos idézettség 29,13, míg a korpuszban azonosított kulcsszavak száma 336. A legtöbbet hivatkozott dokumentumok rangsora alapján megállapítható, hogy a tudományos hatás nem egyenletesen oszlik el a dokumentumok között, mivel az első hat tanulmány idézettségi száma jelentősen kiemelkedik a többitől. Ez arra utal, hogy a vizsgált kutatási terület néhány nagyobb hatású, módszertani vagy technológiai szempontból meghatározó alapkérdésre támaszkodik. Ezt a legmagasabb globális hivatkozási számmal rendelkező dokumentumok ábrája szemlélteti (4. ábra). A Fahimi szerepe különösen figyelemre méltó, mivel neve nem csupán a szerzőkből alkotott kapcsolati háló klaszterében emelkedik ki, hanem az idézettség tekintetében is fontos szerepet tölt be. Fahimi et al. (2022) tanulmánya a használt lítiumion-akkumulátorok újrahasznosítási technológiáinak fenntarthatóságát értékeli a beágyazott energia és a karbonlábnyom alapján, ami jól illeszkedik a korpusz Li-ion, LCA- és környezeti értékelési fókuszához.

szókapcsolatokból generált témakörmeghatározások előfordulásának időarányos változása. A bibliometriai elemzés során készített idővonal szemlélteti a LCA, a lítiumion-akkumulátor, a gazdasági elemzés, valamint a költség-haszon elemzés témaköreinek fokozatos és folyamatos erősödését. Ez a mintázat arra enged következtetni, hogy a gazdasági folyamatok és a környezetre gyakorolt hatások figyelembevétele egyre fontosabbá válik a jelenlegi kutatások spektrumában, valamint az is megállapítható, hogy a hidrogén szakirodalomban betöltött szerepe csekélyebb a lítiumion szerepéhez képest. Ugyanakkor módszertani szempontból fontos pontosítani, hogy ez a megállapítás közvetlenül a kulcsszavak időbeli előfordulásából következik, nem pedig a technológiák tényleges műszaki vagy gazdasági teljesítményének összehasonlításából.

6. ábra: A legfontosabb kulcsszavak kumulatív előfordulásának változása 2015 és 2026 között



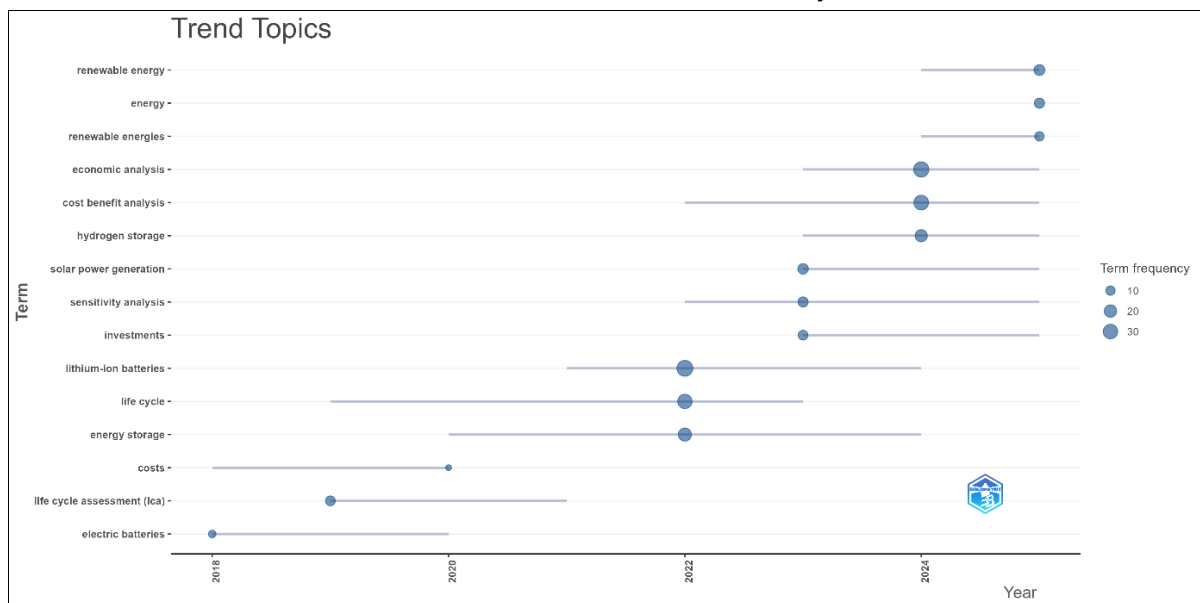
Forrás: Biblioshinyval készített ábra a végleges korpuszból.

