

REÁLOPCIÓK ÉS MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A HIDROGÉNALAPÚ BERUHÁZÁSOK DÖNTÉSTÁMOGATÁSÁBAN

REAL OPTIONS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DECISION SUPPORT FOR HYDROGEN-BASED INVESTMENTS

A globális dekarbonizációs célok és az energiatervezés gyors üteme átalakítja a technológiai és gazdasági döntéshozatalt. A hidrogén ígéretes fenntartható energiaforrás, azonban terjedését gátolják a magas beruházási és működési költségek, az infrastruktúra korlátai, valamint a szabályozási bizonytalanságok. A tanulmány célja a hidrogénberuházások tervezéséhez kapcsolódó kutatási trendek és módszerek feltérképezése. Bibliometriai elemzést végeztek a szerzők a kulcsszavak előfordulása, a regionális eloszlás és a szerzői hálózatok alapján. Kiemelik a reálopciók elméletét, valamint a mesterséges intelligencia és gépi tanulás szerepét a komplex energiarendszerek optimalizálásában. Eredményeik szerint a döntéshozatali kutatások elsősorban az energiarendszerek optimalizálására és a bizonytalanság kezelésére irányulnak, kevésbé a hidrogénre. A tanulmány kutatási hiányokat azonosít, és javaslatot tesz a hidrogén gazdasági értékelési modellekbe való beágyazására.

Kulcsszavak: hidrogén, energiarendszerek, reálopciók, bizonytalanság, mesterséges intelligencia, bibliometria

Global decarbonization goals and the rapid pace of the energy transition are changing technological and economic decision-making. Hydrogen is a promising pillar of sustainable energy. Its widespread deployment is hindered by high capital and operational costs, infrastructure constraints, and regulatory uncertainties. These factors complicate investment timing and feasibility decisions. This study seeks to identify research trends and methods for hydrogen investment planning. The authors use bibliometric analysis of keyword co-occurrence, regional distribution, and author networks. Real options theory for incorporating uncertainty and flexibility into investment decisions and the emerging role of AI and ML in optimizing complex energy systems are highlighted. The findings show that most decision-theoretic research focuses on energy system optimization, uncertainty management, and renewables integration, rather than hydrogen. The paper identifies research gaps and suggests ways to explicitly embed hydrogen into economic evaluation frameworks and decision-support systems that use financial models and AI-driven tools.

Keywords: hydrogen, energy systems, real options, uncertainty, artificial intelligence, bibliometric analysis

Finanszírozás/Funding:

A szerzők a tanulmány elkészítésével összefüggésben nem részesültek pályázati vagy intézményi támogatásban. The authors did not receive any grant or institutional support in relation with the preparation of the study.

Szerzők/Authors:

Dr. Csapi Vivien^a (csapiv@ktk.pte.hu) egyetemi docens (<https://orcid.org/0000-0003-1996-091X>); Sárics Sarolta^a (sarics.sarolta@ktk.pte.hu) tudományos segédmunkatárs (<https://orcid.org/0009-0001-4917-1965>)

^aPécsi Tudományegyetem (University of Pécs) Magyarország (Hungary)

A cikk beérkezett: 2025. 07. 09-én, javítva: 2025. 11. 16-án és 2025. 12. 12-én, elfogadva: 2025. 12. 15-én.
The article was received: 09. 07. 2025, revised: 16. 11. 2025, and 12. 12. 2025, accepted: 15. 12. 2025.

Copyright (c) 2026 Corvinus University of Budapest, publisher of *Vezetéstudomány / Budapest Management Review*. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

A hidrogén kiemelt szerepet kapott a fenntartható energetikai átmenetben, különösen az ipar és a közlekedés szén-dioxid-mentesítése terén. Az Európai Unió hidrogénstratégiája példátlan célokat fogalmaz meg: 2030-ra 40 GW hazai és további 40 GW importált zöldhidrogén-kapacitást kíván elérni, miközben 2020-ban még csak 100 MW volt a telepített kapacitás (Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, 2019). A hidrogénteknológia azonban nem „önjáró” – elterjedését jelentős technológiai, gazdasági és társadalmi bizonytalanságok kísérik. Az előállítási útvonalak (pl. elektrolízis, CCS-sel kombinált reformálás, biomassza-pirolízis) eltérő költség- és szénlábnyom-profilut mutatnak, a végfelhasználási szektorok árérzékenysége eltérő, az infrastruktúra kiépítettsége hiányos, a társadalmi elfogadottság pedig bizonytalan (IEA, 2023; IRENA, 2022).

Különösen hangsúlyos dilemma, hogy hogyan biztosítható a hidrogén alacsony szén-dioxid-kibocsátású előállítása a megfizethetőség és a rugalmasság megőrzése mellett. A döntéshozók – legyenek azok vállalatvezetők, szabályozók vagy beruházók – olyan rendszerkörnyezetben mozognak, ahol a technológiai fejlődés üteme, a megújuló energia rendelkezésre állása, az ETS ármozgása, vagy épp a társadalmi elfogadottság szinte napról napra változhat. E környezet nem csupán bizonytalan, hanem gyakran visszafordíthatatlan beruházási döntéseket követel – így felértékelődik a rugalmasság lehetősége: halasztani, bővíteni, alkalmazkodni. Ebben a kontextusban tehát a kulcskérdés nem csupán az, hogy mit döntünk, hanem az, hogy hogyan és mikor hozzuk meg a döntést.

Ezekre a kérdésekre a döntéselmélet ad keretet: egy tudományos megközelítés, amely a különböző döntési alternatívák következményeit elemzi és segít optimalizálni a döntéshozatalt bizonytalan környezetben (Paprika, 2002). A beruházási rugalmasság formalizált kezelését Amram és Kulatilaka (1999), valamint Copeland és Antikarov (2001) alapozták meg, rámutatva, hogy a stratégiai beruházások értéke nemcsak a várható pénzáramlásoktól, hanem a jövőbeni döntési lehetőségek értékétől is függ. A reálopciós megközelítés a stratégiai és pénzügyi döntéshozatal összekapcsolását szolgálja, kiemelve a technológiai beruházások rugalmasságának vezetői és szervezeti dimenzióit. A dinamikus képességek révén a menedzsment bizonytalan környezetben is felismerheti és kiaknázhatja ezeket a lehetőségeket, így a beruházási rugalmasság nemcsak pénzügyi értéket, hanem versenyelőnyt is jelent (Tece et al., 1997). A reálopciók különösen relevánsak technológiai bizonytalanság, hosszú távú beruházási horizont és magas tőkelekötés esetén, amikor a döntéshozók nem egyetlen optimális megoldást keresnek, hanem döntési lehetőségeket tartanak fenn – például halasztás, bővítés, leállítás vagy technológiaváltás formájában (Rózsa, 2008; Rózsa, 2010). A beruházás így nem statikus projekt, hanem döntési opciók láncolata, amely mind pénzügyi értéket hordoz. A reálopciós szemlélet különösen fontos a gyorsan változó ágazatokban, például az energiaszektorban, és újabb irányai a mesterséges intelligencia prediktív modelljeit integrálják, lehetővé téve a komplex rendszerek valós idejű értékelését (Brandão et al., 2022).

A klasszikus diszkontált cashflow-alapú értékelési módszerek elterjedtek, de nem képesek megragadni a jövőbeli rugalmasság értékét, különösen olyan technológiai átmenetek idején, mint a hidrogéngazdaság kialakulása. A megújuló energia bizonytalan területein – például az energiatárolás vagy a hidrogéninfrastruktúra fejlesztése esetén – a rugalmasság jelentős értéktöbbletet hordoz (Weng & Li, 2024; Schachter & Mancarella, 2016). A mesterséges intelligencia (MI) alapú döntéstámogatás új lehetőséget kínál e bizonytalanságok kezelésére, mivel nem csupán optimalizációs eszközként működik, hanem az opciós döntési logika operatív kiterjesztéseként is. Az MI és a gépi tanulás (ML) képesek a reálopciós értékeléshez szükséges paraméterek – például volatilitás, keresleti trendek, technológiai hatékonyság – dinamikus becslésére, így a statikus modellek valós idejű döntéstámogató rendszerekké alakulnak. Ilyen integrált megközelítést alkalmaztak például a hidrogéntermelés optimalizálására, ahol az MI a piaci árak előrejelzését, a reálopciós modell pedig a beruházási időzítést támogatta (Bhuiyan et al., 2025; Brandão et al., 2005; Van Assche & Compennolle, 2022). Ennek megfelelően a reálopciók és az intelligens rendszerek kombinációja egyre jelentősebb szerepet kap a beruházási rugalmasság formális kezelésében.

Jelen tanulmány célja, hogy feltérképezze a döntési rugalmasságot előtérbe helyező reálopciós szemlélet és a fejlett mesterségesintelligencia-alapú optimalizáció összefonódását a hidrogénalapú fenntartható energetikai beruházások szakirodalmában. Bibliometriai elemzésünk – a 2000 és 2025 közötti nemzetközi publikációkra összpontosítva – rávilágít a legfontosabb kutatási trendekre és összefüggésekre. Egyfelől megvizsgáljuk, hogyan jelenik meg párhuzamosan a beruházási döntések rugalmasságának igénye (reálopciók, döntéselmélet) és az innovatív algoritmusokra épülő intelligens döntéstámogatás az energiarendszerek tervezésében. Másfelől azonosítjuk azokat a meghatározó tanulmányokat és kutatási irányokat, amelyek a hidrogénteknológiák gazdasági megvalósíthatóságának jobb megértéséhez járulnak hozzá.

A hidrogénalapú beruházások döntéstámogatása egyre inkább többdimenziós problémává válik, ahol a technológiai, gazdasági és szabályozási bizonytalanságokat integrált módon szükséges kezelni. A reálopciós elmélet és a mesterséges intelligencia kombinációja olyan adaptív döntési keretrendszert kínál, amely a beruházási rugalmasság és az előrejelzési képesség együttes kihasználásával támogatja a stratégiai és pénzügyi döntéseket. Az MI- és a gépi tanulás alapú modellek, mint a neurális hálózatokra vagy sztochasztikus dinamikára épülő előrejelzések, képesek a piaci és technológiai bizonytalanságokat kvantifikálni, ezáltal a reálopciós értékelés inputjait pontosítani (Bhuiyan et al., 2025). A legújabb tanulmányok szerint (Bhuiyan et al., 2025; Weng & Li, 2024; Carozzani & D’Alpaos, 2025) a reálopciós megközelítések és az MI-modellek integrációja különösen hatékony a hidrogén-infrastruktúrák tervezésében, mivel ezek a rendszerek a beruházások időzítését, bővítését és adaptálását dinamikusan tudják kezelni a valós idejű adatok alapján.

A hidrogénnel és az energetikai beruházásokkal kapcsolatos tudományos diskurzust több, kifejezetten bibliometriai vizsgálat (Camargo et al., 2022; Kar, 2022) is feltérképezte, többek között a hidrogéngazdaság egészére fókuszáló áttekintések feltárták a kulcsfolyóiratokat és tematikus tudásmezőket, míg a zöldhidrogén-termelés (elektrolízis) almezőjében külön elemzések vizsgálták a kulcsszavak és szerzői hálók dinamikáját, valamint szűkebb fókuszú bibliometriai vizsgálatok jelentek meg a hidrogénbiztonság és az ellátási lánc területén. A fenntartható energia szélesebb irodalmára végzett bibliometriai kutatások megmutatták a reálopciók beruházási döntéstámogatás keretrendszerét hibrid megújulóenergia-rendszerekben, valamint a reálopciók értékelés létjogosultságát az energetikai rendszerekkel kapcsolatos döntések támogatásában (Carozzani & D'Alpaos, 2023; Nadarajah, 2023; Kozlova, 2017). A felsorolt tanulmányok jellemzően nem a beruházási döntéstámogatás, az AI és a reálopciók megközelítés integrált nézőpontjából elemezték a zöld hidrogén területét.

Tanulmányunk újdonsága abban áll, hogy elsőként nyújt integrált áttekintést a hidrogénenergiához kapcsolódó beruházási döntések és az intelligens rendszerek metszetéről. Ezzel egyrészt tudományos alapot szolgáltat a fenntartható energiarendszerek tervezéséhez, másrészt útitervet kínál a jövőbeni kutatások számára, amelyek a döntéseméleti rugalmasságot ötvözik a mesterséges intelligencia nyújtotta lehetőségekkel a hidrogéngazdaság fejlesztése érdekében.

A tanulmány elsőként a hidrogén szerepét és a beruházási döntések rugalmasságát bemutató elméleti keretet ismerteti, majd a bibliometriai vizsgálat módszertani lépéseit részletezi. Ezt követően a kulcsszavak, országok és szerzők hálózatalapú elemzése révén feltárja a tudományos diskurzus szerkezetét, klasztereit és fejlődési irányait. Végezetül a kutatási eredmények alapján következtetéseket von le, valamint javaslatot tesz a jövőbeni kutatási fókuszpontokra, különös tekintettel az intelligens rendszerek, reálopciók és sztochasztikus modellek további szerepére a fenntartható hidrogéngazdaság kialakításában.

Irodalomkutatás

A dekarbonizációs törekvések felgyorsulásával világszerte egyre nagyobb figyelem irányul a hidrogénalapú energetikai megoldásokra. Ám a technológia széles körű elterjedését számos gazdasági és technológiai bizonytalanság nehezíti: a beruházási és üzemeltetési költségek továbbra is magasak, miközben az infrastruktúra hiányos, és a szabályozási környezet kockázatai is jelentősek (Wolf, 2023). Ezek a tényezők lassíthatják a hidrogéngazdaság kialakulását, és bizonytalanná teszik a megfelelő beruházási időzítés kérdését. Felmerül tehát, hogy milyen döntéstámogató módszerek segíthetik az optimális stratégia meghatározását ebben a bizonytalan környezetben?

Már a klasszikus közgazdaságtan felismerte, hogy a beruházási döntések jövőbeni eredményei nem teljesen ismertek, ezért a valószínűség és a kockázat fogalmak

kulcsfontosságúak a döntésemelésben. Knight (1921) és Keynes (1937) úttörőként hangsúlyozták a jövő alapvető bizonytalanságát a gazdasági döntéshozatalban, míg Markowitz (1952) portfólióelmélete forradalmi előrelépést hozott a kockázat kezelésében azáltal, hogy a hozam és a rizikó közötti kompromisszumot kvantitatív keretben ragadta meg. Ezek az alapelvek alapozták meg a modern beruházáselemzést, de a hagyományos módszerek – például a diszkontált cashflow (DCF) – korlátai hamar megmutatkoztak olyan hosszú távú, irreverzibilis energetikai beruházások esetén, ahol nemcsak a kockázat, hanem a döntési rugalmasság is kulcsszerepet játszik.