Az absztraktok Biblioshinyval történő bibliometriai szövegbányászati tartalmi elemzése alapján időbeli tematikus eltolódás figyelhető meg, melyet a tematikus trendek evolúciójának ábrája mutat be (7. ábra). A tematikus evolúciót két, nem átfedő időperiódusban értelmezhető: 2015–2021, illetve 2022–2026 között. Ennek oka, hogy a 2015–2021 közötti időintervallumban a lítiumion alapú energiatárolás környezeti teljesítménye, életciklus-hatásai és költség szerkezete a domináns narratíva. Ezzel szemben 2022-től ugrásszerűen nő a publikációs aktivitás, valamint megjelennek a hidrogénhez kapcsolódó, kifejezetten gazdaságossági és döntéstámogatási hangsúlyok.

A bibliometriai elemzést az absztraktok kézzel történő átvizsgálása is alátámasztotta. A korábbi időszakban az absztraktok domináns narratívája a lítiumion alapú energiatárolás környezeti teljesítményének (LCA) és életciklusköltség jellegű megközelítéseinek (LCC) módszertani megalapozása, valamint a technológia komponensszintű azonosítása (gyártás, életciklus vége, újrahasznosítás) volt. Ezt a fókuszot jól reprezentálják a lítiumion-ellátási lánc és környezeti indikátorok, illetve az újrahasznosítás technoökonómiai megközelítései is, amelyek

a technológia „utóéleti” és körforgásossági kérdéseit már korán a fenntarthatósági értékelés részévé teszik. Ezzel szemben a 2022–2026 közötti időszak absztraktjaiban a hangsúly látványosan elmozdul a rendszerszintű integráció és a gazdasági döntéstámogatás irányába. A zöld hidrogén, mint energiatárolási és ellátási opció egyre gyakrabban jelenik meg, emellett a TEA-jellegű metrikák (pl. „levelized” költségek, költség-kockázat „trade-offok”) kiemelt szerepet kapnak. A későbbi absztraktokban a megújuló integráció, a hidrogéntermelés, -tárolás, és -elosztási logika több esetben már térbeli szervezési kérdésekkel párosul, mint az ellátási láncok, logisztikai és infrastruktúratervezési szempontok. Ezek a tématerületi változások és fejlődések a technológiai értékelésből a területi-rendszerszintű megvalósíthatóság felé történő érését jelzik. Ennek megfelelően a vizsgált irodalom egyre inkább a két technológia komplementer szerepére utal, bár ez a megközelítés a korpuszban még nem tekinthető domináns irányvonalnak. A lítiumion a rövid és középtávú rugalmassági szolgáltatásokban, míg a zöld hidrogén a hosszabb időléptékű energiatárolásban és szektorcsatolásban figyelhető meg, miközben a döntési szempontok között a költség, a kockázat és a megújuló potenciál térbeli heterogenitása növekvő súlyt kap.

7. ábra: A tematikus trendek evolúciója



Forrás: Biblioshinyval készített ábra a végleges korpuszból.