E kihívásokra válaszul jelent meg a reálopciók megközelítés, amely a pénzügyi opciók logikáját alkalmazza reáleszközökre. A „reálopció” fogalmát Myers (1977) vezette be, aki szerint egy reálopció a jog, de nem kötelezettség bizonyos jövőbeli beruházási döntések meghozatalára kedvező feltételek mellett. A reálopciók elmélet lehetővé teszi a rugalmas döntéshozatal minőségi és akár mennyiségi elemzését: a beruházó halaszthat, bővíthet, szűkíthet vagy épp felhagyhat egy projektet a jövőbeli körülményektől függően, anélkül, hogy erre kötelezettséget vállalna. Dixit és Pindyck (1994), valamint Trigeorgis (1997) alapművei lefektették a reálopciók elemzés elvi és gyakorlati alapjait. Rámutattak arra, hogy a bizonytalan kimenetek és a jövőbeni döntések dinamikus összefüggései hagyományos, kockázattal kiigazított diszkontrátával nem ragadhatók meg; a rugalmasság modellezéséhez inkább sztochasztikus folyamatokra és opcióárazási technikákra van szükség (Lamberts-Van Assche & Compernelle, 2022). Trigeorgis (1997) hangsúlyozta, hogy a menedzsment döntési rugalmassága növeli a projektek értékét: minél nagyobb a bizonytalanság egy beruházás jövőbeli bevételeiben vagy költségeiben, annál értékesebb a lehetőség a projekt halasztására vagy adaptálására változó körülmények között. Ily módon a reálopciók gondolkodás a kockázatkezelés új formáját nyújtja, mivel a projektekbe beépített opciók révén csökkenthető a kedvezőtlen kimenetek valószínűsége és pénzügyi hatása.

Az elmúlt két évtizedben a reálopciók módszertan az energiaszektorban széles körben elterjedté vált, és a jövőbeli bevételek bizonytalanságának kezelésére, valamint a döntési rugalmasság figyelembevételére az egyik leggyakrabban alkalmazott eszköz lett – különösen a megújulóenergia-projektek értékelésében (Lamberts-Van Assche & Compernelle, 2022; Martinez-Cesena et al., 2013). A volatilis energiapiaci környezetben a reálopciók különös értékkel bírnak: a beruházók például „kivárási opcióval” élhetnek, azaz kedvezőtlen piaci viszonyok esetén halaszthatják a beruházást, míg kedvező fordulat esetén gyorsan cselekedhetnek. A szakirodalomban már a hidrogéninfrastruktúra és -termelés területén is megjelentek reálopciók elemzések. Biggins et al. (2022) kimutatták, hogy egy hidrogénelektrolízis projekt esetében a reálopciók megközelítés jelentős többletértéket ad a hagyományos nettó jelenértékhez képest, és csökkenti a beruházás negatív kimenetelének esélyét azáltal, hogy rugalmasan kezeli a piaci árak és technológiai költségek bizonytalanságát.

A hazai közgazdasági irodalomban is több munka foglalkozik a reálopciók alkalmazásával: Bélyácz (2011) átfogóan elemezte, miként járult hozzá a pénzügyi opcióárazás a kockázat és a bizonytalanság közötti viszony újragondolásához, míg Bóta (2006) doktori munkája az elsők között alkalmazta a reálopciók értékelését a vállalati beruházási döntések magyar nyelvű elemzésében. Csapi (2018) kiemelt figyelmet fordított az energiaszektorra alkalmazott reálopciók modellekre, rámutatott, hogy a megújulóenergia-beruházások értékelése során a rugalmasság pénzügyi értéke a bizonytalan árkörnyezetben akár 20–40%-kal is növelheti a projektek várható értékeremtését, mivel a hagyományos nettó jelenérték megközelítés nem képes kezelni a megújuló energiaforrások beruházásainak bizonytalanságait és a döntési rugalmasság értékét. Ezek a XXI. század elején született eredmények az akkori technológiai érettségi szinten lévő megújulóenergia-beruházások kapcsán relevánsak a most közel azonos érettségi szintet mutató hidrogéntekológiák szempontjából. Csapi (2018) rámutatott arra, hogy célszerű a reálopciók logika és a prediktív modellezés kombinálása is, mivel a gép tanulás képes javítani az inputváltozók (ár, határfok, kereslet) becslését, ami a reálopciók értékelés pontosságát növeli. Ez az integrációs megközelítés egybeesik a nemzetközi trendekkel (Bhuiyan et al., 2025; Van Assche & Compennolle, 2022), amelyek az MI-t a reálopciók döntéstámogatás operatív kiterjesztéseként értelmezik. Ezek a megfigyelések pedig arra engednek következtetni, hogy a zöldhidrogén-technológiák vizsgálata során a három terület együttes alkalmazása indokolt és célszerű.

Mára az energetikai döntéshozatal terén a mesterséges intelligencia és az intelligens rendszerek térnyerése figyelhető meg. Ahogy az energiarendszerek egyre összetettebbé válnak, a hagyományos optimalizációs modellek és az emberi szakértők előrejelzései korlátokba ütköznek (Mullanu et al., 2025). Különösen a hidrogénalapú, integrált energiarendszerek esetében hatalmas kihívás a kereslet és kínálat dinamikus egyensúlyban tartása, valamint a termelés és felhasználás optimális összehangolása. A gépi tanulásra épülő mesterséges intelligencia képes e komplex feladatok egy részét automatizálni, és a korábbiaknál jobb megoldásokat találni. Az AI segítségével nagy mennyiségű adat dolgozható fel, és pontosabb előrejelzések adhatók például az energiaigényre, a termelési kapacitásokra, vagy akár az eszközök meghibásodására vonatkozóan (Xiang et al., 2025). Az energetikai gyakorlatban már ma is elterjedtek az olyan intelligens optimalizációs eljárások, mint a genetikai algoritmusok, a részecske-algoritmus vagy a mély neurális hálózatokkal támogatott előrejelzés; ezek lehetővé teszik a többcélú (technológiai és gazdasági) optimalizálást például mikrorácsok üzemeltetésében, illetve a megújuló termelés és tárolás optimális ütemezésében (Khalili et al., 2019).

Bibliometriai elemzés

A bibliometriai elemzés elsődleges célja a vizsgált kutatási terület releváns és meghatározó szakirodalmának feltárása és rendszerszintű vizsgálata. Tekintettel arra, hogy

a kutatás fókuszában a hidrogénberuházásokhoz kapcsolódó döntéshozatali folyamatok állnak, a keresési feltételek kialakítása e tematikai súlypont figyelembevételével történt. Az elemzés során integráltuk a reálopciók elméleti keretrendszerét, a hidrogén különböző típusait és forrásait, valamint az ezekhez kapcsolódó döntési mechanizmusokat. A legjelentősebb publikációk azonosítása érdekében bibliometriai hálózatelemzést végeztünk, melynek módszertani kereteit és alkalmazott keresési feltételeit az 1. melléklet tartalmazza (online). A vizsgálat a 2000 és 2025 közötti időszak publikációira terjedt ki, figyelembe véve a téma aktuális tudományos és gyakorlati jelentőségét. A keresési kifejezések elsősorban a reálopciók, a hidrogén- és energetikai kérdéskörök, valamint a döntésmélet tématerületeire koncentráltak, míg a keresési kategóriák a közgazdaságtan, a pénzügy, az energetika és a fenntarthatóság diszciplináris területeit ölelték fel. A keresési kifejezések meghatározása során három alapelvet követünk, melyek a tematikus relevancia, a fogalmi teljesség, valamint a keresési logika transzparenciája és replikálhatósága (Donthu et al., 2021). A kulcsszókészlet az 1. mellékletben szereplő kombinációkon alapul, amelyek három fogalmi pillér mentén épültek fel. A döntési rugalmasságot és bizonytalanságkezelést leíró módszerek (pl. „real option*”, „decision tree analysis”, „Monte Carlo simulation”), a hidrogéntekológia vonatkozásai („hydrogen economy”, „green hydrogen”, „fuel cell*” stb.), valamint a döntéshozatali kontextus („decision making”, „investment”, „strategic flexibility”). Ez a hármas strukturálás biztosítja, hogy a lekérdezés szemantikai fedettsége megfelelő legyen (Harzing & Alakangas, 2016). A keresőkifejezések validitását több lépésben ellenőriztük. Egyrészt előzetes kulcsszógyakorisági vizsgálat alapján szűkítettük a halmazt, kizárva az irreleváns vagy túl általános fogalmakat. Másrészt a hólábdatechnika alapján manuálisan áttekintettük a leggyakrabban hivatkozott publikációk kulcsszavait, és összevetettük az előzetes keresési kifejezésekkel. A kulcsszavak előfordulási gyakoriságán alapuló klaszterezési eredmények (VOSviewer) megerősítették a kulcsszókészlet tematikus érvényességét, mivel a létrejött klaszterek (pl. „reálopciók és játékelmélet”, „hidrogénellátási lánc”, „mesterségesintelligencia-alapú döntéstámogatás”) jól tükrözik a kutatás tárgyát képező tartalmi csomópontokat (Zupic & Čater, 2015; Roucham et al., 2025). A publikációk lekérdezése a Scopus adatbázis felhasználásával történt, míg az adatok feldolgozásához és vizualizációjához a Microsoft Excelt és a VOSviewer szoftvereket alkalmaztuk. A teljes mintát feldolgoztuk, nem történt a dokumentumok tartalmi alapú kizárása.

Az 1. mellékletben bemutatott adatok alapján megállapítható, hogy a Scopus adatbázisban alkalmazott keresési feltételek eredményeként egy 3449 tételből álló publikációs adatállomány jött létre 2025.01.19-i lekérdezéssel, amely a kapcsolódó metaadatokkal együtt alkalmas a vizsgált kutatási terület releváns szakirodalmának feltérképezésére, valamint a tématerület főbb diszciplináris irányvonalainak azonosítására. Az adatállomány elemzése rámutat arra, hogy a vizsgált témakörben évente átlagosan mintegy 150 publikáció jelent meg. Emellett

megfigyelhető, hogy az ezekre a publikációkra érkező éves hivatkozások száma átlagosan elérte az 5141-et. A publikációs aktivitás a 2020-as évben érte el csúcspontját, míg az idézettségi mutató 2024-ben regisztrálta a legmagasabb értéket. E tendenciák egyértelműen alátámasztják a kutatási téma jelenkori relevanciáját és tudományos aktualitását. A vizsgált időszak publikációs és idézettségi adatait részletesen az 1. melléklet tartalmazza.

A kutatási terület mélyebb feltérképezése érdekében bibliometriai elemzést végeztünk a teljes adatállományon a VOSviewer szoftver alkalmazásával, amely lehetővé tette a legrelevánsabb kulcsszavak, szerzők és országok azonosítását.

A klaszterezés alapja a kapcsolaterősség, amely a közös publikációk vagy kulcsszavak előfordulási gyakoriságán alapul. A VOSviewer algoritmus színezett klaszterek képezésének segítségével azonosítja a tematikailag koherens tudásmezőket. A módszer előnye, hogy nemcsak a kutatási intenzitást, hanem a tudományos kapcsolatháló dinamikáját is megmutatja. A VOSviewer a tudományos publikációk közötti kapcsolatokat gráfstruktúrák formájában vizualizálja. Három fő kapcsolattípust különböztet meg a kulcsszótársítást (co-occurrence), amely az együtt előforduló fogalmak tematikus közelségét méri, az együtt-idézést (co-citation), amely a tudományos befolyás hálózatait jeleníti meg, és az együttműködést (co-authorship), amely a szerzők vagy intézmények közti együttműködési struktúrákat mutatja (Zupic & Čater, 2015). E szűrési feltételeknek köszönhetően a klaszterelemzés jól elkülöníthető tudásmezőket azonosít, ugyanakkor feltűnteti az egyes mezők közötti kapcsolatrendszerket is. Jelen vizsgálat során a kulcsszótársítás (co-occurrence) módszere került alkalmazásra a kulcsszavak vizsgálatánál, az összes kulcsszóra vonatkozóan, míg a szerzők és országok tekintetében az együttműködés (co-authorship) módszerével dolgoztunk.

A vizsgálatok nem csupán a felsorolt szempontok tükrében meghatározó ismerveket szemléltetik, hanem kiemelik a hozzájuk kapcsolódó időszakokat is a 2000-2025 közötti időintervallumon belül. Ezek a tulajdonságok fontos tényezői az értékelésnek, mivel megmutatják, hogy az egyes faktorokra kapott eredmények mely időszakokban voltak a legjellemzőbbek. A publikációkhoz rendelt kulcsszavak hálózati alapú vizsgálata révén strukturált képet kaphatunk a tématerület belső szerkezetéről, valamint feltárhatjuk a fogalmak közötti kapcsolatrendszeret. Ez a megközelítés nem csupán a kutatási főirányok és domináns diskurzusok azonosítását teszi lehetővé, hanem hozzájárulhat kevésbé vizsgált, emergens altémák felismeréséhez is. Elemzésünk első lépéseként a kulcsszavak klaszterezését végeztük el, amely kiindulópontként szolgált a kutatási terület tematikus térképezéséhez.

A kulcsszavak hálózati elemzését a VOSviewer szoftver segítségével hajtottuk végre, amelyhez a vizsgálat megkezdése előtt előre definiált szűrési feltételeket alkalmaztunk annak érdekében, hogy az elemzés a legnagyobb jelentőséggel bíró kifejezésekre koncentráljon. A vizsgálatba kizárólag olyan kulcsszavakat vontunk be, amelyek

legalább 50 alkalommal fordultak elő a kiválasztott publikációkban. E küszöbérték alkalmazása biztosította, hogy a hálózatelemzésben a kutatási terület szempontjából leggyakrabban használt, így vélhetően legnagyobb diszkurzív súllyal bíró fogalmak szerepeljenek.

1. táblázat

A VOSviewer számára megadott feltételek, valamint az eredmények bemutatása a kulcsszavak vonatkozásában

<i>Szűrési feltétel a kulcsszavakra vonatkozóan</i>	<i>Minimum 50 alkalommal szereplő szavak publikációnként.</i>
A feltételnek megfelelő legrelevánsabb kulcsszavak száma a VOSviewer alapján	145 db kulcsszó
A feltételnek megfelelő kulcsszavak számához kapcsolódó időszak	2017-2023
A kulcsszavakból kialakított klaszterek száma	5 db klaszter

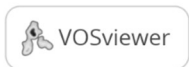
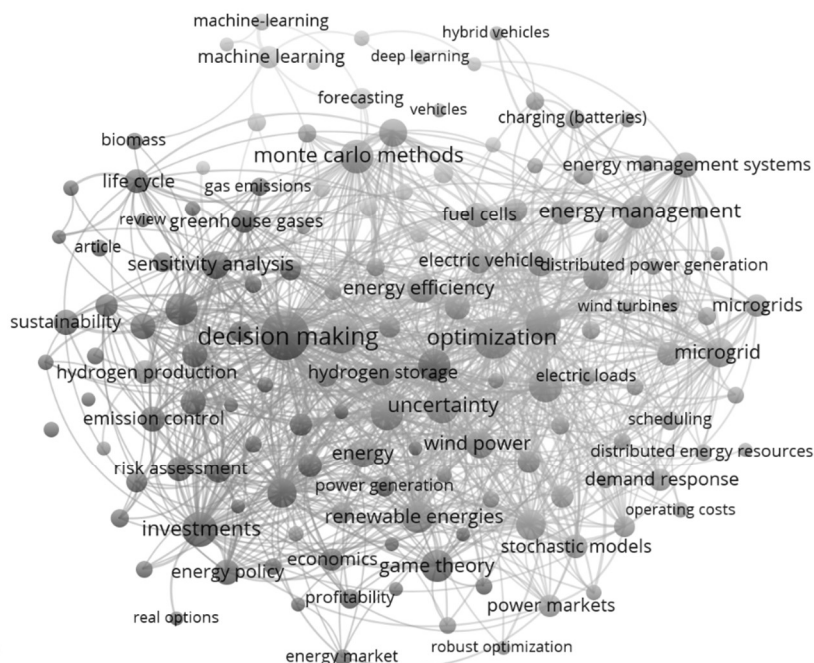
Forrás: saját szerkesztés a VOSviewer eredmények alapján

Az előírt kritérium alapján a szoftver összesen 145 kulcszót azonosított, amelyek a 2017 és 2023 közötti időszak nemzetközi tudományos publikációihoz kapcsolódnak. Ugyan a kiinduló időintervallum 2000 és 2025 közötti időszakot takar, mégis a jelölt módszertan segítségével az ezen időszakon belül megjelent publikáció legrelevánsabb elemei 2017 és 2023 közé datálódnak az 1. táblázatban megadott szűrési feltételek változatlansága mellett. A kapott kulcsszóhalmaz további elemzése során a program a kifejezéseket együttjárásuk (co-occurrence) és előfordulási gyakoriságuk alapján csoportosította, ennek eredményeként öt jól elkülönülő tematikus klasztert hozott létre. Ezek a klaszterek a vizsgált tudásterület belső tematikai struktúráját reprezentálják, és alapot szolgáltatnak a főbb kutatási irányok, valamint azok közötti tartalmi kapcsolatok feltérképezéséhez.

Amint azt az 1. táblázat is illusztrálja, a kulcsszavak klaszterezésének eredményeként létrejött öt tematikus klaszter világosan körvonalazza a vizsgált kutatási terület domináns irányvonalait. A klaszterek közötti kapcsolati hálót, valamint a kulcsszavak térbeli elrendeződését az 1. ábra szemlélteti vizualizált formában, amely lehetőséget kínál a fogalmak közötti tematikus összefüggések mélyebb megértésére. A klasztereken belül azonosított kulcsszavak részletes listáját, valamint ezek hálózati pozícióját a 2. melléklet tartalmazza (online).

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a klaszterezés nem csupán a releváns kutatási témakörök strukturált azonosítását teszi lehetővé, hanem egyúttal hozzájárul a tudományos diskurzus belső kapcsolatrendszerének és fejlődési irányainak feltérképezéséhez is. A kulcsszavak hálózati alapú strukturálása elősegíti a kutatási fókuszpontok közötti kapcsolódási pontok azonosítását, ezzel megalapozva a jövőbeli kutatási irányok célzott kijelölését, valamint támogatva a tématerület átfogóbb és rendszerszerű megértését.

A klaszterek közötti kapcsolati háló, valamint a kulcsszavak térbeli elrendeződése



Forrás: VOSviewer alapján saját szerkesztés

Kulcsszavak elemzése

Az első (vagy 1.) klaszter – Gazdasági racionalitás és a környezeti felelősségvállalás

A kulcsszavak klaszterezési eredményei alapján az első klaszter az egyik legdominánsabb tematikus csoportként azonosítható, amely elsősorban a hidrogéngazdasághoz kapcsolódó gazdasági és környezeti aspektusokat integrálja. A klaszter belső struktúrája és a kulcsszavak közötti kapcsolatrendszer arra utal, hogy e csoport a fenntarthatóság, a gazdasági döntéshozatal és az energiaipari beruházások metszéspontjában helyezkedik el.

A klaszter legfrekvenciáltabb kulcsszavai – mint például *decision making* (591 előfordulás), *investments* (312), *sustainable development* (269), *costs* (259), valamint *game theory* (250) – jól tükrözik azt a tudományos fókuszot, amely a beruházási döntések gazdasági racionalitását a fenntarthatósági szempontokkal ötvözi. Kiemelendő továbbá a *sensitivity analysis* (202), a *risk assessment* (164) és az *economic analysis* (167) szerepe, amelyek jelenléte arra utal, hogy a bizonytalanság kezelésére és a kockázatok számszerűsítésére irányuló módszertani megközelítések központi szerepet töltenek be a tématerületen.

A klaszterben megjelenő *carbon*, *alternative energy* és *emission control* kulcsszavak azt jelzik, hogy a gazdasági modellek alkalmazása szorosan összefonódik a környezeti hatások vizsgálatával, különös tekintettel a dekarbonizációs törekvésekre és az alternatív energiák hasznosítására. Ezen összefüggések rámutatnak arra, hogy a kutatások jelentős része a fenntartható fejlődés elveit igyekszik érvényesíteni a beruházási és döntéshozatali folyamatokban.

Az első klaszterben kiemelt szerepet kapnak a játékelméleti modellek és a reálopciók megközelítései, amelyek lehetőséget biztosítanak a bizonytalan környezetben történő optimális döntéshozatal támogatására. Ezek a módszerek hidat képeznek a klasszikus közgazdasági elemzések és a fenntarthatósági célkitűzések között, elősegítve a komplex, többtényezős problémák integrált kezelését. Az első klaszter tematikai súlypontja tehát a gazdasági racionalitás és a környezeti felelősségvállalás együttes érvényesítésére épül, különös tekintettel a hidrogénalapú beruházásokkal kapcsolatos döntéshozatali folyamatokra. A klaszter struktúrája jól szemlélteti azt a multidiszciplináris megközelítést, amelyben a gazdasági, környezeti és matematikai-modellezési szempontok szoros kölcsönhatásban jelennek meg.

A második (vagy 2.) klaszter – Energiaelosztás és tárolás elemzése

A kulcsszavak hálózati vizualizációja alapján a második klaszter egyértelműen az energiaelosztás, -tárolás és -felhasználás kérdésköreit helyezi a fókuszba, különös tekintettel a hidrogénalapú technológiák integrációjára. A klaszter központi kulcsszavai – mint az *optimization* (437 előfordulás), *renewable energy sources* (311), *energy management* (279), *energy storage* (218) és *energy efficiency* (215) – arra utalnak, hogy a vizsgált publikációk jelentős része az energiahatékonyság növelésére, az energiamenedzsment rendszerek fejlesztésére, valamint a megújuló energiaforrások hatékony integrációjára összpontosít.

A klaszter további meghatározó elemei, úgymint *microgrids* (213), *electric vehicles* (182) és *fuel cells* (169), rávilágítanak arra, hogy az intelligens energiahálózatok (*smart grids*) és a decentralizált energiaelosztási

megoldások kulcsszerepet töltenek be a hidrogéngazdaság fejlődésében. A *microgrid* és *energy management* kulcsszavak közötti szoros kapcsolat kiemeli, hogy a kutatások középpontjában olyan integrált rendszerek állnak, amelyek képesek a megújuló energiaforrások, köztük a hidrogén, hatékony elosztására és tárolására.

A klaszterben az *electric vehicles* és *fuel cells* jelenléte arra utal, hogy a közlekedési szektor elektrifikációja és a hidrogénalapú üzemanyagcellás technológiák terjedése szintén meghatározó kutatási irányt képvisel. Ezek a technológiák nem csupán az energiafelhasználás dekarbonizációjához járulnak hozzá, hanem új kihívásokat is teremtenek az energiatárolási és -elosztási rendszerek optimalizálásában.

Külön figyelmet érdemel az *energy storage* kulcsszó hangsúlyos szerepe, amely jelzi, hogy a hidrogén, mint energiatárolási médium, kiemelt jelentőséggel bír a fenntartható energiaellátás biztosításában. A tárolási megoldások fejlesztése szoros összefüggést mutat az energiamedzsment és optimalizációs módszerek kutatásával, amelyeket a klaszter központi elemei is tükröznek. A második klaszter a hidrogénalapú energiarendszerek technológiai és operatív aspektusait integrálja, különös hangsúlyt helyezve az energiaelosztás, tárolás és felhasználás optimalizálására. A klaszter szerkezete egyértelműen tükrözi azt a törekvést, hogy a megújuló energiák és a hidrogéntekológiák alkalmazása révén hatékonyabb, fenntarthatóbb és intelligensebb energiahálózatok jöjjenek létre, amelyek támogatják a dekarbonizációs célkitűzéseket és előmozdítják a zöld gazdaság fejlődését.

A harmadik (vagy 3.) klaszter – Megújuló energiaforrások és hidrogéntekológia elemzése

A kulcsszavak hálózati elemzése során a harmadik klaszter a megújuló energiaforrások és a hidrogéntekológia közötti kapcsolatrendszer helyezi előtérbe. A klaszter tematikus súlypontja a hidrogéntermelés és -tárolás megújuló energiaforrásokkal történő integrált alkalmazására koncentrálnak, különös tekintettel a zöld hidrogén előállításának lehetőségeire és kihívásaira.

A klaszter leggyakrabban előforduló kulcsszavai – mint a *renewable energies* (271 előfordulás), *renewable energy* (251), *energy* (222), *wind power* (193), *hydrogen storage* (166), valamint *hydrogen production* (148) – jól tükrözik azt a tudományos diskurzust, amely a fenntartható energiaátmenet kulcselemeként kezeli a megújuló energiákra épülő hidrogéntekológiákat. A kulcsszavak elemzése alapján megállapítható, hogy a kutatások fókuszában elsősorban a nap- (*solar energy*, *solar energy generation*) és szélenergia (*wind power*) áll, mint a hidrogén előállításához leginkább preferált megújuló energiaforrások.

A *hydrogen production* és *hydrogen storage* kulcsszavak kiemelt szerepe arra utal, hogy a vizsgált publikációk jelentős része a hidrogénlánc technológiai kérdéseire, azon belül is a kibocsátásmentes előállításra, valamint a tárolási kapacitások optimalizálására irányul. A klaszterben megjelenő *energy systems* (118) és *power* (135) kulcsszavak jelenléte továbbá arra is rávilágít, hogy a hidrogén integrációja komplex energiarendszerekbe

történik, ahol a megújuló forrásokból származó energiatermelés hatékonysága, stabilitása és skálázhatósága kulcsfontosságú tényezők.

A harmadik klaszter struktúrája egyértelműen demonstrálja, hogy a hidrogéntekológia fejlődése szoros összefüggésben áll a megújuló energiaforrások kiaknázásával. A klaszter kapcsolatrendszere alapján kirajzolódik az a tudományos törekvés, amely a fosszilis energiahordozóktól való függetlenedés jegyében a hidrogént, mint energiahordozót, a nap- és szélenergia integrált alkalmazásával kívánja fenntartható módon előállítani és hasznosítani.

A negyedik (vagy 4.) klaszter – Mesterséges intelligencia és döntéshozatali modellek

A kulcsszavak hálózati klaszterezése alapján az egyik meghatározó tudáscentrumot a negyedik klaszter képviseli, amely a módszertani és technológiai innovációk, különösen a mesterséges intelligencia (MI) és a gépi tanulás (ML) energetikai alkalmazásait helyezi fókuszba. A klaszter tematikája a matematikai-algoritmikus megközelítések felhasználását hangsúlyozza a döntéshozatali folyamatok támogatásában, az energiarendszerek működésének optimalizálásában, valamint azok előrejelzésében.

A klaszter leggyakrabban előforduló kulcsszavai – mint a *machine learning* (121 előfordulás), *forecasting* (114), *digital storage* (106), *algorithm* (86), illetve *artificial intelligence* (84) – egyértelműen arra utalnak, hogy a publikációk jelentős hányada adatvezérelt, prediktív modellek fejlesztésére és alkalmazására összpontosít. Ezek az eszközök kulcsszerepet játszanak a hidrogéntekológia és az energiaszektor komplex döntési problémáinak kezelésében, különösen olyan gyorsan változó és bizonytalan környezetekben, ahol a hagyományos modellek korlátokba ütköznek.

A *forecasting* kulcsszó kiemelt jelenléte azt jelzi, hogy az időbeli előrejelzések – például az energiakereslet, -termelés vagy -tárolás tekintetében – a kutatások középpontjában állnak. A klaszterhez tartozó publikációk jelentős része nemcsak az operatív optimalizációs feladatok megoldására törekszik, hanem célja a bizonytalanságok csökkentése és a kockázatok hatékonyabb kezelése is. Az *artificial intelligence* és *algorithm* kulcsszavak jelenléte jól mutatja, hogy a vizsgált tudományos munkák szoros kapcsolatban állnak a fejlett számítástechnikai eljárásokkal, amelyek képesek nagyméretű adatállományok (*digital storage*) feldolgozására és valós idejű döntéstámogatás biztosítására.

A negyedik klaszter tehát a mesterséges intelligencia és a gépi tanulás módszertani integrációjának tudományos lenyomatát hordozza, különös tekintettel a hidrogénalapú energetikai rendszerek és a fenntartható energiamedzsment irányába mutató döntéshozatali folyamatokra. A klaszter struktúrája világosan jelzi, hogy a digitális transzformáció egyre nagyobb hatással van az energiaágazatban alkalmazott döntéstámogató rendszerek fejlődésére: az algoritmikus megközelítések révén a döntések mindinkább prediktívvé és adaptívvá válnak, elősegítve ezzel az energiaátmenet hatékonyságát és a zöld gazdaság megerősödését.