6. A kijelölt kutatási kérdésekre adott válaszok

Az első kutatási kérdésre adott válaszként megállapítható, hogy a zöld hidrogénhez és lítiumion-akkumulátoros energiatároláshoz kapcsolódó fenntarthatósági és gazdasági vizsgálatok döntően 2020 után koncentrálnak. Ez a bibliometriai eredmény arra utal, hogy a vizsgált kutatási terület viszonylag új, dinamikus bővülő szakirodalmi mezőnek tekinthető. Szintén a bibliometriai adatok alapján, a földrajzi megoszlás tekintetében Európa, Amerika és Kelet-Ázsia alkotja a három fő tudományos pólust. Európában a villamosenergia-rendszer dekarbonizációja és a hálózati integráció, Észak-Amerikában a technoökonómiai versenyképesség és a piaci tervezés, míg Ázsiában a gyors keresletnövekedés és a

rendszertervezési kihívások dominálnak (Pellow et al., 2015; Sharma et al., 2023). Ugyanakkor hangsúlyozandó, hogy ezek a megállapítások nem kifejezetten a régiók kutatási fókuszát, hanem az együttműködési hálózatokat tükrözik. Az absztraktok narratív értékelése eredményeként tematikusan három fő irány rajzolódik ki, a lítiumion-akkumulátorok hálózati LCA- és költségelemzése, a zöld hidrogén termelési-tárolási láncainak LCA-/TEA- alapú vizsgálata, valamint a portfólió- és rendszerszintű energiatárolási elemzések, amelyek több technológiát és gazdaságossági koncepciót hasonlítanak össze különböző költség- és emissziós mutatók mentén.

A szerzők közötti együttműködési hálók bibliometriai elemzése rávilágított, hogy a területet közepesen kollektív tudományos termelés jellemzi, az átlagos szerzőszám cikkenként 4,6, emellett jól elkülönülő, de egymással kapcsolatban álló kutatócsoportok azonosíthatók. Az egyik klaszter elsősorban LCA-, körforgásos gazdasági és anyagáramlás szemléletű vizsgálatokat folytat, főként európai intézményi bázissal (Thompson et al., 2021; Xia & Li, 2022), míg a másik a rendszer szintű modellezésre, TEA-ra, költségoptimalizációra specializálódik, vegyes európai, amerikai és ázsiai részvétellel (Zakeri & Syri, 2015; Urs et al., 2023).

A harmadik kutatási kérdésre a kulcsszavak együttes bibliometriai értelmezése alapján három, publikációs szinten is elkülöníthető irány rajzolódik ki, melyek a következők: 1) lítiumion-hálózati energiatárolás, 2) a zöld hidrogén termelési-tárolási láncainak LCA/TEA-vizsgálata és 3) portfólió és rendszer szintű energiatárolási vizsgálatok. Az első irányvonalhoz kapcsolódó absztraktok kézi áttekintését követően megfigyelhető, hogy visszatérően az életciklushatások és a költségstruktúra érzékenységet emelik ki (élettartam, csere, energiamix), és gyakori a technológiák összehasonlítása is (Yudhistira et al., 2022; Zakeri & Syri, 2015). A kézi áttekintést követően, a második terület vizsgálata alapján az absztraktok tipikusan a villamosenergia-forrás, az elektrolízis paraméterei és az infrastruktúra-igény szerepét hangsúlyozzák (Urs et al., 2023; Maniscalco et al., 2024). Míg a megjelölt harmadik irányvonal absztraktjai több technológiát együtt kezelnek, és optimalizációs vagy scenáriómodellezési keretben hasonlítanak össze emissziós és költségmutatókat, gyakran döntéstámogató célú „trade-off”-elemzésekkel (Pellow et al., 2015; Zakeri & Syri, 2015). A bibliometriai dokumentumelemzés kulcsszóhálózában mindez két, részben átfedő klaszterként is megjelenik, ahol az egyik hidrogén- és rendszerintegrációs, valamint gazdasági kifejezésekkel telített, míg a másik lítiumion- és LCA-centrikus.

A negyedik kutatási kérdés megválaszolása elsősorban az absztraktok korpusz szintű, kézi narratív áttekintésére épült. Ez alapján a vizsgált szakirodalomban a zöld hidrogén és a lítiumion-akkumulátoros energiatárolás nem egymást kizáró alternatívaként, hanem eltérő időléptékben és eltérő rendszerszintű funkcióban alkalmazható technológiaként jelenik meg. A lítiumion-rendszereket az absztraktok általában a magas hatásfokú, gyors, dinamikus válaszú rövid-középtávú rugalmassági szolgáltatásokhoz kötik, míg a zöld hidrogént a jobban skálázható, hosszú távú, nagy kapacitású (akár szezonális) energiatárolás irányába pozicionálják (Pellow et al., 2015; Urs et al., 2023; Uliasz-Misiak et al., 2025). Az absztraktok alapján ugyanakkor az a fontos módszertani megállapítás is levonható, hogy bár mindkét

technológia esetében gyakori az LCA vagy a TEA alkalmazása, az explicit integrált LCA+TEA-keretezés ritkább, ami arra utal, hogy a környezeti és gazdasági dimenziók együttes, közös indikátorokra vagy többkritériumos döntéstámogatásra építő kezelése további kutatási potenciált hordoz (Zakeri & Syri, 2015; Saavedra-Rubio et al., 2022).

Összességében a bemutatott bibliometriai elemzések és az absztrakt szintű kézi áttekintés alapján, a módszertani korlátok figyelembevételével szerzői szintézisként megállapítható, hogy a jövő dekarbonizált energiarendszereiben a vegyes, portfólió szintű energiatárolási megoldások kerülhetnek előtérbe. A lítiumion rövid és középtávon, míg a zöld hidrogén hosszabb időléptéken járulhat hozzá a rugalmassághoz. Ennek oka, hogy a két technológia nem egymást kizáró alternatívaként, hanem eltérő időléptékben és eltérő rendszerszintű funkcióban értelmezhető technológiaként jelennek meg. Területfejlesztési és innovációs szempontból ezért az válik meghatározóvá, hogy az adott térség megújulóenergia-potenciálja, hálózati korlátai, infrastruktúra-ellátottsága, költségkörnyezete és innovációs kapacitása mellett milyen technológiai mix alakítható ki (Sharma et al., 2023; Uliasz-Misiak et al., 2025). Ez összhangban áll azokkal a fenntarthatósági átmenetekkel foglalkozó megközelítésekkel, amelyek szerint az energetikai innovációk térben nem semlegesek, hanem erősen függenek a helyi gazdasági, intézményi és infrastrukturális adottságoktól (Coenen et al., 2012; Hansen & Coenen, 2015).

7. Összegzés

A kulcsszó- és dokumentumklaszterek alapján a 85 publikációból álló korpusz két fő tematika köré rendeződik, egyfelől a lítiumion-akkumulátoros energiatárolás LCA- és költségelemzési iránya, másfelől a zöld hidrogén rendszerintegrációs és technoökonómiai vizsgálata köré. A bibliometriai eredmények ezt elsősorban a kulcsszavak, klaszterek és időbeli mintázatok alapján támasztják alá, ugyanakkor önmagukban nem alkalmasak a technológiák tényleges műszaki vagy gazdasági komplementaritásának bizonyítására.

Az absztraktok tematikus áttekintése három fő kutatási irányt jelöl meg. Elsőként a lítiumion-akkumulátorok környezeti és gazdasági értékelése irányát, másodjára a zöld hidrogén energiatárolási láncok TEA/LCA-alapú vizsgálatát, végül harmadikként a portfólió és rendszer szintű energiatárolást. A lítiumion-akkumulátoros hálózati energiatárolás esetében a szakirodalom kiemelten vizsgálja az életciklus-elemzés, az ökológiai lábnyom, a költségszerkezet és az életciklus-költségek kérdését (Yudhistira et al., 2022). A zöld hidrogén energiatárolási célú alkalmazását több tanulmány különböző rendszerszinteken értékeli, a mikrohálózati megoldásoktól a nagyobb léptékű, rendszer szintű „power-to-hydrogen”-megoldásokig (Urs et al., 2023). A portfólió és rendszer szintű energiatárolási vizsgálatok olyan tanulmányokat foglalnak magukban, amelyek több technológiát hasonlítanak össze hálózati szimulációk, optimalizációs modellek vagy forgatókönyv-elemzések segítségével (Zakeri & Syri, 2015; Pellow et al., 2015). Ezek jellemzően rendszer szintű mutatókat használnak, és gyakran kitérnek a szabályozási, piaci tervezési aspektusokra is. Az absztraktok narratív elemzése tekintetében összességében megállapítható, hogy a lítiumion-technológia dominánsabb szerepet tölt be a vizsgált korpuszban, ugyanakkor a zöld hidrogénhez kapcsolódó, különösen