Az ötödik (vagy 5.) klaszter – Sztochasztikus modellezés és bizonytalanságkezelés elemzése

Az ötödik klaszter tematikája egyértelműen a bizonytalanságok kezelésére, valamint a sztochasztikus és prediktív modellezési módszerek alkalmazására fókuszál. A klaszter legfőbb kulcsszavai – *uncertainty analysis* (348 előfordulás), *uncertainty* (281), *stochastic systems* (280), *monte carlo methods* (274), valamint *intelligent systems* (191) – azt jelzik, hogy a kutatások központi kérdése a kockázatok és bizonytalanságok számszerűsítése, valamint ezek hatékony kezelése a hidrogéntechnológiákhoz és az energiarendszerekhez kapcsolódó döntéshozatal során.

A klaszterben kiemelt szerepet kapnak a Monte Carlo-szimulációk, amelyek a sztochasztikus modellezés egyik legerjedtebb eszközei a komplex, többváltozós rendszerek kimeneteleinek előrejelzésében. Az itt megjelenő módszertani megközelítések lehetőséget biztosítanak arra, hogy a kutatók és döntéshozók jobban megértsék a bizonytalanság forrásait, és ennek megfelelően alakítsanak ki adaptív, rugalmas kockázatkezelési stratégiákat.

Az *intelligent systems* kulcsszó jelenléte arra utal, hogy a bizonytalanságkezelési módszerek egyre inkább intelligens, önadaptív rendszerekbe integrálódnak, amelyek képesek valós idejű adatokra alapozva dinamikusan reagálni a környezeti és piaci változásokra. Az ötödik klaszter tehát egy olyan módszertani bázist képvisel, amely nélkülözhetetlen a hidrogénalapú beruházások és az energiarendszerek tervezésében, különösen a volatilis piaci környezet és a technológiai kockázatok fényében.

A bibliometriai hálózatelemzés eredményeként azonosított öt klaszter átfogó és strukturált képet nyújt a hidrogéngazdasághoz kapcsolódó tudományos diskurzus tematikus szerkezetéről, egyúttal rávilágít a kutatási terület interdiszciplináris természetére. A klaszterek világosan elkülöníthető tudásterületeket reprezentálnak, ugyanakkor a közöttük megfigyelhető szoros kapcsolati hálókat az is jelzik, hogy a hidrogéntechnológiával összefüggő kérdések csak komplex, többdimenziós megközelítéssel ragadhatók meg.

A klaszterstruktúra egyértelmű implikációja, hogy a hidrogéngazdaságot érintő kutatások nem elszigetelten kezelik a technológiai, gazdasági, környezeti és döntésméleti aspektusokat, hanem egyre inkább egymásra épülő, integrált keretrendszerekben vizsgálják azokat. Az első klaszter a fenntarthatósági és beruházási szempontok összekapcsolására irányuló törekvéseket emeli ki, míg a második klaszter a technológiai operacionalizáció, különösen az energiaelosztási és tárolási megoldások fejlesztése felé mutat. A harmadik klaszterben kirajzolódik a megújuló energiaforrásokra – elsősorban nap- és szélenergiára – épülő zöld hidrogén előállításának tudományos fókusza, amely a dekarbonizációs stratégiák egyik kulcseleme.

A negyedik klaszter ezzel szemben a digitális transzformációs trendeket és az intelligens algoritmusok döntéstámogató szerepét hangsúlyozza, különösen a prediktív és adatvezérelt modellezési technikák elterjedésével összefüggésben. Az ötödik klaszter révén pedig jól

körvonalazódik az a módszertani háttér, amely a kockázattal és bizonytalansággal terhelt beruházási környezet értelmezéséhez és modellezéséhez szükséges.

A klaszterek alapján levonható fő következtetés, hogy a hidrogéngazdaság komplexitása megköveteli a döntéshozók és kutatók részéről a technológiai, gazdasági és döntésméleti szempontok egyidejű mérlegelését. A jövőbeli kutatások számára mindez azt jelenti, hogy az egyes tudásterületek közötti határvonalak elmosódnak, és egyre nagyobb jelentőséget kapnak az integrált, rendszerszintű megközelítések, amelyek a hidrogéntechnológia fejlesztését nemcsak műszaki, hanem gazdasági és társadalmi beágyazottságában is képesek értelmezni.

A kutatási diskurzus időbeli és földrajzi dimenziói

A kulcsszavak időbeli előfordulásának elemzése lehetőséget kínál a hidrogéntechnológiával és energiarendszerekkel kapcsolatos tudományos diskurzus tematikus fejlődési irányainak azonosítására. Az adatok alapján világosan kirajzolódik, hogy a 2010-es évek publikációi elsősorban az energiaátvitel, az energiahálózatok fejlesztése, a beruházási lehetőségek vizsgálata és az alapvető megújuló energiaforrások hasznosítása köré koncentráálódtak. Ezzel az időszakkal párhuzamosan jelentek meg az analitikus és szimulációs módszerek alkalmazásának első hullámai, amelyek megalapozták a későbbi modellezési és döntéstámogatási gyakorlatokat.

A 2020-as évek kutatásait ezzel szemben már az új generációs technológiák térnyerése jellemzi, különös tekintettel a mesterséges intelligencia és a gépi tanulás energetikai alkalmazásaira. A vizsgált időszakban jelentős hangsúlyt kaptak a döntésméleti megközelítések, a gazdasági életképességet vizsgáló értékelési keretrendszerek, az energiatárolás kihívásai, valamint az alternatív technológiákhoz kapcsolódó optimalizálási problémák. Ezen túlmenően a publikációk egyre nagyobb teret szentelnek a kockázatok mélyreható vizsgálatának, a szabályozási környezet elemzésének, valamint a nagy hatékonyságú, decentralizált infrastrukturális rendszerek modellezésének. Mindez a kutatási irányok tematikai bővülésére és a megoldási módszerek komplexitásának növekedésére utal.

Az időbeli trendek azt mutatják, hogy a 2010-es években a kutatások főként az energetikai beruházások statikus értékelésére és a kockázatkezelési modellek fejlesztésére koncentrááltak, így erősítve a módszertani alapok megteremtését (Brandão et al., 2005; Csapi, 2018; Kozlova, 2017; Zhao et al. 2018; Mohamed, 2018). Ezzel szemben a 2020-as években megjelent az MI és a gépi tanulás integrációja a reálopciók döntéstámogatásba, ami lehetővé tette a dinamikus, prediktív beruházási modellezést. A tematikus eltolódás a döntéshozatal számára is új perspektívákat kínál a fenntartható beruházások optimalizálásában (Van Assche & Compennolle, 2023; Bhuiyan et al., 2025; Ojadi et al., 2024; Weng & Li, 2024).

A kulcsszavak időbeli elemzése mellett a földrajzi eloszlás vizsgálata is elengedhetetlennek bizonyult a kutatási tér globalitásának és koncentrációs fókuszainak feltérképezéséhez. A VOSviewer adatai alapján a vizsgálatba

kizárólag olyan országok vagy azokat reprezentáló szervezetek kerültek be, amelyek legalább 50 publikációval, illetve 50 idézettel rendelkeztek a vizsgált időszakban. E szűrési kritériumok alapján összesen 25 releváns ország azonosítható, amelyek a hidrogéngazdaság és az energia-rendszerek tudományos párbeszéd meghatározó szereplőiként értelmezhetők.

Az országok közötti megoszlás elemzése időben a vizsgált 2000-2025 közötti időintervallumon belül 2018 és 2022 közé tevődik, ami a publikáció tekintetében azt jelenti, hogy 2018 és 2022 között mutatták a legjelentősebb publikációs aktivitást a legjelentősebb publikációs számmal rendelkező országok. A kapott eredmények azt mutatják, hogy az idézettség tekintetében az első öt ország – a teljes minta 20%-át képviselve – összesen 83573 idézetet generált. Kína ebben a kategóriában kiemelkedő helyet foglal el, egyedül 28921 hivatkozással. A publikációk száma alapján is hasonló koncentráció figyelhető meg: az első öt ország – Kína, Egyesült Államok, Irán, Egyesült Királyság és India – összesen 2384 publikációt tett közzé, ami a szűrt minta több mint felét (56,91%) teszi ki. Az idézettség tekintetében Kína mellett kiemelkedő országok az Egyesült Államok, Irán, Egyesült Királyság és Kanada.

Ezek az adatok jól szemléltetik a tudományos teljesítmény földrajzi koncentrációját, és rávilágítanak arra, hogy a hidrogénalapú energetikai megoldások kutatása – bár globális kihívásokat céloz – valójában néhány vezető tudományos központ köré szerveződik. Ez a koncentrációs minta arra utal, hogy a domináns országok tudományos közösségei nem csupán az innováció technológiai irányvonalait határozzák meg, hanem jelentős mértékben

befolyásolják a tudományos eszmecsere tematizálását is. 2. táblázat

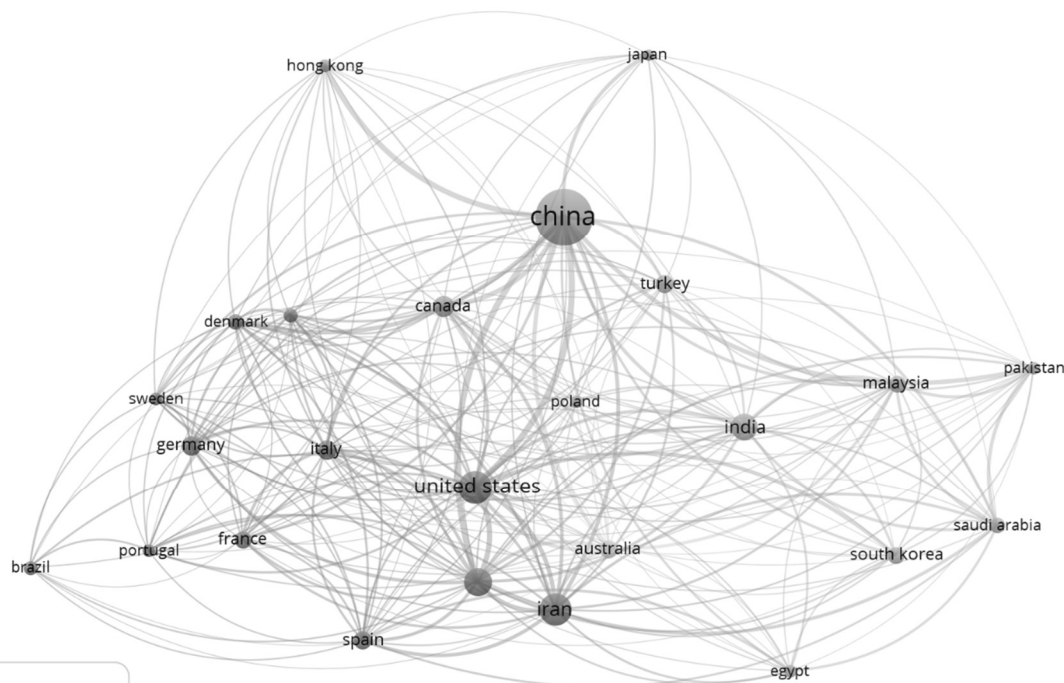
A VOSviewer számára megadott feltételek, valamint az eredmények bemutatása az országok vonatkozásában

Szűrési feltétel az országokra vonatkozóan	Minimum publikációk száma országonként 50 db és minimum idézettség száma 50 db.
A keresési feltételeknek megfelelő, legrelevánsabb országok száma a VOSviewer alapján	25 db ország/országot képviselő szervezet
A releváns publikáló országok/országot képviselő szervezetek 20%-a, melyek a legmagasabb hivatkozási értékekkel rendelkeznek	5 db ország, melyek összesen 83573 db hivatkozással rendelkeznek
Legmagasabb hivatkozási számmal rendelkező ország	28921 db hivatkozás, Kína
A releváns publikáló országok/országot képviselő szervezetek 20%-a, melyek a legmagasabb publikációs értékekkel rendelkeznek	5 db ország, melyek összesen 2384 db publikációval rendelkeznek.
Legmagasabb publikálási számmal rendelkező ország	1444 db publikáció, Kína
Az országokból/országot képviselő szervezetekből kialakított klaszterek száma	4 db klaszter
Releváns országok/országot képviselő szervezetekhez kapcsolódó időszak	2018-2022

Forrás: saját szerkesztés VOSviewer eredmények alapján

2. ábra

Az országok közötti együttműködések hálózata



Forrás: VOSviewer alapján saját szerkesztés

Az országok közötti együttműködések hálózatát a 2. ábra szemlélteti, amely vizualizálja a publikációs kapcsolatrendszerek mentén kialakult tudományos együttműködési klasztereket. Az elemzés négy nagyobb klasztert azonosított, amelyek földrajzi fókuszpontjai a globális kutatási tér szerveződésének centrumait jelölik ki.

A hidrogéntekológiához és az energiarendszerekhez kapcsolódó tudományos publikációs aktivitás és idézettség tekintetében rendkívül erős koncentráció figyelhető meg, amely egyértelműen a globális tudományos elitközpontok dominanciájára utal. A tudományos együttműködési hálózatok vizsgálata pedig azt jelzi, hogy ezen országok nem elszívetelten működnek, hanem egymással intenzív kutatási kapcsolatban állnak, így hatásuk nem csupán lokális, hanem globális szinten is érvényesül.

A kutatási aktivitás földrajzi megoszlása és klaszteralapú elemzése

Az országok közötti együttműködések hálózati elemzését a VOSviewer klaszterezési algoritmusával végeztük. A program négy tematikusan elkülönülő, de tartalmilag szoros összefüggő klasztert azonosított, amelyeket az alábbiakban ismertetünk (lásd 2. ábra). A klaszterek részletes jellemzőit a 3. melléklet tartalmazza (online).

Az első klaszter – Hidrogénstratégiai és piacvezérelt innovátorok

A klaszter meghatározó országai: Egyesült Államok, Irán, Egyesült Királyság. E klaszter szereplőit az átlagnál magasabb idézettségi mutatók és kifejezetten intenzív publikációs tevékenység jellemzik. A kutatások középpontjában a stratégiai rugalmasság, a reálopciók alkalmazása, a piaci szabályozások modellezése, valamint a beruházási döntések komplex elemzése áll. A klaszter országai kulcsszerepet töltenek be a hidrogénpiac szabályozási keretrendszerének kialakításában és az ipari méretű dekarbonizációs kezdeményezések előmozdításában.

A második klaszter – Feltörekvő hidrogéngazdaságok és kockázatelemzők

A klaszter meghatározó országai: India, Malajzia. Ez a csoport mérsékelt publikációs aktivitással rendelkezik, de növekvő trendeket mutat. A kutatások fókuszja elsősorban a kockázatelemzésre, a sztochasztikus modellezésre és a beruházási döntések rugalmasságának vizsgálatára irányul. A klaszterhez tartozó országokra jellemző a fejlődő hidrogénpiac és az energiastratégiák intézményi megerősödése, különösen az állami támogatások és infrastruktúrafejlesztések kontextusában.