a 2020 után megjelent tanulmányok száma dinamikus növekedést mutat. Az eredmények alapján a jövőbeni kutatások során a komplexebb, integrált (zöld hidrogén és lítiumion-energiatárolás), bizonytalanságkezelést is tartalmazó, LCA+TEA-keretek vizsgálata lenne szükség szerű, kiegészülve a szabályozási és piaci környezetek hatásával. Ugyanakkor módszertani korlátként kiemelendő, hogy a bibliometriai elemzés elsősorban kulcsszavas, idézettségi és klaszterszerkezeti mintázatok feltárására alkalmas. Ezért a zöld hidrogén és a lítiumion-technológiák műszaki-gazdasági komplementaritására vonatkozó megállapítások nem kizárólag a klaszterelemzésből, hanem az absztraktok narratív áttekintéséből és a szerzői szintézisből következnek. További korlátként kezelendő, hogy a WoS, a megadott keresési és szűrési feltételek mellett, csak korlátozott számú találattal rendelkezett, ezért a végső korpuszban a Scopusból származó dokumentumok nagyobb súllyal szerepelnek. Ez a bibliometriai mintázatok értelmezésénél figyelembe veendő. Az eredmények így a Scopus és WoS alapján kialakított 85 dokumentumos korpuszra érvényesek, valamint a keresési és beválasztási feltételek keretei között értelmezhetők.

Irodalomjegyzék

- Aria, M. & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11 (4): 959–975. DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007
- Coenen, L., Benneworth, P., & Truffer, B. (2012). 'Toward a spatial perspective on sustainability transitions'. *Research Policy*, 41 (6): 968–979. DOI: 10.1016/j.respol.2012.02.014
- Egyesült Nemzetek Szervezete (2015). *Világunk átalakítása: Fenntartható fejlődési keretrendszer 2030*. Magyarország Kormánya.
<https://ensz.kormany.hu/download/7/06/22000/Világunk%20átalakítása%20Fenntartható%20Fejlődési%20Keretrendszer%202030.pdf/> (2023. 11. 30.)
- Fahimi, A., Ducoli, S., Federici, S., Ye, G., Mousa, E., Frontera, P., & Bontempi, E. (2022). Evaluation of the sustainability of technologies to recycle spent lithium-ion batteries, based on embodied energy and carbon footprint. *Journal of Cleaner Production*, 338: 130493.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130493
- Hansen, T. & Coenen, L. (2015) 'The geography of sustainability transitions: Review, synthesis and reflections on an emergent research field'. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 17: 92–109.
DOI: 10.1016/j.eist.2014.11.001
- Li, Z., Pu, H., & Li, T. (2024). Knowledge mapping and evolutionary analysis of energy storage resource management under renewable energy uncertainty: a bibliometric analysis. *Frontiers in Energy Research*, 12: 1394318. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1394318
- Maniscalco, M. P., Longo, S., Cellura, M., Micciché, G., & Ferraro, M. (2024). Critical Review of Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Pathways. *Environments*, 11 (6): 108.
DOI: 10.3390/environments11060108
- Mongeon, P. & Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106 (1): 213–228. DOI: 10.1007/s11192-015-1765-5
- Osman, A. I., Nasr, M., Mohamed, A. R., Abdelhaleem, A., Ayati, A., Farghali, M., Al-Muhtaseb, A. H., Al-Fatesh, A. S., & Rooney, D. W. (2024). Life cycle assessment of hydrogen production, storage, and utilization toward sustainability. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 13 (3): e526.
DOI: 10.1002/wene.526
- Pellow, M. A., Emmott, C. J. M., Barnhart, C. J., & Benson, S. M. (2015). Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis. *Energy & Environmental Science*, 8 (7): 1938–1952. DOI: 10.1039/C4EE04041D