A harmadik klaszter – Technológiai és ipari innovátorok

A klaszter meghatározó országai: Kína, Kanada. Ez a klaszter kiemelkedik mind a publikációk, mind az idézettség tekintetében, különösen Kína vonatkozásában. A vizsgált publikációk a hidrogéntekológiák fejlesztésére, az üzemanyagcellák vizsgálatára, az infrastruktúra-optimalizálásra és a játékelméleti modellek alkalmazására

összpontosítanak. Az országok kiemelkedő szerepet játszanak az ipari méretű hidrogénprojektek és a technológiai innovációk terén.

A negyedik klaszter – A megújuló hidrogén és fenntartható beruházások vezetői

A klaszter meghatározó országa: Ausztrália. E klaszter átlagos publikációs és idézettségi mutatók jellemzik. A kutatási fókusz a megújuló energiaforrásokra épülő hidrogéntermelés, a fenntarthatósági értékelések, döntéshozatali modellek és hosszú távú energiapolitikai stratégiák köré szerveződik. Ausztrália jelentős megújulóenergia-potenciálja révén fontos szereplője a zöld hidrogénnel kapcsolatos tudományos diskurzusnak, különösen a fenntartható piacépítés szempontjából.

A publikációs és idézettségi adatok alapján az első és második klaszterek rendelkeznek a legnagyobb elemszámmal, ugyanakkor Kína kiemelkedő eredményei miatt a harmadik klaszter is meghatározó jelentőséggel bír a kutatási térben. A földrajzi klaszterek vizsgálata jól rávilágít a tudományos produktivitás globális koncentrációjára, és alátámasztja azt az összefüggést, hogy a kutatási fókuszok és tematikus hangsúlyok szoros kapcsolatban állnak az adott országok technológiai fejlettségével, gazdasági prioritásaival és szabályozási környezetével.

A földrajzi klaszterelemzés eredményei arra utalnak, hogy a hidrogénnel kapcsolatos tudományos aktivitás nem kizárólag a magas jövedelmű gazdaságokra koncentrálódik, hanem bizonyos fejlődő országokban is dinamikus növekszik. Különösen Irán, Egyiptom és Pakisztán esetében figyelhető meg a publikációs aktivitás átlag feletti aránya a teljes mintában, amely több, egymással összefüggő tényezőre vezethető vissza.

Az elmúlt években mindhárom ország nemzeti szintű hidrogénstratégiai irányokat fogalmazott meg, amelyek a hidrogéntekológiák fejlesztését és exportpotenciálját kiemelt kormányzati célként kezelik. Egyiptom 2024-ben hivatalosan elfogadta a *National Low Carbon Hydrogen Strategy*-t, amely az ország megújulóenergia-kapacitására építve a zöldhidrogén-termelés és -export ösztönzését tűzte ki célul (EBRD, 2024; IRENA, 2024). Irán esetében a hidrogénkutatások növekedését a jelentős megújulóenergia-potenciál és a fosszilis alapú gazdaság diverzifikációs törekvései magyarázzák (Abdoos et al., 2025; Bassiri, 2024). Pakisztánban pedig a hidrogénstratégiájában jelentős célokat fogalmaz meg a hidrogéntekológiák kutatására és fejlesztésére vonatkozóan. Stratégiája mellett pedig a *China–Pakistan Economic Corridor* (CPEC) zöldenergia-projektjeihez kapcsolódva elősegítené a nemzetközi tudományos együttműködések. Ennek oka, hogy a CPCE egy olyan együttműködési kezdeményezés, melynek célja, hogy Kína (szintén egyik fő képviselője a területnek) és Pakisztán között infrastrukturális, energetikai és ipari fejlesztési program valósuljon meg (Das Valasai, 2025; Gondal, 2018; The Pakistan Academy of Engineering, 2022; Wang & Zan, 2024). Önmagában a stratégiai törekvések nem különböztetik meg ezen országokat más államoktól, mivel napjainkban az országos és régiós hidrogénstratégiák megléte gyakori. Azonban

fennállnak olyan további magyarázatok, melyek együttesen indokolják az említett országok jelentős szerepét. E három országban a hidrogén kutatásának tudományos bázisa nem az energiamixben való jelenlegi arányt, hanem a stratégiai K+F irányultságot tükrözi. Az *IEA Global Hydrogen Review* (2023) és az *IRENA Hydrogen Economy Outlook* (2024) szerint a hidrogén részaránya ezeknek az országoknak az energiamixében jelenleg 1% alatti, de a nemzeti programok és a nemzetközi partnerségek igen magas kutatási intenzitást generálnak. Az *UNESCO Science Report* (2021) Iránt, Egyiptomot és Pakisztánt a „feltörekvő tudományos gazdaságok” kategóriájába sorolja, ahol a publikációs aktivitás növekedését legfőképp állami finanszírozású kutatási programok és regionális együttműködések hajtják.

A publikációs mintázat tehát azt jelzi, hogy a fejlődő országok kutatási és technológiai pozicionálása a globális energiatudományi hálózatokban egyre erőteljesebb, annak ellenére, hogy gazdasági súlyuk és hidrogénpiaci részarányuk továbbra is korlátozott. Ez a megfigyelés jövőbeli kutatási alapot nyújthat az energiamix-arányok kvantitatív módon történő vizsgálatára, valamint a hidrogénprojektek száma és a publikációs aktivitás közötti összefüggések modellezésére.

Az eredmények alapján a földrajzi klaszterelemzés nem anomáliát, hanem a tudományos diverzifikáció és a technológiai átmenet folyamatát tükrözve megvilágítja, hogy a területhez kapcsolódó publikációs földrajzi eloszlás ma már nem kizárólag a fejlett országok privilégiuma, hanem egyre inkább globális, többpólusú jelenség (IEA, 2023; IRENA, 2024; UNESCO, 2021; The Energy Institute, 2024).

A tudományos közösség szerzői hálózatai és publikációs koncentrációja

Az országok szerinti klaszterelemzést követően indokoltnak látszik a kutatási tér szerzői szintű vizsgálata is, amely lehetőséget kínál a tudományos közösségek közötti kapcsolati mintázatok, a publikációs teljesítmények és az idézettségi koncentrációk feltérképezésére. Ennek érdekében a VOSviewer szoftverrel végzett elemzés során a következő szűrési feltételeket alkalmaztuk: egy szerzőnek legalább öt publikációval kellett rendelkeznie, amelyekhez legalább 200 hivatkozás társult, valamint a szoftver legfeljebb 25 szerzőt engedélyezett publikációnkénti társításként. A megadott kritériumok alapján 56 releváns szerző került azonosításra a 2000-2025 közötti vizsgált időszakban. A jelölt időintervallumon belül a szűrés által azonosított szerzők témához kötődő publikációs aktivitása a 2014 és 2023 évekre tevődik.

A vizsgálat során külön figyelmet fordítottunk a szerzői teljesítmény eloszlására. A publikációs aktivitás alapján az azonosított szerzők felső 20%-a – 11 kutató – összesen 161 publikációval járult hozzá a teljes mintához, amely az összes releváns publikáció 34,33%-át teszi ki. Bár ez jelentős arány, elmarad a korábbi országos elemzésben megfigyelt koncentrációtól. Ugyanakkor az idézettségi mutatók ennél erőteljesebb koncentrációt jeleznek: a legtöbbet idézett szerzők felső 20%-a – szintén

11 fő – összesen 11607 hivatkozással rendelkezik, amely a teljes minta idézettségi értékének 42,52%-át képviseli. A legnagyobb idézettséggel bíró szerző Mohammadi-Ivatloo, Behnam, aki 1444 hivatkozással és 25 publikációval a publikációs aktivitásban is vezető helyen áll. A legnagyobb hatású szerzők átlagos idézettsége több mint kétszerese a teljes mintára számított átlagos idézettségi értéknek, amely egyértelműen a tudományos diskurzusra gyakorolt erős befolyásra utal.

3. táblázat

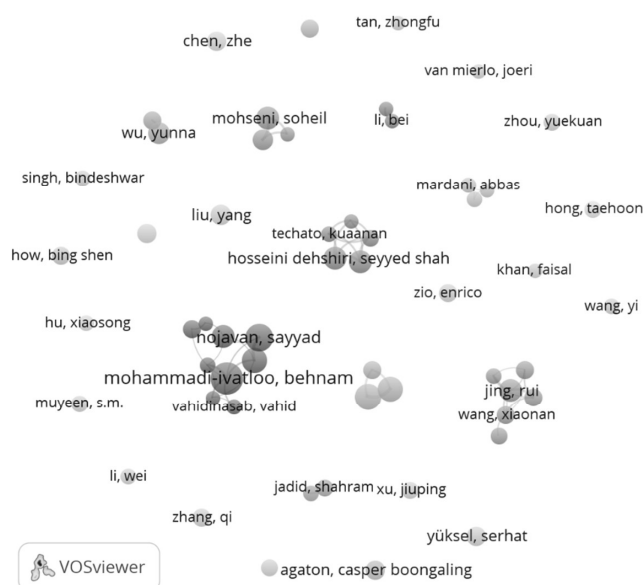
A VOSviewer számára megadott feltételek, valamint az eredmények bemutatása a szerzők vonatkozásában

Szűrési feltétel a publikációkra vonatkozóan	Maximum 25 db szerző publikációként és minimum 200 db hivatkozás szerzőként, valamint minimum 5 db publikáció szerzőként
A keresési feltételeknek megfelelő, legrelevánsabb szerzők száma a VOSviewer alapján	56 db szerző
A releváns szerzők 20%-a, akik a legmagasabb hivatkozási értékkel rendelkeznek	11 db szerző, akik összesen 11607 db hivatkozással rendelkeznek
Legmagasabb hivatkozás számmal rendelkező szerző	1444 db hivatkozás a szerzőre Mohammadi-Ivatloo, Behnam
A releváns szerzők 20%-a, akik a legmagasabb publikációs értékkel rendelkeznek	11 db szerző, akik összesen 161 publikációval rendelkeznek
Legmagasabb publikálási számmal rendelkező szerző	25 db publikáció, Mohammadi-Ivatloo, Behnam
Klaszterek száma	30
Releváns szerzőkhöz kapcsolódó időszak	2014-2023

Forrás: saját szerkesztés VOSviewer eredmények alapján

3. ábra

A szerzői hálózatok közötti kapcsolati sűrűség



Forrás: VOSviewer alapján saját szerkesztés

A szerzői együttműködési hálózat klaszterezése során a VOSviewer 30 különálló klasztert azonosított. E magas szám arra enged következtetni, hogy a vizsgált szerzők jelentős része nem alkot szoros együttműködési kapcsolatot egymással, illetve számos esetben egyelemű, izolált kutatói csoportokat képeznek. Ez a megállapítás összhangban van a 3. ábra vizualizációs eredményeivel, amely szemléletesen mutatja be a szerzői hálózatok közötti kapcsolati sűrűséget.

Ugyanakkor az ábrán jól kivehetők olyan klaszterek is, amelyek nagyobb elemszámot képviselnek, és sűrűbb kapcsolati hálózatot alkotnak. Ez alapján indokoltá vált egy második körös elemzés lefolytatása, amelynek célja a kapcsolati mintázatok szűkítése és a tudományosan releváns együttműködési struktúrák mélyebb vizsgálata. E célból a korábban meghatározott szűrési feltételek alkalmazásával egy újabb, csökkentett adatállományon alapuló elemzést végeztünk, amely kizárólag a központi szerzői csoportokat tartalmazza, azaz a legnagyobb összekapcsolt elemkészletet. A részletes eredményeket a 4. táblázat mutatja be.

4. táblázat

A VOSviewer számára megadott feltételek, valamint az eredmények bemutatása a szerzők vonatkozásában

<i>Szűrési feltétel a publikációkra vonatkozóan</i>	<i>Maximum 25 db szerző publikációként és minimum 200 db hivatkozás szerzőként, valamint minimum 5 db publikáció szerzőként</i>
A keresési feltételeknek megfelelő, legrelevánsabb szerzők száma a VOSviewer alapján	9 db szerző
A keresési feltételeknek megfelelő, legrelevánsabb szerzők hivatkozási értékei	összesen 5713 db hivatkozással rendelkeznek
Legmagasabb hivatkozás számmal rendelkező szerző	1444 db hivatkozás a szerzőre Mohammadi-Ivatloo, Behnam
A keresési feltételeknek megfelelő, legrelevánsabb szerzők publikációs értékei	összesen 100 db publikációval rendelkeznek
Legmagasabb publikálási számmal rendelkező szerző	25 db publikáció, Mohammadi-Ivatloo, Behnam
Klaszterek száma	3
Releváns szerzőkhöz kapcsolódó időszak	2019-2021

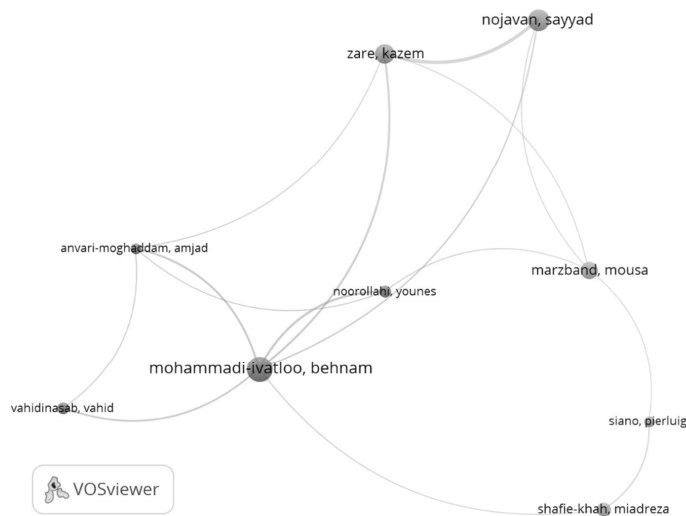
Forrás: Saját szerkesztés VOSviewer eredmények alapján

A korábbi, teljes szerzői mintán végzett elemzés tapasztalataira építve – különös tekintettel a kapcsolatok hiányára és a sok esetben egyelemű klaszterekre – a VOSviewer segítségével egy csökkentett adatállományt állítottunk elő, amely kizárólag a legrelevánsabb szerzőket és a közöttük fennálló kapcsolatokat tartalmazza. A szűkített vizsgálat eredményeként három jól elkülöníthető, ugyanakkor tematikusan összefüggő klasztert azonosítottunk. Ezek a kutatói csoportosulások a hidrogéngazdasághoz kapcsolódó energiarendszer-modellezési megközelítések eltérő, de kiegészítő aspektusait képviselik. Ebben az esetben

a vizsgált 2000–2025 közötti időszakon belül, a klaszterszűrés eredményeül kapott szerzők aktivitása 2019 és 2021 között volt jelentős. A klaszterek szerinti szerzői felosztás részleteit a 4. melléklet (online), míg a kapcsolati hálót a 4. ábra szemlélteti.

4. ábra

A kapcsolati háló



Forrás: VOSviewer alapján saját

Az első klaszter középpontjában a rugalmas és intelligens energiarendszerek kutatása áll. A klaszter vezető szerzője Behnam Mohammadi-Ivatloo, aki a mintában a legnagyobb idézettséggel és publikációs aktivitással rendelkezik. A klaszter szerzői jellemzően az energiarendszerek optimalizálásával, sztochasztikus modellezéssel és a megújuló energiaforrásokkal – különösen a zöld hidrogénnel – kapcsolatos döntéshozatali folyamatokkal foglalkoznak. Az alkalmazott módszertani eszköztárban hangsúlyosan jelennek meg a Monte Carlo-szimulációk, a reálopcios modellek, valamint a mesterségesintelligencia-alapú optimalizálási technikák. E megközelítések célja az energia-termelés és -elosztás hatékonyságának növelése, valamint a hidrogénalapú infrastruktúra beruházási döntéseinek támogatása. A bizonytalan környezeti tényezők kezeléséhez a szerzők széles körben alkalmaznak statisztikai és gépi tanuláson alapuló eljárásokat is.

A második klaszter az optimalizált és integrált energiapiaci modellek témakörét fedi le. A klaszter kiemelkedő szerzője Mousa Marzband, akinek munkái elsősorban a hidrogénpiacok, az ármechanizmusok, valamint az energiapolitikai és szabályozási stratégiák elemzésére irányulnak. A kutatások módszertani fókuszában a játékelméleti megközelítések, a stratégiai rugalmasság modellezése, valamint a döntésifa-analízis és aggregált piacmodellezés állnak. A klaszterhez tartozó szerzők publikációi nemcsak a gazdasági és pénzügyi döntéshozatal folyamatainak mélyebb megértéséhez járulnak hozzá, hanem közvetetten támogatják a hidrogénalapú rendszerek fenntartható integrációját is. Bár a kutatások a hidrogéntekológiákhoz kötődnek, a módszertani fejlesztések és modellezési technikák kapnak prioritást.

A harmadik klaszter a sztochasztikus és robusztus energiarendszerek optimalizálásával foglalkozik, különös tekintettel a hidrogénalapú rendszerek bizonytalanságainak kezelésére. A klaszter vezető szerzője Sayyad Nojavan, akinek kutatásai a kockázatelemzésre, a reálción alkalmazására, valamint a stratégiai döntéshozatalra helyezik a hangsúlyt. A szerzők módszertani eszköztára elsősorban binomiális modellezési technikákból, Monte Carlo-szimulációkból, valamint bizonytalanságelemzésekben épül fel. A klaszter kutatásai jelentős mértékben hozzájárulnak az energetikai beruházások és hidrogénprojektek körüli kockázatok kezeléséhez, különös tekintettel a hosszú távú beruházási stratégiák tervezésére és a döntések rugalmas alkalmazkodóképességének értékelésére.

A 4. ábra vizuálisan is megerősíti a fenti klaszterstruktúrák meglétét, valamint rámutat a klasztereken belüli és azok közötti együttműködési mintázatokra. A szerzők által lefedett tématerületek vizsgálata alapján megállapítható, hogy a fenntarthatósági problémák, különösen a gazdasági, kockázati és bizonytalansági aspektusokat érintő kérdések, hatékonyan kezelhetők optimalizálási és sztochasztikus modellezési eszközökkel. Emellett az is megfigyelhető, hogy a technológiai fejlődéssel párhuzamosan egyre nagyobb hangsúlyt kap a mesterséges intelligencia és a gépi tanulási módszerek alkalmazása az energiarendszerek és a hidrogéngazdaság modellezésében. A kutatói hálózatok szerkezete jól tükrözi a téma terület interdiszciplináris jellegét, valamint azt, hogy a kutatásokat egyre inkább a módszertani innovációk és a rendszerszintű gondolkodás határozza meg.

Következtetések és jövőbeli kutatási irányok

A kulcsszavak, országok és szerzők vizsgálata, valamint a kapcsolati háló elemzése alapján átfogó képet kaptunk a hidrogénalapú energiaberuházások témakörének tudományos trendjeiről. Ezek összekapcsolásaképpen az 5. melléklet felsorolja a témakörben legfontosabbnak vélt publikációkat (összesen 21db publikáció a vizsgált 100 db közül), melyek mind legalább 60 hivatkozással rendelkeznek – többek között Cao et al., 2019; Dolatabadi & Mohammadi-Ivatloo, 2017; Hakimi et al., 2021; Kalavani et al., 2019; Khalili et al., 2019; Mahmud et al., 2020; Majidi et al., 2017; Marzband et al., 2017; Marzband et al., 2018; Mohammadi et al., 2017; Mohammadi et al., 2018; Nojavan et al., 2018; Nojavan et al., 2019; Nojavan & Zare, 2018; Saberi et al., 2019; Sadeghian et al., 2022; Talari et al., 2018; Vahidinasab, 2014; Vahidinasab et al., 2020; Yuan et al., 2020 (online). A publikációk rámutatnak arra, hogy Irán kiemelkedő szerepet játszik a témában (számos kulcsfontosságú publikáció köthető iráni szerzőkhöz, gyakran nemzetközi együttműködésben). A szerzők által vizsgált területek döntően az optimalizálásra, az energiamedzsmentre, a sztochasztikus modellezésre és a bizonytalanságkezelésre, valamint a mikrohálózatok és energiahubok elemzésére koncentrálnak, melyek a kulcsszavak relációiból is felismerhetők.

A kulcsszavak klaszterenkénti megoszlása (lásd 6. melléklet) azt jelzi, hogy a jelenlegi kutatási fókusz továbbra is az energetikai rendszerek alapvető kérdéseiben, különösen az energiaeosztás és -tárolás témakörében nyugszik (2. klaszter), mely a legnagyobb kulcsszósűrűséget mutatja (online). Ezt követi a gazdasági és környezeti aspektusokat feltáró klaszter (1. klaszter), ami a fenntarthatósági és költséghatékonysági kérdések kiemelt jelenlétére utal. A hidrogéntechnológiát, illetve a megújuló energiaforrásokat vizsgáló klaszterek közepes méretűek, ami arra utal, hogy bár ezek egyre hangsúlyosabbá válnak, jelenleg inkább a már meglévő energetikai kihívásokra adott lehetséges megoldásként jelennek meg a diskurzusban, semmint önálló tematikus vezérfonalként. Kutatásunk ezt a tendenciát tükrözi: a hidrogént nem önmagában, hanem az energiaátmenet és energiatárolás komplex kihívásaira adott válaszként értelmezzük. A mesterséges intelligencia és döntéstámogatás klaszter viszonylag kis méretű, ami arra utal, hogy ezek az új technológiák bár már megjelentek a kutatásokban, jelenlegi súlyuk kisebb, mint a klasszikus sztochasztikus modelleké és optimalizációs megközelítéseké. Ugyanakkor ezek a területek a kulcsszavak alapján is a jövő ígéretes kutatási irányai közé sorolhatók.

Országos bontásban Irán mellett jelentős az Egyesült Királyság, Kína, Thaiföld és Portugália hozzájárulása. A kínai publikációkban a hidrogén, az energiatárolás és az energiahatékonyság témái dominálnak, míg a brit és portugál kutatások az intelligens hálózatokra, energiarendszerekre és optimális algoritmusokra helyezik a hangsúlyt. Fontos megjegyezni, hogy a legtöbb meghatározó cikk a 2010-es évek végére datálódik, amelyek megalapozták a területet mind energetikai rendszerszinten, mind módszertani szempontból. A 2020-as évek publikációi ezzel szemben már specifikus megújulóenergia-alkalmazásokat és az intelligens rendszerek integrációját vizsgálják különféle fejlett módszerekkel. E megállapítások alapján, hasonlóan a kulcsszavakéhoz, a kirajzolódó legfőbb kutatási irányok között az optimalizáció, a megújuló energia és a bizonytalanság kezelése állnak, kiegészülve a szabályozási kérdések tanulmányozásával, melyeket az 5. melléklet mutat be (online). Minden kiválasztott publikáció szinte kivétel nélkül foglalkozik a megújuló energiaforrásokkal mint alapvető elemmel; ugyanakkor a hidrogén szerepe az esetek többségében háttérbe szorul az általános energetikai vizsgálatokhoz képest, csak néhány, kifejezetten hidrogénfókuszú tanulmány emeli ki döntő tényezőként.

Az általunk elemzett 3449 tanulmány közül 540 esetben jelenik meg a „hydrogen” kifejezés legalább a cím, az absztrakt vagy a kulcsszavak szintjén. E kifejezetten hidrogénnel foglalkozó tanulmányok túlnyomó többsége a hidrogént nem elszigetelt technológiaként, hanem integrált energiarendszerek elemeként vizsgálja. Ezek a publikációk zöldhidrogén-termelést (vízbontás, elektrolízis), hidrogéntárolást és hydrogen-based energy hubokat elemeznek, amelyek az elektromos, hő- és gázhálózatok összekapcsolásával teremtenek rendszerszintű rugalmasságot. A hidrogén elsősorban rugalmas energiahordozó és energiatárolási forma, amely kulcsszerepet játszik a

megújuló integrációjában, a szektorkapcsolatok (power-to-gas, power-to-fuel) kialakításában és az energiarendszerek dekarbonizációjában. A tanulmányok kisebb, de egyértelműen körvonalazható interdiszciplináris klasztert alkotnak, ahol a hidrogén mint energiahordozó a mesterségesintelligencia-alapú modellezéssel és a reálopciók szemlélettel együttesen jelenik meg. E kutatásokban az MI és a gépi tanulás elsősorban az energiahálózatok szabályozását, az ellátás rugalmasságának optimalizálását és a kereslet–kínálat dinamikus előrejelzését támogatja (Nojavan et al., 2022; Mohammadi-Ivatloo et al., 2020). A terület fejlődésében kulcsszerepet játszanak olyan szerzők, mint Mohammadi-Ivatloo, Nojavan és Marzband. Mohammadi-Ivatloo munkássága a smart grid és a hidrogéntekológiák operatív és stratégiai optimalizálására összpontosít, különös tekintettel az energiatárolásra és a keresletoldali rugalmasságra (Mohammadi-Ivatloo et al., 2020). Nojavan gépi tanulás alapuló előrejelző és döntéstámogató rendszereket fejlesztett ki, amelyek a hidrogénrendszerek működését és a piaci kockázatok kezelését támogatják (Nojavan et al., 2022). Marzband az intelligens mikrorendszerek és decentralizált energiahálózatok integrált tervezésére fókuszál, ahol a hidrogén termelése és tárolása a rendszerstabilitás és rugalmasság szempontjából kiemelt stratégiai szerepet kap (Marzband et al., 2019). A hidrogénintegrációt vizsgáló munkák közös jellemzője, hogy módszertanilag stochasztikus és többcélú optimalizációt, Monte Carlo-szimulációkat, technoökonomiai elemzést, játékelméleti modelleket, többkritériumos döntéstámogatást (MCDM), valamint egyre gyakrabban mesterségesintelligencia-alapú előrejelzéseket alkalmaznak. Ezekben a modellekben a reálopciók megközelítés értékes kiegészítő eszközként jelenik meg, mivel lehetővé teszi a technológiai rugalmasság és az adaptív beruházási döntések értékének formális számszerűsítését.

A vizsgált publikációk alapján általános következtetésként levonható, hogy a gazdasági és környezeti szempontú értékelések, valamint az energiatárolási és erőforrás-optimalizálási kérdések szinte kivétel nélkül megjelennek a hidrogénenergetikai beruházások elemzésekor. Az időbeli trendeket tekintve látható, hogy míg a korábbi évek munkái alapokat teremtettek (mind az energiarendszerek tervezése, mind a módszertani újítások terén), addig a legújabb kutatások fókuszra már a mesterséges intelligencia integrálására és általában a technológiai fejlődésre irányul a fenntartható energetikai rendszerekben.

A közös mintázatok elemzése alapján három, egymással összefüggő fejlődési irány rajzolódik ki. Az első az integrált technológiai-döntési modellek kialakulása, ahol a reálopciók szemléletet MI-vezérelt prediktív modellekkel ötvözik az energiahálózatok optimalizálása érdekében (Bhuiyan et al., 2025; Ojadi et al., 2024; Carozzani & D'Alpaos, 2025). Jelentős jövőbeli potenciált mutatnak a dinamizált értékelési keretek, amelyek az energiaárak, karbonkreditek és hidrogéntermelési költségek volatilitását gépi tanulással modellezik, lehetővé téve a beruházási opciók értékének időbeni adaptivitását (Weng & Li, 2024; Liu et al., 2023; Schachter & Mancarella, 2016; Mohamed, 2018; Van Assche & Compennolle 2022). További

elmozdulás lehet az intelligens energiarendszerekhez illesztett beruházási rugalmasság irányába, amelyben a hidrogén, mint energiatárolási és kiegyenlítő technológia, kulcsszerepet kap a rendszerstabilitás növelésében és a decentralizált döntéshozatalban (Ojadi et al., 2024). E három irány szintézise világosan jelzi, hogy a hidrogénalapú energetikai beruházások jövőbeni kutatása nem választható el a mesterséges intelligencia-vezérelt reálopciók megközelítésektől, amelyek az energetikai rendszerek bizonytalanságainak, tanulási folyamataikban és rugalmasságukban rejlő döntési értéket képesek feltárni.