- Pollock, A. & Berge, E. (2018). How to do a systematic review. *International Journal of Stroke*, 13 (2): 138–156. DOI: 10.1177/1747493017743796
- Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., & Koffel, J. B. (2021). PRISMA-S: an extension to the PRISMA Statement for Reporting Literature Searches in Systematic Reviews. *Systematic Reviews*, 10 (1): 39. DOI: 10.1186/s13643-020-01542-z
- Saavedra-Rubio, K., Thonemann, N., Crenna, E., Lemoine, B., Caliendo, P., & Laurent, A. (2022). Stepwise guidance for data collection in the life cycle inventory (LCI) phase: Building technology-related LCI blocks. *Journal of Cleaner Production*, 366: 132903. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132903
- Sharma, G. D., Verma, M., Taheri, B., Chopra, R., & Singh Parihar, J. (2023). Socio-economic aspects of hydrogen energy: An integrative review. *Technological Forecasting and Social Change*, 192: 122574. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122574
- Siddaway, A., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to do a systematic review: A best practice guide for conducting and reporting narrative reviews, meta-analyses, and meta-syntheses. *Annual Review of Psychology*, 70 (1): 747–770. DOI: 10.1146/annurev-psych-010418-102803
- Thompson, D., Hyde, C., Hartley, J. M., Abbott, A., Anderson, P. A., & Harper, G. D. J. (2021). To shred or not to shred: A comparative techno-economic assessment of lithium ion battery hydrometallurgical recycling retaining value and improving circularity in LIB supply chains. *Resources Conservation and Recycling*, 175 (1): 105741. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105741
- Uliasz-Misiak, B., Misiak, J., & Tarkowski, R. (2025). Research Trends in Underground Hydrogen Storage: A Bibliometric Approach. *Energies*, 18 (7): 1845. DOI: 10.3390/en18071845
- Urs, R. U., Chandly, A., Al-Sumaiti, A., & Mayyas, A. (2023). Techno-economic analysis of green hydrogen as an energy-storage medium for commercial buildings. *Clean Energy*, 7 (1): 84–98. DOI: 10.1093/ce/zkac083
- Xia, X. & Li, P. (2022). A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. *Science of the Total Environment*, 814: 152870. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152870
- Yudhistira, R., Khatiwada, D., & Sanchez, F. (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 358: 131999. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131999
- Zakeri, B. & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 569–596. DOI: 10.1016/j.rser.2014.10.011

Függelék

1. melléklet: Query alapú adatbázis-lekérdezés

Adatbázis	Keresési mező	Keresőkifejezés
Scopus	TITLE-ABS-KEY	("energy storage" OR "renewable energy storage" OR "renewable integrat" OR "grid storage" OR "stationary energy storage") AND ("lithium-ion battery" OR "Li-ion battery" OR "battery life cycle" OR "battery LCA" OR "battery sustainability" OR "green hydrogen" OR "green hydrogen LCA" OR "green hydrogen energy storage" OR "power-to-hydrogen" OR "green hydrogen storage" OR "green hydrogen sustainability") AND ("life cycle assessment" OR "LCA" OR "techno-economic analysis" OR "TEA" OR "environmental impact assessment") AND ("sustainability" OR "environmental sustainability" OR "carbon footprint" OR "economic feasibility" OR "cost-benefit analysis")
Web of Science	TS	

2. melléklet: Témakör szűrési feltételek

Query alapú lekérdezés találatainak száma	Témakör szűrési feltételek	Témakör alapú szűrési feltételek találatainak száma
15071	Business, Management and Accounting; Economics, Econometrics and Finance	1015
83	Economics; Operations research management science	2