A jövőben érdemes a kutatási eredmények alapján kidolgozott, energiatárolással és erőforrás-optimalizálással kapcsolatos javaslatokat beépíteni a szabályozási és támogatási rendszerek fejlesztésébe, hogy az energetikai beruházások hatékonysága tovább javulhasson. A prediktív döntéstámogatás és a rugalmas beruházási tervezés összehangolása lehetővé teheti a dekarbonizációs célok és a gazdasági megtérülés egyidejű érvényesítését. Emellett indokolt feltérképezni, hogy mely módszertanok, matematikai modellek és közgazdasági elemzési eszközök a legalkalmasabbak az intelligens rendszerek (például AI-alapú döntéstámogatás) energiaszektorba való integrálására. A jövőbeli kutatások számára kulcskérdés a reálopciók modellek és az MI-algoritmusok integrált alkalmazása, különösen a hidrogéntekológiák életciklus-elemzésében és kockázatértékelésében, a stratégiai beruházási döntésekben. Mivel jelen kutatás eredményeinek korlátaiban jól látható, hogy jelenleg a három témakör ötvözése legfőképp az energiaszektor irányába tereli a hangsúlyt, így a jövőben a technológia fejlődésével fontos lehet olyan szakirodalmi áttekintés készítése, amely nem csupán a fenntartható energia kontextusában vizsgálja a gépi tanulás és a mesterséges intelligencia, valamint a reálopciók módszertanok adta lehetőségeket, hanem kifejezetten a zöld hidrogénre vonatkozóan szűkebb keresztmetszetet biztosít.

Kutatásunk következtetéseként az adataalapú, tanuló beruházási döntésekben látjuk a hidrogénalapú és megújuló energiarendszerek rugalmasabb, hatékonyabb és fenntarthatóbb tervezését és üzemeltetését lehetővé tevő koncepciót, ahol a mesterséges intelligencia a döntési rugalmasság operatív megvalósítását biztosíthatja.

Felhasznált irodalom

- Abdoos, M., Yousefi, H., & Shahee, A. (2025). Green hydrogen development in Iran: A SWOT analysis of challenges and opportunities focusing on renewable energy resources. *Discover Sustainability*, 6(1), 435. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01327-1>
- Amram, M., & Kulatilaka, N. (1999). *Real options: Managing strategic investment in an uncertain world*. Harvard Business School Press.
- Bassiri, A. (2024). *State of hydrogen technology innovation in Iran: Opportunities, challenges and startups* [Presentation]. Technology and Innovation Conclave 1.0, National Agricultural Science Complex (NASC) & ICAR, New Delhi, India. Asian and Pacific Centre for Transfer of Technology (APCTT).

- Bélyácz, I. (2011). *Stratégiai beruházások és reálopciók*. Aula Kiadó.
- Bhuiyan, S.M.Y., Chowdhury, A., Hossain, M.S., Mobin, S.M., & Parver, I. (2025). AI-driven optimization in renewable hydrogen production: A review. *American Journal of Interdisciplinary Studies*, 6(1), 76–94. <https://doi.org/10.63125/06z40b1>
- Biggins, F., O’Sullivan, A., Devine, M.T., & Rogan, F. (2022). Green hydrogen investments: Investigating the option to wait. *Energy*, 247, 123576. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123576>
- Bóta, G. (2006). *Vállalati gazdasági elemzések reálopciókkal* (Doktori értekezés). Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. <https://repozitorium.omikk.bme.hu/bitstreams/f2fcd717-1c00-42a7-9f81-614cd67c00d3/download>
- Brandão, L.E., Dyer, J.S., & Hahn, W.J. (2005). Using binomial decision trees to solve real-option valuation problems. *Decision Analysis*, 2(2), 69–88. <https://doi.org/10.1287/deca.1050.0040>
- Camargo, L., Comas, D., Escorcía, Y.C., Alviz-Meza, A., Carrillo Caballero, G., & Portnoy, I. (2023). Bibliometric analysis of global trends around hydrogen production based on the Scopus database in the period 2011–2021. *Energies*, 16(1), 87. <https://doi.org/10.3390/en16010087>
- Cao, Y., Wang, Q., Du, J., Nojavan, S., Jermsittiparsert, K., & Ghadimi, N. (2019). Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 20, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100274>
- Carozzani, A., & D’Alpaos, C. (2025). The real option approach to investment decisions in hybrid renewable energy systems: A systematic literature review. *Energies*, 18(20), 5535. <https://doi.org/10.3390/en18205535>
- Copeland, T., & Antikarov, V. (2001). *Real options: A practitioner’s guide*. Texere Publishing.
- Csapi, V. (2018). *Stratégiai beruházások a villamosenergia-szektorban. A reálopció-elmélet alkalmazásának lehetőségei és korlátai a liberalizált villamosenergia-szektor egyedi és összetétel-szintű optimalizálási döntéshozatala során* (Doktori értekezés). Pécsi Tudományegyetem, Közgazdaságtudományi Kar.
- Csapi, V. (2018). A reálopciók első 40 éve. *Vezetéstudomány*, 49(9), 34–45. <https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2018.09.03>
- Das Valasai, G., Alam, M., Lakhan, S.M., Rehman, A.U., Ali, S., & Bhangwar, S. (2025). Pathways for Pakistan’s low-carbon transition: Policy, costs, and hydrogen integration. *Spectrum of Engineering Sciences*, 3(8), 1086–1100. <https://doi.org/10.2307/resrep34173.6>
- Dixit, A.K., & Pindyck, R.S. (1994). *Investment under uncertainty*. Princeton University Press.
- Dolatabadi, A., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2017). Stochastic risk-constrained scheduling of smart energy hub in the presence of wind power and demand response. *Applied Thermal Engineering*, 123, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.069>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W.M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- European Bank for Reconstruction and Development (EBRD). (2024, January 9). *Egypt’s national low carbon hydrogen strategy – Short version* (Rev 10, 215000-00078-REP-SD02). European Bank for Reconstruction and Development.
- Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. (2019). *Hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the European energy transition*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2843/341510>
- Gondal, I.A. (2018). Green hydrogen production potential for developing a hydrogen supply chain in Pakistan. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4349–4361. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.093>
- Hakimi, S.M., Hasankhani, A., Shafie-khah, M., & Catalão, J.P.S. (2021). Stochastic planning of a multi-microgrid considering integration of renewable energy resources and real-time electricity market. *Applied Energy*, 298, 117215. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117215>
- Harzing, A.W., & Alakangas, S. (2016). Google Scholar, Scopus and the Web of Science: A longitudinal and cross-disciplinary comparison. *Scientometrics*, 106, 787–804. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1798-9>
- International Energy Agency (IEA). (2023). *Global hydrogen review 2023*. OECD/IEA.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). *Geopolitics of the energy transformation: The hydrogen factor*. IRENA.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *World energy transitions outlook 2024: 1.5 °C pathway* [Report]. IRENA.
- Kalavani, F., Mohammadi-Ivatloo, B., & Zare, K. (2019). Optimal stochastic scheduling of cryogenic energy storage with wind power in the presence of a demand response program. *Renewable Energy*, 130, 268–280. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.007>
- Kar, S.K. (2022). Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(20), 10803–10824. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.013>
- Khalili, T., Nojavan, S., & Zare, K. (2019). Optimal performance of microgrid in the presence of demand response exchange: A stochastic multi-objective model. *Computers and Electrical Engineering*, 74, 429–450. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.01.027>
- Knight, F.H. (1921). *Risk, Uncertainty And Profit*. Houghton Mifflin Company.

- Kozlova, M. (2017). Analyzing the effects of a renewable energy support mechanism on investments under uncertainty: Case of Russia [Doctoral dissertation]. Lappeenranta University of Technology. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*, 772. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/147571>
- Kozlova, M. (2017). Real option valuation in renewable energy literature: Research focus, trends and design. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 80, 180–196. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.166>
- Lamberts-Van Assche, H., & Compennolle, T. (2022). Using Real Options Thinking to Value Investment Flexibility in Carbon Capture and Utilization Projects: A Review. *Sustainability*, 14(4), 2098. <https://doi.org/10.3390/su14042098>
- Mahmud, K., Khan, B., Ravishankar, J., Ahmadi, A., & Siano, P. (2020). An internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109840. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109840>
- Majidi, M., Nojavan, S., & Zare, K. (2017). A cost-emission framework for hub energy system under demand response program. *Energy*, 134, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.003>
- Markowitz, H. (1952). Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, 7(1), 77–91.
- Martínez-Ceseña, E.A., Azzopardi, B., & Mutale, J. (2013). Assessment of domestic photovoltaic systems based on real options theory. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(2), 250–262. <https://doi.org/10.1002/pip.2208>
- Marzband, M., Alavi, H., Ghazimirsaeid, S.S., Uppal, H., & Fernando, T. (2017). Optimal energy management system based on stochastic approach for a home microgrid with integrated responsive load demand and energy storage. *Sustainable Cities and Society*, 28, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.017>
- Marzband, M., Fouladfar, M.H., Akorede, M.F., Lightbody, G., & Pouresmaeil, E. (2018). Framework for smart transactive energy in home-microgrids considering coalition formation and demand side management. *Sustainable Cities and Society*, 40, 136–154. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.010>
- Mohamed, A.H.S. (2018). Smart grid operation with hybrid renewable resources and electric vehicle. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 1(1), 88–93. <https://doi.org/10.24084/repqj16.222>
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2020). Fuzzy-based scheduling of wind integrated multi-energy systems under multiple uncertainties. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100602>
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-Ivatloo, B., & Yousefi, H. (2017). Energy hub: From a model to a concept – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1512–1527. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.030>
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-Ivatloo, B., Hosseinzadeh, M., Yousefi, H., & Khorasani, S.T. (2018). Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 33–50. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.035>
- Myers, S.C. (1977). Determinants of Corporate Borrowing. *Journal of Financial Economics*, 5(2), 147–176. [https://doi.org/10.1016/0304-405X\(77\)90015-0](https://doi.org/10.1016/0304-405X(77)90015-0)
- Mullanu, S., Chua, C., Molnar, A., & Yavari, A. (2025). Artificial intelligence for hydrogen-enabled integrated energy systems: A systematic review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 141, 283–303. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.08.013>
- Nadarajah, S. (2023). A review of the operations literature on real options in energy. *Energy Economics*, 117, Article 106056. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106056>
- Nojavan, S., Majidi, M., & Zare, K. (2018). Optimal scheduling of heating and power hubs under economic and environment issues in the presence of peak load management. *Energy Conversion and Management*, 156, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.007>
- Ojadi, J., Odionu, C., Onukwulu, E.C., Owulade, O.A., & Anfo Pub. (2024). AI-enabled smart grid systems for energy efficiency and carbon footprint reduction in urban energy networks. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 5(1), 1549–1566. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2024.5.1.1549-1566>
- Rózsa, A. (2008). *Képességek vagy reálopciók? A stratégiai és pénzügyi szempontok egyeztetésének lehetőségei és korlátai, különös tekintettel a rugalmas technológiai beruházások problémáira* (Doktori értekezés). Pécsi Tudományegyetem, Közgazdaságtudományi Kar. <https://pea.lib.pte.hu/server/api/core/bitstreams/79679190-229f-4422-9dc4-79ab00832938/content>
- Rózsa, A. (2010). Menedzsmentkommunikáció reálopciók: A stratégiai és pénzügyi szempontok összhangba hozatalának lehetőségei. *Vezetéstudomány*, 41(9), 45–57. <https://doi.org/10.14267/VEZTUD.2010.09.04>
- Roucham, B., & Zaghdoud, O. (2025). Mapping green hydrogen and renewable energy research in extended BRICS (Brazil, Russia, India, China, South Africa and Others): A bibliometric approach with a future agenda. *Hydrogen*, 6(2), 33. <https://doi.org/10.3390/hydrogen6020033>
- Saberi, K., Pashaei-Didani, H., Nourollahi, R., Zare, K., & Nojavan, S. (2019). Optimal performance of CCHP-based microgrid considering environmental issue in the presence of real-time demand response. *Sustainable Cities and Society*, 45, 596–606. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.023>

- Sadeghian, O., Oshnoei, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Vahidinasab, V., & Anvari-Moghaddam, A. (2022). A comprehensive review on electric vehicles smart charging: Solutions, strategies, technologies, and challenges. *Journal of Energy Storage*, *54*, 105241. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105241>
- Schachter, J.A., & Mancarella, P. (2016). A critical review of real options thinking for valuing investment flexibility in smart grids and low-carbon energy systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *56*, 261–271. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.071>
- Talari, S., Shafie-khah, M., Osório, G.J., Aghaei, J., & Catalão, J.P.S. (2018). Stochastic modelling of renewable energy sources from operators' point-of-view: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1953–1965. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.006>
- Teece, D.J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, *18*(7), 509–533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7)
- The Energy Institute, KPMG, & KEARNEY. (2024). *Statistical review of world energy 2024* (73rd ed.). The Energy Institute.
- The Pakistan Academy of Engineering. (2022). *Hydrogen strategy for Pakistan 2022* [Report]. The Pakistan Academy of Engineering.
- Trigeorgis, L. (1997). *Real Option, Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*. The MIT Press.
- UNESCO. (2021). *UNESCO science report: The race against time for smarter development*. UNESCO Publishing.
- Vahidinasab, V. (2014). Optimal distributed energy resources planning in a competitive electricity market: Multiobjective optimization and probabilistic design. *Renewable Energy*, *66*, 354–363. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.042>
- Vahidinasab, V., Tabarzadi, M., Arasteh, H., Alizadeh, M.I., Mohammad Beigi, M., Sheikhzadeh, H.R., Mehran, K., & Sepasian, M.S. (2020). Overview of electric energy distribution networks expansion planning. *IEEE Access*, *8*, 34750–34769. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973455>
- Van Assche, S., & Compernelle, T. (2022). Using real options thinking to value investment flexibility in carbon capture and utilization projects: A review. *Sustainability*, *14*(4), 2098. <https://doi.org/10.3390/su14042098>
- Wang, M., & Zan, W. (2024). Hydrogen energy and regulatory policies: Economic pathways for accelerating China's decarbonization agenda. *International Journal of Hydrogen Energy*, *110*(4), 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.088>
- Weng, H., & Li, J. (2024). Real-time energy management strategy of the hydrogen-coupled microgrid based on Informer model prediction results and deep reinforcement learning. *Journal of Physics: Conference Series*, *2788*(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2788/1/012011>
- Wolf, A. (2023). Establishing hydrogen hubs in Europe: An analysis of the European hydrogen landscape (cepInput No. 1/2023). Centrum für Europäische Politik. <https://www.cep.eu/en/eu-topics/details/cep/establishing-hydrogen-hubs-in-europe-cepinput.html>
- Xiang, H., Li, X., Liao, X., Cui, W., Liu, F., & Li, D. (2025). Artificial intelligence in renewable energy systems: Applications and security challenges. *Energies*, *18*(8), 1931. <https://doi.org/10.3390/en18081931>
- Yuan, Z., He, S., Alizadeh, A., Nojavan, S., & Jermstiparsert, K. (2020). Probabilistic scheduling of power-to-gas storage system in renewable energy hub integrated with demand response program. *Journal of Energy Storage*, *29*, 101393. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101393>
- Zhao, H., Liu, F., Zhang, H., & Liang, Z. (2019). Research on a learning rate with energy index in deep learning. *Neural Networks*, *110*, 225–231. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.12.009>
- Zoltayné Paprika, Z. (szerk.). (2002). *Döntésemélet*. Alinea Kiadó.
- Zupic, I., & Čater, T. (2014). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, *18*(3), 429–472. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>

Mellékletek

1. melléklet

A Scopus adatbázis lekérdezésével és az adatbázis elemzésével kapcsolatos információk

Keresési feltételek	
Irodalmak lekérdezéséhez alkalmazott felület	Scopus
Vizsgált időszak	2000-2025
Kereséshez alkalmazott kulcsszavak	„real option*” OR „real options analysis” OR „option value” OR „decision tree analysis” OR „binomial model” OR „Monte Carlo simulation” OR „flexibility valuation” OR „stochastic modeling” OR „game theory” OR „strategic flexibility” AND „hydrogen economy” OR „hydrogen production” OR „hydrogen storage” OR „hydrogen infrastructure” OR „hydrogen supply chain” OR „green hydrogen” OR „blue hydrogen” OR „grey hydrogen” OR „hydrogen utilization” OR „fuel cell*” OR „hydrogen demand” OR „industrial decarbonization” OR „renewable hydrogen” OR „hydrogen policies” OR „hydrogen market” OR „hydrogen investment” AND „decision” OR „decision making” OR „real option*” OR „real options analysis” OR „option value” OR „decision tree analysis” OR „binomial model” OR „Monte Carlo simulation” OR „flexibility valuation” OR „stochastic modeling” OR „game theory” OR „strategic flexibility” AND „hydrogen economy” OR „hydrogen production” OR „hydrogen storage” OR „hydrogen infrastructure” OR „hydrogen supply chain” OR „green hydrogen” OR „blue hydrogen” OR „grey hydrogen” OR „hydrogen utilization” OR „fuel cell*” OR „hydrogen demand” OR „industrial decarbonization” OR „renewable hydrogen” OR „hydrogen policies” OR „hydrogen market” OR „hydrogen investment” AND „decision” OR „decision making”
Kereséshez alkalmazott kategóriák	Decision Sciences, Business, Management and Accounting, Energy, Environmental Science, Economics, Econometrics and Finance, Social Sciences, Engineering, Earth and Planetary Sciences
Összes eredményül kapott irodalom	3449 db publikáció
Összes hivatkozás	118243 db idézettség az eredményül kapott irodalmakra
A teljes állomány publikált cikkeinek 1%-a, melyek a legmagasabb idézettségi számmal rendelkeznek	34 db publikáció, összesen 23528 db idézettség
Éves átlagos publikálás a vizsgált időszakban	149,9565 db publikáció megjelenés/év
Éves átlagos idézettség a vizsgált időszakban	5141 db idézettség / év
Az irodalmak rendszerezéséhez és az irodalmak közötti kapcsolatok megállapításához alkalmazott szoftver	Microsoft Excel, VOSviewer

Forrás: saját szerkesztés

2. melléklet

A kulcsszavakra vonatkozó klaszterek

Klaszter	Fő hangsúly	Kulcsszavak
#1 (Első klaszter)	Gazdasági és környezeti aspektusok	alternative energy (228), article (71), biomass (68), carbon (161), carbon capture (65), carbon dioxide (154), carbon emission (80), china (113), climate change (130), commerce (140), cost analysis (54), cost benefit analysis (119), costs (259), decision making (591), decision theory (70), economic analysis (167), economic and social effects (127), economics (136), electric power generation (51), electricity (54), electricity generation (75), emission control (154), energy market (75), energy planning (57), energy policy (155), environmental impact (100), environmental technology (58), fossil fuels (118), game theory (250), gas emissions (87), global warming (77), greenhouse gases (137), hydrogen (154), investment (71), investments (312), life cycle (146), life cycle analysis (57), life cycle assessment (65), literature review (57), natural gas (64), numerical model (73), planning (51), power generation (94), profitability (102), real options (54), renewable resource (50), review (50), risk assessment (164), risk management (57), sales (52), sensitivity analysis (202), supply chain management (62), supply chains (72), sustainability (157), sustainable development (269)
#2 (Második klaszter)	Energiaelosztás és tárolás	charging (batteries) (101), demand response (127), demand side management (50), distributed energy resources (68), distributed power generation (72), electric batteries (59), electric energy storage (120), electric load dispatching (68), electric loads (84), electric power distribution (82), electric power transmission networks (139), electric utilities (88), electric vehicle (157), electric vehicles (182), energy efficiency (215), energy management (279), energy management systems (162), energy resources (68), energy storage (218), energy utilization (166), fuel cell (85), fuel cells (169), genetic algorithms (94), hybrid vehicles (56), integer programming (131), micro grid (74), microgrid (213), microgrids (125), multiobjective optimization (161), multi-objective optimization (60), natural resources (52), operating costs (65), optimisations (143), optimization (437), particle swarm optimization (pso) (76), power markets (131), renewable energy resources (311), renewable energy source (161), renewable energy sources (55), scheduling (94), secondary batteries (81), smart grid (91), smart power grids (89), storage systems (74), vehicles (56), vehicle-to-grid (51), wind turbines (66)

#3 (Harmadik klaszter)	Megújuló energiaforrások és hidrogénteknológia	clean energy (63), cost reduction (70), energy (222), energy systems (118), green hydrogen (52), hydrogen production (148), hydrogen storage (166), integrated energy systems (79), photovoltaic system (64), photovoltaics (61), power (135), renewable energies (271), renewable energy (251), solar energy (129), solar power generation (115), wind power (193)
#4 (Negyedik klaszter)	Mesterséges intelligencia és döntéshozatal	algorithm (86), artificial intelligence (84), cost effectiveness (83), decision trees (50), decisions makings (50), deep learning (51), digital storage (106), energy conservation (75), forecasting (114), learning systems (61), machine learning (121), machine-learning (77), neural networks (50), reinforcement learning (51), reliability (61), reliability analysis (75)
#5 (Ötödik klaszter)	Sztochasztikus modellezés és bizonytalanságkezelés	intelligent systems (191), monte carlo analysis (55), monte carlo methods (274), monte carlo simulation (83), robust optimization (50), simulation (73), stochastic models (138), stochastic programming (65), stochastic systems (280), uncertainty (281), uncertainty analysis (348)

Forrás: saját szerkesztés VOSviewer eredmények alapján

3. melléklet

Az országokra vonatkozó klaszterek

Klaszter	Fő hangsúly	Országok
#1 (Első klaszter)	Hidrogénstratégiai és piacvezérelt innovátorok	Hollandia, Brazília, Egyesült Államok, Dánia, Németország, Portugália, Olaszország, Spanyolország, Irán, Svédország, Franciaország, Egyesült Királyság
#2 (Második klaszter)	Feltörekvő hidrogéngazdaságok és kockázatelemzők	Pakisztán, India, Szaúd-Arábia, Törökország, Egyiptom, Lengyelország, Dél-Korea, Malajzia
#3 (Harmadik klaszter)	Technológiai és ipari innovátorok	Japán, Hongkong, Kanada, Kína
#4 (Negyedik klaszter)	Megújuló hidrogén és fenntartható beruházások vezetői	Ausztrália

Forrás: saját szerkesztés VOSviewer eredmények alapján

4. melléklet

A szerzőkre vonatkozó klaszterek

Klaszter	Fő hangsúly	Szerzők
#1 (Első klaszter)	Rugalmas és intelligens energiarendszerek	Noorollahi, Younes; Anvari-Moghaddam, Amjad; Vahidinasab, Vahid; Mohammadi-Ivatloo, Behnam
#2 (Második klaszter)	Optimalizált és integrált energiapiaci modellek	Shafie-Khah, Miadreza; Marzband, Mousa; Siano, Pierluigi
#3 (Harmadik klaszter)	Stochasztikus és robusztus energiarendszerek optimalizálása	Nojavan, Sayyad; Zare, Kazem

Forrás: saját szerkesztés VOSviewer eredmények alapján

5. melléklet

A kutatási terület legrelevánsabbnak bizonyuló publikációi

Szerző	Publikáció	Évszám	Ország
Cao Y.; Wang Q.; Du J.; Nojavan S.; Jermisittiparsert K.; Ghadimi N.	Optimal operation of CCHP and renewable generation-based energy hub considering environmental perspective: An epsilon constraint and fuzzy methods	2019	Kína, Irán, Thaiföld
Dolatabadi A.; Mohammadi-Ivatloo B.	Stochastic risk-constrained scheduling of smart energy hub in the presence of wind power and demand response	2017	Irán
Hakimi S.M.; Hasankhani A.; Shafie-khah M.; Catalão J.P.S.	Stochastic planning of a multi-microgrid considering integration of renewable energy resources and real-time electricity market	2021	Irán, Portugália
Kalavani F.; Mohammadi-Ivatloo B.; Zare K.	Optimal stochastic scheduling of cryogenic energy storage with wind power in the presence of a demand response program	2019	Irán
Khalili T.; Nojavan S.; Zare K.	Optimal performance of microgrid in the presence of demand response exchange: A stochastic multi-objective model	2019	Irán
Mahmud K.; Khan B.; Ravishankar J.; Ahmadi A.; Siano P.	An internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: An overview	2020	Ausztrália, Banglades, Olaszország
Majidi M.; Nojavan S.; Zare K.	A cost-emission framework for hub energy system under demand response program	2017	Irán
Marzband M.; Alavi H.; Ghazimir-saeid S.S.; Uppal H.; Fernando T.	Optimal energy management system based on stochastic approach for a home Microgrid with integrated responsive load demand and energy storage	2017	Egyesült Királyság, Irán

Szerző	Publikáció	Évszám	Ország
Marzband M.; Fouladfar M.H.; Akorede M.F.; Lightbody G.; Pourresmaeil E.	Framework for smart transactive energy in home-microgrids considering coalition formation and demand side management	2018	Egyesült Királyság, Irán, Nigéria, Spanyolország
Mohammadi M.; Noorollahi Y.; Mohammadi-ivatloo B.	Fuzzy-based scheduling of wind integrated multi-energy systems under multiple uncertainties	2020	Irán
Mohammadi M.; Noorollahi Y.; Mohammadi-ivatloo B.; Hosseinzadeh M.; Yousefi H.; Khorasani S.T.	Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review	2018	Irán
Mohammadi M.; Noorollahi Y.; Mohammadi-ivatloo B.; Yousefi H.	Energy hub: From a model to a concept – A review	2017	Irán
Nojavan S.; Majidi M.; Zare K.	Optimal scheduling of heating and power hubs under economic and environment issues in the presence of peak load management	2018	Irán
Nojavan S.; Nourollahi R.; Pashaei-Didani H.; Zare K.	Uncertainty-based electricity procurement by retailer using robust optimization approach in the presence of demand response exchange	2019	Irán
Nojavan S.; Zare K.	Optimal energy pricing for consumers by electricity retailer	2018	Irán
Saberi K.; Pashaei-Didani H.; Nourollahi R.; Zare K.; Nojavan S.	Optimal performance of CCHP based microgrid considering environmental issue in the presence of real time demand response	2019	Irán
Sadeghian O.; Oshnoei A.; Mohammadi-ivatloo B.; Vahidinasab V.; Anvari-Moghaddam A.	A comprehensive review on electric vehicles smart charging: Solutions, strategies, technologies, and challenges	2022	Irán, Dánia
Talari S.; Shafie-khah M.; Osório G.J.; Aghaei J.; Catalão J.P.S.	Stochastic modelling of renewable energy sources from operators' point-of-view: A survey	2018	Irán, Portugália
Vahidinasab V.	Optimal distributed energy resources planning in a competitive electricity market: Multiobjective optimization and probabilistic design	2014	Irán
Vahidinasab V.; Tabarzadi M.; Araسته H.; Alizadeh M.I.; Mohammad Beigi M.; Sheikhzadeh H.R.; Mehran K.; Sepasian M.S.	Overview of Electric Energy Distribution Networks Expansion Planning	2020	Irán
Yuan Z.; He S.; Alizadeh A.; Nojavan S.; Jermisittiparsert K.	Probabilistic scheduling of power-to-gas storage system in renewable energy hub integrated with demand response program	2020	Kína, Irán, Thaiföld

Forrás: saját szerkesztés

6. melléklet

**A kutatási terület legrelevánsabbnak bizonyuló publikációihoz kapcsolható kulcsszavak
klaszterekben elfoglalt helye**

Klaszter	Fő hangsúly	Kulcsszavak
#1 (Első klaszter)	Gazdasági és környezeti aspektusok	alternative energy (228), carbon (161), carbon dioxide (154), commerce (140), cost analysis (54), costs (259), decision making (591), economic analysis (167), economic and social effects (127), electric power generation (51), electricity (54), energy market (75), energy planning (57), fossil fuels (118), game theory (250), greenhouse gases (137), investments (312), natural gas (64), numerical model (73), power generation (94), profitability (102), risk assessment (164), sales (52), sensitivity analysis (202), sustainable development (269)
#2 (Második klaszter)	Energiaelosztás és -tárolás	charging (batteries) (101), demand response (127), demand side management (50), distributed energy resources (68), electric energy storage (120), electric load dispatching (68), electric power distribution (82), electric power transmission networks (139), electric utilities (88), electric vehicle (157), electric vehicles (182), energy efficiency (215), energy management (279), energy management systems (162), energy resources (68), energy storage (218), energy utilization (166), fuel cell (85), fuel cells (169), integer programming (131), micro grid (74), multiobjective optimization (161), multi-objective optimization (60), natural resources (52), operating costs (65), optimisations (143), optimization (437), power markets (131), renewable energy resources (311), renewable energy source (161), scheduling (94), smart power grids (89), vehicle-to-grid (51), wind turbines (66)
#3 (Harmadik klaszter)	Megújuló energiaforrások és hidrogéntechológia	cost reduction (70), energy (222), energy systems (118), hydrogen storage (166), integrated energy systems (79), photovoltaic system (64), power (135), solar power generation (115), wind power (193)
#4 (Negyedik klaszter)	Mesterséges intelligencia és döntéshozatal	algorithm (86), cost effectiveness (83), digital storage (106), energy conservation (75), reliability (61)
#5 (Ötödik klaszter)	Sztochasztikus modellezés és bizonytalanságkezelés	intelligent systems (191), monte carlo methods (274), monte carlo simulation (83), robust optimization (50), imulation (73), tochastic models (138), stochastic programming (65), stochastic systems (280), uncertainty (281), uncertainty analysis (348)

Forrás: saját szerkesztés