3. melléklet: Kulcsszó alapú kizárásikritérium-szűrés

Kizárási dimenzió	Alkalmazott kizárási kulcsszavak
Mobilitás és járműipar (3.A)	“electric vehicle”, “EV”, “BEV”, “PHEV”, “HEV”, “automotive”, “vehicle routing”, “traffic flow”, “public transport”, “fuel cell vehicle”, “hydrogen vehicle”
Marketing- és fogyasztói magatartás (3.B)	“consumer behavior”, “consumer behaviour”, “customer satisfaction”, “brand”, “branding”, “marketing”, “purchase intention”, “loyalty”
Általános logisztika energiátárolási fókusz nélkül (3.C)	“last-mile”, “last mile”, “freight logistics”, “distribution network”, “warehouse management”
Általános hulladék- és szennyvízkezelés (3.D)	“municipal solid waste”, “MSW”, “plastic waste”, “food waste”, “construction waste”, “wastewater treatment”, “landfill”, “incineration”
Ingatlanpiac, lakáspiac és városfejlesztés energiátárolási fókusz nélkül (3.E)	“housing market”, “real estate”, “urban sprawl”, “gentrification”

4. melléklet: Kulcsszó alapú bevonásikritérium-szűrés

Bevonási dimenzió	Alkalmazott bevonási kulcsszavak
Technológia és energiátárolás (4.A)	“energy storage”, “stationary energy storage”, “grid storage”, “battery energy storage”, “battery storage”, “lithium-ion”, “lithium ion”, “li-ion”, “li ion”, “hydrogen storage”, “hydrogen energy storage”, “green hydrogen”, “power-to-gas”, “power to gas”, “power-to-hydrogen”, “power to hydrogen”, “underground hydrogen storage”, “smart grid”, “microgrid”, “renewable integration”, “grid flexibility”, “grid stability”
Értékelési módszerek (4.B)	“life cycle assessment”, “LCA”, “techno-economic analysis”, “techno economic analysis”, “TEA”, “environmental assessment”, “environmental impact assessment”, “sustainability assessment”
Gazdasági, pénzügyi és költségdimenzió (4.C)	“LCOE”, “levelized cost of energy”, “LCOH”, “levelized cost of hydrogen”, “LCOS”, “levelized cost of storage”, “levelized cost”, “economic analysis”, “economic evaluation”, “economic feasibility”, “cost-benefit”, “cost benefit”, “cost-effectiveness”, “cost effectiveness”, “investment analysis”, “investment appraisal”, “NPV”, “IRR”, “payback”, “pay-back”, “energy economics”, “green finance”, “financial risk”, “investment risk”

5. melléklet: Absztrakt alapú pozitív irányú kulcsszavas szűrés

Szűrési dimenzió	Kulcsszócsoport	Alkalmazott kulcsszavak
Technológiai és energiatárolási dimenzió (5.A)	Vizsgált technológiák	“lithium-ion”, “lithium ion”, “li-ion”, “li ion”, “battery”, “battery energy storage”, “hydrogen”, “H2”, “green hydrogen”
	Energiatárolás és hálózati alkalmazás	“energy storage”, “electricity storage”, “grid storage”, “power system”, “electricity system”, “smart grid”, “microgrid”, “renewable integration”, “integration of renewables”, “grid flexibility”, “grid stability”
Fenntarthatósági vagy gazdasági jelenlét (5.B)	LCA-, TEA- és fenntarthatósági értékelések	“life cycle assessment”, “life-cycle assessment”, “LCA”, “techno-economic analysis”, “techno economic analysis”, “TEA”, “environmental assessment”, “sustainability assessment”, “environmental impact assessment”
	Költség-, beruházási és pénzügyi mutatók	“levelized cost of energy”, “levelised cost of energy”, “LCOE”, “levelized cost of hydrogen”, “levelised cost of hydrogen”, “LCOH”, “levelized cost of storage”, “levelised cost of storage”, “LCOS”, “levelized cost”, “levelised cost”, “economic analysis”, “economic evaluation”, “economic feasibility”, “cost-benefit”, “cost benefit”, “cost-effectiveness”, “cost effectiveness”, “investment analysis”, “investment appraisal”, “capital cost”, “operating cost”, “NPV”, “net present value”, “IRR”, “internal rate of return”, “payback”, “pay-back”, “profitability”, “energy economics”, “financial risk”, “investment risk”